

Procédé de gestion des niveaux de remplissage de cuves

Domaine technique

L'invention se rapporte au domaine des cuves agencées dans une structure flottante telle qu'un navire telles que des cuves étanches et thermiquement isolantes, à membranes. En particulier, l'invention se rapporte au domaine des cuves étanches et thermiquement isolantes pour le stockage et/ou le transport de gaz liquéfié à basse température, telles que des cuves pour le transport de Gaz de Pétrole Liquéfié (aussi appelé GPL) présentant par exemple une température comprise entre -50°C et 0°C, ou pour le transport de Gaz Naturel Liquéfié (GNL) à environ -162°C à pression atmosphérique. Ces cuves peuvent être destinées au transport de gaz liquéfié ou à recevoir du gaz liquéfié servant de carburant pour la propulsion de l'ouvrage flottant.

Dans un mode de réalisation, le gaz liquéfié est du GNL, à savoir un mélange à forte teneur en méthane stocké à une température d'environ -162°C à la pression atmosphérique. D'autres gaz liquéfiés peuvent aussi être envisagés, notamment l'éthane, le propane, le butane ou l'éthylène. Des gaz liquéfiés peuvent aussi être stockés sous pression, par exemple à une pression relative comprise entre 2 et 20 bars, et en particulier à une pression relative voisine de 2 bars. La cuve peut être réalisée selon différentes techniques, notamment sous la forme d'une cuve intégrée à membrane ou d'une cuve autoporteuse.

20 Arrière-plan technologique

Durant son stockage et/ou son transport, le liquide contenu dans une cuve est soumis à différents mouvements. En particulier, les mouvements en mer d'un navire, par exemple sous l'effet des conditions climatiques telles que l'état de la mer ou le vent, entraînent une agitation du liquide dans la cuve. L'agitation du liquide, généralement désignée sous le terme de « sloshing » ou ballonnement, engendre des contraintes sur les parois de la cuve qui peuvent nuire à l'intégrité de la cuve. Or, l'intégrité de la cuve est particulièrement importante dans le cadre d'une cuve de GNL de par la nature inflammable ou explosive du liquide transporté et le risque de point froid sur la coque en acier de l'unité flottante.

Afin de réduire les risques de dégradation des cuves liés aux mouvements de liquide dans les cuves, les navires méthaniers naviguent généralement avec des cuves vides ou au contraire pleines. En effet, dans une cuve vide, le liquide résiduel contenu dans la cuve présente un poids limité et génère que de faibles contraintes sur les parois de cuves. Dans une cuve pleine, l'espace résiduel non occupé par le liquide dans la cuve est limité, ce qui limite d'autant la liberté de mouvement du liquide dans la cuve et donc la force des impacts sur les parois de cuve. Ainsi, les navires méthaniers doivent généralement naviguer avec des cuves remplies à moins de 10% de leur capacité ou au contraire à plus de 70% de leur capacité afin de limiter les risques de dégradation des parois de cuves liées aux impacts de liquide en mouvement dans les cuves.

On connaît le document JP H107190 qui décrit un procédé de gestion des niveaux de remplissage d'une pluralité de cuves d'un navire transporteur de liquide cryogénique. Dans ce document, le transfert de liquide d'une cuve vers une autre s'opère lorsqu'il est déterminé que, dans une cuve, le mouvement du liquide qu'elle contient approche de sa période de résonnance, ce qui risque d'avoir des répercussions négatives en terme d'endommagement de la cuve (« sloshing »).

Résumé

Cet état de remplissage des cuves représente un état de remplissage théorique idéal qu'il n'est pas toujours possible d'atteindre. En particulier, en cas de départ d'urgence d'un navire en cours de chargement ou de déchargement de sa cargaison, le navire peut être amené à prendre la mer avec des cuves partiellement remplies. En effet, les opérations de chargement et déchargement du liquide contenu dans les cuves sont des opérations longues qu'il est donc nécessaire de stopper prématurément en cas d'alerte nécessitant un départ d'urgence. De telles alertes peuvent être liées à de nombreuses raisons comme par exemple à une catastrophe naturelle comme un tsunami, un tremblement de terre ou encore une alerte liée à une dégradation des installations portuaires.

Une idée à la base de certains modes de réalisation de l'invention est de limiter les risques liés aux mouvements de liquide dans un navire en mer comportant une pluralité de cuves partiellement remplies. Une idée à la base de certains modes

de réalisation de l'invention est de transvaser le liquide entre des cuves présentant des niveaux de remplissage à risque de dégradation pour obtenir des niveaux de remplissage desdites cuves comportant un risque de dégradation moindre. Une idée à la base de certains modes de réalisation de l'invention est de fournir un ou plusieurs scénarios de transfert permettant de passer d'un état de remplissage initial des cuves à un état de remplissage cible desdites cuves. Une idée à la base de certains modes de réalisation de l'invention est de transvaser le liquide entre les cuves selon un scénario de transfert présentant un niveau de sécurité satisfaisant au cours du déroulement dudit scénario de transfert. Pour cela, une idée à la base de certains modes de réalisation de l'invention est de calculer des probabilités d'endommagement des cuves au cours du déroulement d'un ou plusieurs scénarios de transfert.

Selon un mode de réalisation, l'invention fournit un procédé de gestion des niveaux de remplissage d'une pluralité de cuves agencées dans un navire, lesdites cuves étant connectées de manière à permettre un transfert de liquide entre lesdites cuves, le procédé comportant

- fournir un état initial définissant des niveaux de remplissage initiaux des cuves,
- déterminer au moins un état cible définissant des niveaux de remplissage finaux desdites cuves,
- déterminer un scénario de transfert de liquide, le scénario de transfert définissant un ou plusieurs flux de liquide à transférer entre les cuves au cours d'une période de transfert pour passer de l'état initial à l'état cible des cuves,
- calculer une probabilité d'endommagement des cuves en fonction de niveaux de remplissage successifs des cuves pendant la période de transfert, la probabilité d'endommagement des cuves définissant une probabilité qu'au moins une cuve soit endommagée au cours du déroulement du scénario de transfert,
- générer une série d'instructions destinées à transférer le liquide entre les cuves en conformité avec ledit scénario de transfert si la

probabilité d'endommagement des cuves satisfait un critère d'acceptation.

Le procédé selon l'invention définit au moins un scénario de transfert de liquide (gaz liquéfié), préférentiellement une pluralité de scénarios de transfert de liquide, entre les cuves de telle manière qu'un opérateur, ou l'équipage, soit en mesure de choisir le scénario qu'il désire. Dans ce cas, la pluralité de scénarios proposés à l'opérateur visent tous à réduire le risque d'endommagement des cuves, néanmoins ces scénarios peuvent différer les uns des autres au regard du temps nécessaire à leur accomplissement ainsi que des remplissages finaux de chacune des cuves.

Grâce à ces caractéristiques, le risque de dégradation des cuves est évalué pour le scénario de transfert en prenant en compte les niveaux de remplissage successifs des cuves au cours des transferts. Ainsi, grâce à ces caractéristiques, le risque d'endommagement des cuves est calculé non seulement pour l'état cible à atteindre mais également durant le transfert de liquide.

Ainsi, lorsqu'un bateau transporteur de gaz liquéfié est à quai, avec une cargaison au moins partielle de ses cuves, l'invention permet à l'équipage ou à un opérateur de revenir au plus vite dans une situation sécurisée, par exemple lorsqu'une tempête nécessite le départ du bateau de son point d'attache ou encore en cas d'obligation d'un départ rapide du bateau.

Selon des modes de réalisation, un tel procédé de gestion peut comporter une ou plusieurs des caractéristiques suivantes.

Selon un mode de réalisation, l'état cible présente une probabilité d'endommagement des cuves inférieure à la probabilité d'endommagement des cuves de l'état initial.

Grâce à ces caractéristiques, un navire présentant des cuves partiellement remplies peut être sécurisé en transvasant le liquide contenu dans lesdites cuves entre elles pour atteindre un état de remplissage des cuves plus sécurisé.

Selon un mode de réalisation, le procédé de gestion comporte en outre, si la probabilité d'endommagement des cuves satisfait le critère d'acceptation, transférer le liquide entre les cuves en conformité avec ledit scénario de transfert.

Selon un mode de réalisation, le procédé de gestion comporte en outre l'étape de fournir un paramètre de capacité de transfert définissant une capacité de transfert entre les cuves, le scénario de transfert étant déterminé en fonction dudit paramètre de capacité de transfert entre les cuves.

- 5 Selon un mode de réalisation, le paramètre de capacité de transfert comporte un paramètre de nombre de pompe pour une, des ou chaque cuve. Selon un mode de réalisation, le paramètre de capacité de transfert comporte un paramètre de débit de pompage de la ou des pompes des cuves. Selon un mode de réalisation, le paramètre de capacité de transfert comporte un paramètre de volume des cuves.
- 10 Selon un mode de réalisation, le paramètre de capacité de transfert entre les cuves comporte un ou plusieurs paramètres de diamètre des tuyaux de connexion entre les cuves.

- Selon un mode de réalisation, le procédé de gestion comporte en outre une étape de fournir au moins un paramètre environnemental définissant des données
- 15 environnementales du navire, le calcul de probabilité d'endommagement des cuves étant effectué en fonction dudit au moins un paramètre environnemental.

- Selon un mode de réalisation, le ou les paramètres environnementaux comportent un ou plusieurs des paramètres suivants : la hauteur de la mer du vent, la hauteur de la houle, la période de la mer du vent, la période de la houle, la direction
- 20 de la mer du vent, la direction de la houle, la force du vent, la direction du vent, la force du courant, la direction du courant, la direction relative du vent, de la houle, du courant, de la mer du vent par rapport au navire.

- Préférentiellement, le ou les paramètres environnementaux comporte la hauteur de la mer ou la hauteur de la houle, et de façon encore préférée la hauteur
- 25 de la mer et la hauteur de la houle sont les deux paramètres environnementaux considérés *a minima* par le procédé selon l'invention.

- Selon un mode de réalisation, le calcul de probabilité d'endommagement des cuves est réalisé en fonction d'au moins un paramètre choisi parmi le groupe de paramètres comportant les mouvements du navire, les niveaux des impacts de liquide
- 30 sur les parois de la cuve, le comportement statistique des impacts des mouvements de liquide, la résistance des cuves en fonction de la position dans lesdites cuves, le

temps passé dans différents niveaux de remplissage, le taux d'évaporation de gaz induit par le transfert de liquide, l'état de chargement de la structure du navire.

De Préférence, le calcul de probabilité d'endommagement considère au moins le comportement statistique des impacts de mouvements de liquide ou le temps
5 passé dans différents niveaux de remplissage, et de façon encore préférée le comportement statistique des impacts de mouvements de liquide et le temps passé dans différents niveaux de remplissage sont les deux paramètres considérés *a minima* pour le calcul d'endommagement.

Selon un mode de réalisation, le niveau de remplissage d'une cuve est
10 déterminé par la hauteur de liquide dans ladite cuve. Selon un autre mode de réalisation, le niveau de remplissage d'une cuve est déterminé par un volume de liquide contenu dans ladite cuve.

Selon un mode de réalisation, le procédé de gestion comporte en outre l'étape de déterminer un paramètre en temps réel et prendre en compte ledit
15 paramètre pour déterminer le scénario de transfert.

Selon un mode de réalisation, le procédé de gestion comporte en outre l'étape de déterminer un paramètre en temps réel et prendre en compte ledit paramètre pour déterminer le calcul de probabilité d'endommagement des cuves.

Selon un mode de réalisation, le navire comporte un ou plusieurs capteurs
20 permettant de fournir un paramètre du scénario de transfert en temps réel, notamment les niveaux de remplissage initiaux, les capacités des cuves, les débits des pompes, etc.

Selon un mode de réalisation, le navire comporte un ou plusieurs capteurs permettant de fournir un paramètre du calcul de probabilité d'endommagement des
25 cuves en temps réel, notamment les mouvements du navire, les paramètres environnementaux, etc.

Selon un mode de réalisation, le navire comporte une base de données comportant des données correspondant à un ou plusieurs paramètres du scénario de transfert.

Selon un mode de réalisation, le navire comporte une base de données comportant des données correspondant à un ou plusieurs paramètres paramètre du calcul de probabilité d'endommagement des cuves.

Selon un mode de réalisation, le critère d'acceptation est un critère de risque
5 d'endommagement des cuves au cours du scénario de transfert.

Selon un mode de réalisation, le calcul de la probabilité d'endommagement des cuves est réalisé selon la formule :

$$Risk_{ope} = \prod_{tk_n} \int_0^{surf} \int_0^{t_{ope}} prob_{tk_n}(Pres_{surf} > Res_{surf, tk_n, SC(fl_n)}) \cdot dsurf \cdot dt$$

dans laquelle tk_n représente le numéro de la cuve n,

10 SC représente les conditions de navigation en fonction du niveau de remplissage fl_n de la cuve tk_n,

Prob_{tk_n} représente la densité de probabilité de rencontrer une pression Pres_{surf} sur une surface interne de la cuve tk_n supérieure à la résistance Res_{surf} de ladite surface interne de la cuve tk_n en fonction des conditions
15 de navigation SC(fl_n),

surf est la surface interne impactée par le liquide, et

t_{ope} est la durée d'opération pour passer de l'état initial à l'état cible.

Selon un mode de réalisation, les conditions de navigations SC dépendent en outre d'au moins un paramètre parmi :

- 20
- l'angle d'incidence entre l'état de mer et le navire
 - la période de l'état de mer
 - la hauteur significative de l'état de mer
 - les mouvements du navire
 - la vitesse d'avance du navire.

25 Il est à noter qu'un état de mer peut être décomposé en mer de vent et houle, voire même houle croisée. Ainsi un état de mer peut être défini avec plusieurs composantes.

Selon un mode de réalisation, la densité de probabilité $Prob_{tk_n}(Pres_{surf} > Res_{surf}, tk_n, SC(fl_n))$ est prédéfinie.

Selon un mode de réalisation, la ou les densités de probabilité d'endommagement de la cuve sont prédéfinies à partir d'essais de mouvement liquide en laboratoire. Selon un mode de réalisation, les lois de probabilité d'endommagement de la cuve sont prédéfinies au moyen de campagnes d'acquisition de données sur des navires en mer.

Selon un mode de réalisation, le procédé comporte en outre l'étape de contrôler en continu des états successifs réels des cuves au cours de la période de transfert et, en réponse à la détection d'une divergence entre les états successifs réels des cuves et des états successifs prévisionnels de cuves déterminés par le scénario de transfert, réitérer le procédé défini ci-dessus.

Selon un mode de réalisation, le procédé comporte en outre :

- 15 - déterminer une pluralité de scénarios de transfert distincts, chaque scénario de transfert définissant un ou plusieurs flux de liquide à transférer entre les cuves au cours d'une période de transfert respective pour passer de l'état initial à l'état cible,
- 20 - calculer pour chaque scénario de transfert une probabilité respective d'endommagement des cuves en fonction de niveaux de remplissage successifs des cuves pendant la période de transfert correspondante, la probabilité d'endommagement des cuves définissant une probabilité qu'au moins une cuve soit endommagée au cours du déroulement dudit scénario de transfert,
- 25 - sélectionner un scénario parmi la pluralité de scénarios de transfert, et
- générer la série d'instructions destinées à transférer le liquide entre les cuves en conformité avec le scénario de transfert sélectionné si la probabilité d'endommagement des cuves correspondante satisfait un critère d'acceptation.

Selon un mode de réalisation, le procédé comporte en outre :

- déterminer une pluralité d'états cibles, chaque état cible définissant des niveaux de remplissages finaux des cuves,
- déterminer une pluralité de scénarios de transfert distincts, chaque scénario de transfert définissant un ou plusieurs flux de liquide à transférer entre les cuves au cours d'une période de transfert respective pour passer de l'état initial à un état cible de la pluralité d'états cibles,
- calculer pour chaque scénario de transfert une probabilité respective d'endommagement des cuves en fonction de niveaux de remplissage successifs des cuves pendant la période de transfert correspondante, la probabilité d'endommagement des cuves définissant une probabilité qu'au moins une cuve soit endommagée au cours du déroulement dudit scénario de transfert,
- sélectionner un scénario parmi la pluralité de scénarios de transfert, et
- générer la série d'instructions destinées à transférer le liquide entre les cuves en conformité avec le scénario de transfert sélectionné si la probabilité d'endommagement des cuves correspondante satisfait un critère d'acceptation.

Selon un mode de réalisation, un ou plusieurs scénarios peuvent ainsi être déterminés pour un, plusieurs ou chaque état cible.

- 20 Selon un mode de réalisation, le scénario de transfert est sélectionné en fonction de la probabilité d'endommagement des cuves, par exemple pour minimiser cette probabilité.

Selon un mode de réalisation, le scénario est sélectionné en fonction du critère d'acceptation.

- 25 Le scénario peut être sélectionné en fonction de critères d'acceptation variés. Selon un mode de réalisation, le scénario est sélectionné en fonction du temps passé exposé au risque d'endommagement des cuves lié aux mouvements de liquide dans les cuves. Selon un autre mode de réalisation, le scénario est sélectionné en fonction de la durée de transfert des scénarios. Selon un mode de réalisation, le
- 30 scénario est sélectionné en fonction d'un volume de gaz disponible dans les cuves à

l'issue du scénario de transfert pour alimenter des moyens de propulsion du navire, par exemple un moteur consommant du gaz.

Selon un mode de réalisation, certains paramètres tels que par exemple le niveau de mouvement de liquide dans les cuves, les mouvements du navire et/ou la
5 météo sont déterminés en temps réel, par exemple par des capteurs embarqués.

Selon un mode de réalisation, certains paramètres tels que par exemple le niveau de mouvement de liquide dans les cuves, les mouvements du navire et/ou la météo sont déterminés par prédiction.

Selon un mode de réalisation, le liquide est un gaz liquéfié, par exemple du
10 gaz naturel liquéfié.

Selon un mode de réalisation, l'invention fournit aussi un système de gestion des niveaux de remplissage de cuves mis en œuvre par ordinateur comportant des moyens pour :

- 15 - fournir un état initial définissant des niveaux de remplissage initiaux des cuves,
- déterminer un état cible définissant des niveaux de remplissage finaux desdites cuves,
- 20 - déterminer un scénario de transfert de liquide, le scénario de transfert définissant un ou plusieurs flux de liquide à transférer entre les cuves au cours d'une période de transfert pour passer de l'état initial à l'état cible des cuves,
- 25 - calculer une probabilité d'endommagement des cuves en fonction de niveaux de remplissage successifs des cuves pendant la période de transfert, la probabilité d'endommagement des cuves définissant une probabilité qu'au moins une cuve soit endommagée au cours du déroulement du scénario de transfert,
- générer une série d'instructions destinées à transférer le liquide entre les cuves en conformité avec ledit scénario de transfert si la probabilité d'endommagement des cuves satisfait un critère d'acceptation.

Selon un mode de réalisation, le système de gestion comporte en outre un moyen d'acquisition de données, par exemple un ou des capteurs ou encore un ou des moyens de saisie de données par un opérateur. Selon un mode de réalisation, le système de gestion comporte en outre un moyen d'affichage de données. Selon un mode de réalisation, les moyens du système de gestion pour effectuer les étapes indiquées ci-dessus sont ou comportent au moins un processeur et au moins une mémoire comportant un module logiciel intégré.

Un tel procédé ou système de gestion des niveaux de remplissage de cuves peut être installé dans une structure flottante, côtière ou en eau profonde, notamment un navire méthanier, une unité flottante de stockage et de regazéification (FSRU), une unité flottante de production et de stockage déporté (FPSO), une barge et autres.

Selon un mode de réalisation, l'invention fournit également un navire pour le transport d'un produit liquide froid comportant une double coque, une pluralité de cuves et le système de gestion précité.

15

Brève description des figures

L'invention sera mieux comprise, et d'autres buts, détails, caractéristiques et avantages de celle-ci apparaîtront plus clairement au cours de la description suivante de plusieurs modes de réalisation particuliers de l'invention, donnés uniquement à titre illustratif et non limitatif, en référence aux dessins annexés.

- La figure 1 est une représentation schématique en coupe longitudinale d'un navire comportant une pluralité de cuves dans un état de remplissage initial ;
- La figure 2 est un diagramme illustrant les différentes étapes du procédé de gestion des niveaux de remplissage des cuves permettant de passer de l'état de remplissage initial de la figure 1 à l'état de remplissage cible de la figure 3 ;
- La figure 3 est une représentation schématique en coupe longitudinale du navire de la figure 1 dans un état de remplissage cible des cuves;

25

30

- La figure 4 est une représentation schématique d'un système de gestion des niveaux de remplissage de cuves du navire de la figure 1 ;
- 5 • La figure 5 est une pluralité de graphique illustrant les transferts de liquide au cours du temps pour passer de l'état de remplissage initial de la figure 1 à l'état de remplissage cible de la figure 2 ;
- 10 • La figure 6 est une représentation schématique écorchée d'une cuve de navire méthanier comportant un système de gestion des niveaux de remplissage de cuves et d'un terminal de chargement/déchargement de cette cuve.

Description détaillée de modes de réalisation

Les figures sont décrites ci-après dans le cadre d'un navire 1 comportant une double coque formant une structure porteuse dans laquelle sont agencées une pluralité de cuves étanches et thermiquement isolantes. Une telle structure porteuse présente par exemple une géométrie polyédrique, par exemple de forme prismatique.

De telles cuves étanche et thermiquement isolante sont prévues par exemple pour le transport de gaz liquéfié. Le gaz liquéfié est stocké et transporté dans de telles cuves à une température basse ce qui nécessite des parois de cuve thermiquement isolantes afin de maintenir le gaz liquéfié à cette température. Il est donc particulièrement important de maintenir intacte l'intégrité des parois de cuves d'une part pour conserver l'étanchéité de la cuve et éviter les fuites de gaz liquéfié hors des cuves et, d'autre part, éviter les dégradations des caractéristiques isolantes de la cuve afin de maintenir le gaz sous sa forme liquéfié.

De telles cuves étanches et thermiquement isolantes comportent aussi une barrière isolante ancrée sur la double coque de navire et portant au moins une membrane étanche. A titre d'exemple, de telles cuves peuvent être réalisées selon les technologies de type Mark III®, tel que décrit par exemple dans FR2691520, de type NO96® tel que décrit par exemple dans FR2877638, ou autre tel que décrit par exemple dans WO14057221.

La figure 1 illustre un navire 1 comportant quatre cuves 2 étanches et thermiquement isolantes. Sur un tel navire 1, les cuves 2 sont connectées entre elles par un système de manutention de cargaison (non illustré) pouvant inclure de nombreux composants, par exemple des pompes, des vannes et des conduites de manière à permettre le transfert de liquide depuis l'une des cuves 2 vers une autre cuve 2.

Les quatre cuves 2 présentent sur la figure 1 un état de remplissage initial. Dans cet état initial, les cuves sont partiellement remplies. Une première cuve 3 est remplie à environ 60% de sa capacité. Une deuxième cuve 4 est remplie à environ 35% de sa capacité. Une troisième cuve 5 est remplie à environ 35% de sa capacité. Une quatrième cuve 6 est remplie à environ 40% de sa capacité.

Ce remplissage partiel des cuves 3, 4, 5, 6 peut engendrer des risques important d'endommagement desdites cuves 3, 4, 5, 6 lorsque le navire 1 navigue en mer. En effet, lorsqu'il est en mer, le navire 1 est sujet à de nombreux mouvements liés aux conditions de navigation. Ces mouvements du navire 1 se répercutent sur le liquide contenu dans les cuves 3, 4, 5, 6 qui, en conséquence, est sujet à des déplacements dans les cuves 3, 4, 5, 6. Ces mouvements du liquide dans les cuves 3, 4, 5, 6 génèrent des impacts sur les parois de cuves 3, 4, 5, 6 qui peuvent dégrader les parois de cuves 3, 4, 5, 6. Or il est important de conserver l'intégrité des parois de cuves 3, 4, 5, 6 pour conserver l'étanchéité et les caractéristiques d'isolation des cuves 3, 4, 5, 6.

Pour éviter les dégradations des cuves 3, 4, 5, 6, le navire comporte un système de gestion des niveaux de remplissage dont un mode de réalisation est illustré sur la figure 4 et dont le procédé de fonctionnement est illustré par la figure 2.

En regard de la figure 2, le système de gestion de niveaux de remplissage des cuves, ci-après le système de gestion, nécessite dans un premier temps de connaître l'état de remplissage initial des cuves 3, 4, 5, 6. Pour cela, les niveaux de remplissage initiaux des cuves 3, 4, 5, 6 sont fournis au système de gestion lors d'une première étape 7. Ces niveaux de remplissage initiaux peuvent être fournis manuellement par un opérateur au moyen d'une interface d'acquisition du système de gestion ou bien obtenue automatiquement par tout moyen adapté, par exemple au

moyen de capteurs de niveaux de remplissage de cuves 3, 4, 5, 6 (voir figure 4). Ces niveaux de remplissage sont par exemple définis en pourcentage de hauteur de liquide dans la cuve 3, 4, 5, 6.

Le système de gestion détermine lors d'une seconde étape 8 un état de remplissage cible des cuves 3, 4, 5, 6. Dans cet état de remplissage cible, le liquide transporté par le navire 1 est réparti entre les cuves 3, 4, 5, 6 de manière à limiter les risques liés aux mouvements du liquide dans les cuves 3, 4, 5, 6. Plus particulièrement, le système de gestion détermine un état de remplissage cible dans lequel l'ensemble du liquide transporté par le navire est réparti entre les différentes cuves de manière à limiter les risques liés aux mouvements de liquide dans les cuves. Typiquement, le système de gestion détermine un état de remplissage cible dans lequel le liquide transporté par le navire est réparti entre les cuves 3, 4, 5, 6 de sorte que les cuves soient remplies à plus de 70% ou au contraire à moins de 10%.

La figure 3 illustre le navire de la figure 1 dans un tel état de remplissage cible des cuves 3, 4, 5, 6 permettant de limiter les risques liés aux mouvements de liquide dans lesdites cuves 3, 4, 5, 6. Ainsi, sur la figure 3, la première cuve 3 est remplie à 95%, la deuxième cuve 4 et la troisième cuve 5 sont remplies à 5% et la quatrième cuve 6 est remplie à 95%.

L'espace non occupé par le liquide contenu dans les cuves 3, 6 est donc réduit. Cet espace résiduel réduit limite les mouvements dudit liquide dans lesdites cuves 3, 6 et donc la force des impacts liés auxdits mouvements dudit liquide. Ainsi, la première cuve 3 et la quatrième cuve 6 présentent un risque de dégradation lié aux mouvements de liquide limité.

Inversement, la deuxième cuve 4 et la troisième cuve 5 présentent un risque de dégradation lié aux mouvements de liquide limité du fait que le liquide contenu dans lesdites deuxième et troisième cuves 4, 6 présente un poids insuffisant pour générer des impacts importants sur les parois desdites cuve 4, 5.

Le système de gestion calcule ensuite (étape 9) une pluralité de scénarios de transfert permettant de passer de l'état de remplissage initial à l'état de remplissage cible.

Ces scénarios de transfert sont calculés à partir des niveaux de remplissage initiaux dans les cuves 3, 4, 5, 6 et des caractéristiques du navire 1. En particulier, les caractéristiques du navire 1 prises en compte pour le calcul des scénarios de transfert comporte au moins l'un des paramètres parmi le nombre de pompes dans les cuves 3, 4, 5, 6, les capacités de pompage des pompes, le volume des cuves 3, 4, 5, 6, les diamètres des conduites reliant les cuves 3, 4, 5, 6 entre elles. Le système de gestion calcule à partir de ces données toutes les possibilités de transfert cuve à cuve ce qui donne une liste de scénarios de transfert cuve à cuve pour atteindre les niveaux de remplissage cible depuis les niveaux de remplissage initiaux.

10 Chaque scénario de transfert définit une pluralité de phases de transferts entre les cuves 3, 4, 5, 6. Plus particulièrement, chaque phase de transfert définit, pour chaque cuve 3, 4, 5, 6 et en fonction des capacités de transfert de liquide entre les différentes cuves 3, 4, 5, 6, un ou plusieurs flux de liquide à transvaser entre les cuves 3, 4, 5, 6. Le système de gestion définit pour chaque phase de transfert un
15 niveau de remplissage de début de phase, un niveau de remplissage de fin de phase ainsi qu'une durée de transfert nécessaire pour passer du niveau de remplissage de début de phase au niveau de remplissage de fin de phase. Ces phases de transfert successives permettent de passer de l'état de remplissage initial à l'état de remplissage cible.

20 Cependant, ces phases de transfert nécessitent de transvaser une quantité importante de liquide entre les cuves 3, 4, 5, 6. Or, un tel transfert peut nécessiter une durée importante durant laquelle les cuves 3, 4, 5, 6 peuvent demeurer sujettes à des risques importants liés aux mouvements de liquide. En conséquence, après avoir calculé les différents scénarios lors de l'étape 9, le système de gestion calcule
25 (étape 10) pour chaque scénario les risques de dégradation des cuves 3, 4, 5, 6 au cours du déroulement dudit scénario de transfert.

Autrement dit, pour chaque scénario de transfert, le système de gestion calcule également une probabilité d'endommagement des cuves 3, 4, 5, 6 au cours dudit scénario de transfert.

30 Cette probabilité d'endommagement des cuves 3, 4, 5, 6 est calculée en fonction de nombreux paramètres. Plusieurs grandeurs doivent être estimées par

calcul statistique ou physique, par mesures en temps réel, embarquées ou en essais afin de calculer ces probabilités d'endommagement des cuves 3, 4, 5, 6.

Les paramètres pouvant être pris en compte pour le calcul d'endommagement des cuves 3, 4, 5, 6 peuvent comporter des paramètres de
5 mouvements du navire 1, des paramètres de conditions environnementales du navire 1, des paramètres structurels du navire 1 ou encore des paramètres liés au liquide contenu dans les cuves 3, 4, 5, 6.

Les paramètres de mouvements du navire sont par exemples des paramètres de mouvements du navire selon les six degrés de liberté du navire
10 (cavalement, embardé, pilonnement, roulis, tangage, lacet) qui peuvent être représenté sous forme de mouvement, de vitesse, d'accélération temporelle ou spectrale. Ces paramètres de mouvements du navire peuvent également comporter la route du navire en termes de cap, de vitesse et de position GPS.

Les paramètres de conditions environnementales sont principalement liés à
15 la météo. Ces paramètres de conditions environnementales comportent par exemples la hauteur de la mer du vent, la hauteur de la houle, la période de la mer du vent, la période de la houle, la direction de la mer du vent, la direction de la houle, la force du vent, la direction du vent, la force du courant, la direction du courant, la direction relative du vent, de la houle, du courant, de la mer du vent par rapport au navire.

20 Les paramètres structurels du navire 1 comportent par exemple la résistance des parois des cuves 3, 4, 5, 6 en fonction de la position sur la cuve, la résistance du système d'isolation des cuves 3, 4, 5, 6 en fonction de la position sur la cuve ou encore le comportement statistique des impacts des mouvements de liquide.

Les paramètres liés au liquide contenu dans les cuves 3, 4, 5, 6 sont, par
25 exemples, les niveaux (force, pression, amplitude, fréquence, surface) des impacts de liquide sur les parois des cuves 3, 4, 5, 6, le temps passé dans différents niveaux de remplissage des cuves 3, 4, 5, 6, le niveau d'évaporation de gaz liquéfié induit par le transfert de liquide, l'état de chargement de la structure du navire 1.

Ainsi, le système de gestion calcule pour chaque scénario le temps total de
30 l'opération pour passer de l'état de remplissage initial à l'état de remplissage final et le risque d'endommagement des parois de cuves 3, 4, 5, 6 au cours de ladite

opération. Ce risque d'endommagement de l'isolation est calculé selon la fonction suivante :

$$Risk_{ope} = \prod_{tk_n} \int_0^{surf} \int_0^{t_{ope}} prob_{tk_n}(Pres_{surf} > Res_{surf}, tk_n, SC(fl_n)). dsurf . dt$$

- 5 dans laquelle tk_n représente le numéro de la cuve n,
- SC représente les conditions de navigation en fonction du niveau de remplissage fl_n de la cuve tk_n,
- Prob_{tk_n} représente la densité de probabilité de rencontrer une pression Pres_{surf} sur une surface interne de la cuve tk_n supérieure à la résistance
- 10 Res_{surf} de ladite surface interne de la cuve tk_n en fonction des conditions de navigation SC(fl_n),
- surf est la surface interne impactée par le liquide, et
- t_{ope} est la durée d'opération pour passer de l'état initial à l'état cible.
- Les conditions de navigations SC peuvent dépendre en outre d'au moins un
- 15 paramètre parmi :
- l'angle d'incidence entre l'état de mer et le navire
 - la période de l'état de mer
 - la hauteur significative de l'état de mer
 - les mouvements du navire

20 - la vitesse d'avance du navire.

Il est à noter qu'un état de mer peut être décomposé en mer de vent et houle, voire même houle croisée. Ainsi un état de mer peut être défini avec plusieurs composantes.

- Les lois Prob_{tk} sont des lois statistiques par exemple de type GEV, Weibull,
- 25 Pareto, Gumbel. Un, plusieurs ou l'ensemble des paramètres de ces lois sont par exemple définis à partir d'essais de mouvement liquide en laboratoire ou de campagnes de mesures embarquées à la mer.

Le système de gestion fournit ainsi une liste de scénarios de transfert (étape 11) et différentes informations liées auxdits scénarios de transferts calculé. En outre,

les scénarios sont de préférence classés selon le critère d'acceptation, par exemple du scénario le plus risqué au scénario le moins risqué en termes d'endommagement des cuves 3, 4, 5, 6.

Un scénario est ensuite sélectionné (étape 12) en fonction du critère
5 d'acceptation.

De préférence, chaque scénario est fourni sous la forme d'un ensemble de signaux de commande et/ou d'instructions permettant de mettre en œuvre les différentes phases de transfert dudit scénario de transfert. Par exemple, le scénario peut comporter une série d'instructions fournie sous un format lisible par l'être humain
10 et pouvant guider de manière précise un opérateur tout au long de la période de transfert pour exécuter le scénario de transfert.

Selon un mode de réalisation, le scénario peut être fourni sous la forme d'une série d'instructions sous un format lisible par un ordinateur et/ou d'une série de signaux de commande destinés à piloter les organes du système de manutention de
15 la cargaison, par exemple actionner les pompes du navire, commuter les vannes etc., pour exécuter le scénario de transfert.

Le critère d'acceptation peut prendre de nombreuses formes. Ce critère d'acceptation peut être prédéfini ou choisi par l'opérateur. Par exemple, ce critère d'acceptation peut être, qu'il soit prédéfini ou choisi par l'opérateur, le risque
20 d'endommagement des cuves 3, 4, 5, 6, l'autonomie de navigation disponible après les transferts, le temps total de déroulement du scénario de transfert ou autre.

Le scénario de transfert sélectionné répondant au critère d'acceptation est alors mis en œuvre (étape 13) pour passer de l'état de remplissage initial à l'état de remplissage cible.

25 Comme indiqué ci-dessus, les différentes grandeurs correspondant aux paramètres nécessaires aux calculs de scénarios (étape 9) et aux calculs de probabilités d'endommagement (étape 10) peuvent être obtenues ou estimées par calcul statistique ou physique, par mesures en temps réel, embarquées ou en essais.

La figure 4 illustre un exemple de structure de système de gestion 14. Ce
30 système de gestion 14 comporte une unité centrale 15. Cette unité centrale 15 est configurée pour réaliser les différents calculs de scénarios de transferts et de

probabilités d'endommagement des cuves 3, 4, 5, 6 (étapes 9 et 10). Cette unité centrale 15 est connectée à une pluralité de capteurs 16 embarqués permettant d'obtenir les différentes grandeurs indiquées ci-dessus. Ainsi, les capteurs 16 comportent, par exemples et de manière non exhaustive, un capteur de débit des pompes 17, un capteur de niveau de remplissage de chaque cuve 18, différents capteurs 19 (accéléromètre, jauge de contrainte, jauge de déformation, son, lumière) permettant à l'unité centrale 15 via un algorithme dédié de détecter les impacts liés aux mouvements du liquide dans les cuves 3, 4, 5, 6, etc.

Le système de gestion 14 comporte en outre une interface homme-machine 20. Cette interface homme machine 20 comporte un moyen d'affichage 21. Ce moyen d'affichage 21 permet à l'opérateur d'obtenir les différentes informations. Ces informations sont par exemples des informations sur les différents scénarios de transfert, les instructions pour mettre en œuvre lesdits scénarios de transfert, les grandeurs obtenues par les capteurs 16 telles que l'intensité des mouvements de liquide dans les cuves, des informations sur les impacts liés à ces mouvements de liquide, les mouvements du navire, l'état de chargement du navire ou encore des informations météorologiques.

L'interface homme-machine 24 comporte en outre un moyen d'acquisition 22 permettant à l'opérateur de fournir manuellement des grandeurs à l'unité centrale 15, typiquement pour fournir à l'unité centrale 15 des données ne pouvant pas être obtenues par des capteurs car le navire ne comporte pas le capteur nécessaire ou que ce dernier est endommagé. Par exemple, dans un mode de réalisation, le moyen d'acquisition permet à l'opérateur d'entrer des informations sur le nombre de pompes et sur la hauteur maximale des vagues.

Le système de gestion 14 comporte une base de données 23. Cette base de données 23 comporte par exemple certaines grandeurs obtenues en laboratoire ou lors de campagnes de mesures embarquées en mer.

Le système de gestion 14 comporte également une interface de communication 24 permettant à l'unité centrale 15 de communiquer avec des dispositifs distants par exemple pour obtenir des données météorologiques, des données de position du navire ou autre.

La figure 5 représente des graphiques illustrant les niveaux de remplissage des cuves 3, 4, 5, 6 au cours du temps. Ainsi, un premier graphique 25 illustre le niveau de remplissage 26 de la première cuve 3 au cours du temps. Un deuxième graphique 27 illustre le niveau de remplissage 28 de la deuxième cuve 4 au cours du temps. Un troisième graphique 29 illustre le niveau de remplissage 30 de la troisième cuve 5 au cours du temps. Un quatrième graphique 31 illustre le niveau de remplissage 32 de la quatrième cuve 6 au cours du temps.

Lors d'une première phase 33 du scénario de transfert sélectionné, les vannes du navire 1 sont configurées pour connecter la première cuve 3 et la deuxième cuve 4 et pour connecter la troisième cuve 5 et la quatrième cuve 6. En outre, les pompes des cuves 3, 4, 5, 6 sont configurées pour transférer le liquide contenu dans la deuxième cuve 4 vers la première cuve 3 et pour transférer le liquide contenu dans la troisième cuve 5 vers la quatrième cuve 6.

Le premier graphique 25 et le deuxième graphique 27 montrent que la première cuve 3 reçoit du liquide de la deuxième cuve 4 au cours de cette première phase 33 du scénario de transfert. Ainsi, le premier graphique 25 illustre que le niveau de remplissage 26 de la première cuve 3 passe d'un niveau de remplissage initial de 60% à un niveau de remplissage cible de 95% au cours de la première phase 33. De même, le deuxième graphique 27 illustre que la deuxième cuve 4 est vidée de manière à passer d'un niveau de remplissage initial de 35% à un niveau de remplissage de fin de première phase de 20%.

Durant cette première phase 33, le liquide contenu dans la troisième cuve 5 est transvasé vers la quatrième cuve 6. Ainsi, le niveau de remplissage 30 de la troisième cuve 5 passe d'un niveau de remplissage initial de 35% à un niveau de remplissage de fin de première phase de 20% et le niveau de remplissage 32 de la quatrième cuve 6 passe de 40% à un niveau de remplissage de fin de première phase 60%.

Durant une deuxième phase 34 du scénario de transfert, les vannes du navire 1 sont commutées pour connecter la deuxième cuve 4 à la quatrième cuve 6. Cette commutation des vannes nécessite de nombreuses manœuvres de manutention et demande donc un certain temps. Pendant ces manœuvres de

manutention, le liquide contenu dans la troisième cuve 5 continue d'être transféré vers la quatrième cuve 6, la troisième cuve 5 présentant un niveau de remplissage de fin de deuxième phase de 10% et la quatrième cuve 6 présentant un niveau de remplissage de fin de deuxième phase de 70%.

5 Du fait que les conduites reliées à la quatrième cuve 6 et les pompes de la quatrième cuve 6 ne permettent pas d'absorber un débit de liquide provenant simultanément depuis la troisième cuve 5 et depuis la deuxième cuve 4, seule la deuxième cuve 4 connectée à la quatrième cuve 6 est vidée pour continuer de remplir la quatrième cuve 6 lors d'une troisième phase 35 du scénario de transfert.

10 En effet, au début de la troisième phase 35, correspondant à la fin des manœuvres de manutention pour connecter la deuxième cuve 4 à la quatrième cuve 6, la deuxième cuve 4 est encore remplie de 20% alors que la troisième cuve 5 ne présente plus qu'un niveau de remplissage de 10%. Il est donc préférable de vider avant tout la deuxième cuve 4 dont le niveau de remplissage présente un risque plus
15 élevé que celui de la troisième cuve 5. Ainsi, lors de la troisième phase 35 du scénario de transfert, seul le liquide contenu dans la deuxième cuve 4 est transféré dans la quatrième cuve 6. La deuxième cuve 4 présente ainsi un niveau de remplissage de début de troisième phase de 20 % et un niveau de remplissage de fin de troisième phase de 5% environ.

20 Dès lors que la deuxième cuve est sensiblement vide, les conduites et les pompes du navire sont commutées pour transvaser le liquide contenu dans la troisième cuve 5 vers la quatrième cuve 6. Ainsi, dans une quatrième phase 36 du scénario de transfert, le liquide non encore transféré contenu dans la troisième cuve 5 est transféré vers la quatrième cuve 6 de sorte que le niveau de remplissage final
25 de la troisième cuve 5 soit de l'ordre de 5% et que le niveau de remplissage cible de la quatrième cuve 6 soit de l'ordre de 95%.

Les commutations des vannes et l'activation des pompes permettant les transferts entre les cuves peuvent être manuelles et/ou automatisées. Dans le cas d'opérations manuelles, l'interface homme machine 20 fournit à l'opérateur une suite
30 d'instructions permettant la mise en œuvre du scénario de transfert. Le système de gestion 14 prend en compte dans ses calculs (étapes 9 et 10) une durée correspondant à ces opérations.

De préférence, le système de gestion 14 contrôle en temps réel le déroulement du scénario sélectionné (étape 37 figure 2). En cas de divergence entre l'état réel des niveaux de remplissages 26, 28, 30, 32 prévus selon le scénario sélectionné et les niveaux de remplissage réels, des avertissements temps réels ou anticipés sont envoyés à l'utilisateur afin de l'avertir de ces divergences (étape 38, figure 2). De telles avertissements peuvent également être envoyés à l'opérateur si les conditions météo, les mouvements de liquide dans les cuves constatés, les mouvements du navire ou autre évoluent de façon différente de sorte qu'ils pourraient engendrer des différences dans l'évolution du scénario de transfert.

10 Si une divergence est constatée entre le scénario de transfert sélectionné et l'état réel au cours du temps des cuves 3, 4, 5, 6, par exemple du fait que le débit de pompage réel de certaines pompes était surestimé lors du calcul des scénarios de transfert (étape 9), le système de gestion 14 peut relancer le procédé de calcul illustré sur la figure 2 afin d'appliquer ou de proposer à l'opérateur de nouveaux scénarios de transferts. De préférence, ce nouveau calcul des scénarios est réalisé en prenant
15 en compte les données relevées pertinentes ayant conduit à cette divergence, par exemple le débit réel constaté des pompes. En outre, dans un mode de réalisation, ce nouveau calcul des scénarios est exécuté en sélectionnant directement le même état de remplissage cible que l'état de remplissage cible déterminé lors de la première
20 itération dudit calcul. Autrement dit, le calcul illustré sur la figure 2 est répété directement à partir de l'étape de calcul des scénarios.

La technique décrite ci-dessus pour gérer les niveaux de remplissage des cuves peut être utilisée dans différents types de réservoirs, par exemple pour un réservoir de GNL dans un ouvrage flottant comme un navire méthanier ou autre.

25 En référence à la figure 6, une vue écorchée d'un navire méthanier 70 montre une cuve étanche et isolée 71 de forme générale prismatique montée dans la double coque 72 du navire. La paroi de la cuve 71 comporte une barrière étanche primaire destinée à être en contact avec le GNL contenu dans la cuve, une barrière étanche secondaire agencée entre la barrière étanche primaire et la double coque 72
30 du navire, et deux barrières isolante agencées respectivement entre la barrière étanche primaire et la barrière étanche secondaire et entre la barrière étanche secondaire et la double coque 72.

De manière connue en soi, des canalisations de chargement/déchargement 73 disposées sur le pont supérieur du navire peuvent être raccordées, au moyen de connecteurs appropriés, à un terminal maritime ou portuaire pour transférer une cargaison de GNL depuis ou vers la cuve 71.

5 La figure 6 représente un exemple de terminal maritime comportant un poste de chargement et de déchargement 75, une conduite sous-marine 76 et une installation à terre 77. Le poste de chargement et de déchargement 75 est une installation fixe off-shore comportant un bras mobile 74 et une tour 78 qui supporte le bras mobile 74. Le bras mobile 74 porte un faisceau de tuyaux flexibles isolés 79
10 pouvant se connecter aux canalisations de chargement/déchargement 73. Le bras mobile 74 orientable s'adapte à tous les gabarits de méthaniers. Une conduite de liaison non représentée s'étend à l'intérieur de la tour 78. Le poste de chargement et de déchargement 75 permet le chargement et le déchargement du méthanier 70 depuis ou vers l'installation à terre 77. Celle-ci comporte des cuves de stockage de
15 gaz liquéfié 80 et des conduites de liaison 81 reliées par la conduite sous-marine 76 au poste de chargement ou de déchargement 75. La conduite sous-marine 76 permet le transfert du gaz liquéfié entre le poste de chargement ou de déchargement 75 et l'installation à terre 77 sur une grande distance, par exemple 5 km, ce qui permet de garder le navire méthanier 70 à grande distance de la côte pendant les opérations de
20 chargement et de déchargement.

Pour engendrer la pression nécessaire au transfert du gaz liquéfié, on met en œuvre des pompes embarquées dans le navire 70 et/ou des pompes équipant l'installation à terre 77 et/ou des pompes équipant le poste de chargement et de déchargement 75.

25 Bien que l'invention ait été décrite en liaison avec plusieurs modes de réalisation particuliers, il est bien évident qu'elle n'y est nullement limitée et qu'elle comprend tous les équivalents techniques des moyens décrits ainsi que leurs combinaisons si celles-ci entrent dans le cadre de l'invention.

Certains des éléments, notamment les composants du système de gestion,
30 peuvent être réalisés sous différentes formes, de manière unitaire ou distribuée, au moyen de composants matériels et/ou logiciels. Des composants matériels utilisables

sont les circuits intégrés spécifiques ASIC, les réseaux logiques programmables FPGA ou les microprocesseurs. Des composants logiciels peuvent être écrits dans différents langages de programmation, par exemple C, C++, Java ou VHDL. Cette liste n'est pas exhaustive.

- 5 L'usage du verbe « comporter », « comprendre » ou « inclure » et de ses formes conjuguées n'exclut pas la présence d'autres éléments ou d'autres étapes que ceux énoncés dans une revendication. L'usage de l'article indéfini « un » ou « une » pour un élément ou une étape n'exclut pas, sauf mention contraire, la présence d'une pluralité de tels éléments ou étapes. Notamment, l'usage de l'article
- 10 indéfini « un » concernant l'étape de déterminer un état cible définissant des niveaux de remplissage finaux des cuves n'exclut pas de déterminer plusieurs états cibles définissant chacun des niveaux de remplissage finaux des cuves.

Dans les revendications, tout signe de référence entre parenthèses ne saurait être interprété comme une limitation de la revendication.