

Description

Titre de l'invention : Procédé et dispositif d'estimation d'une probabilité d'un endommagement dû au ballottement d'un chargement liquide pendant une opération de transfert dudit chargement liquide entre deux ouvrages flottants

Domaine technique

[0001] L'invention concerne des opérations de transfert d'un chargement liquide entre deux ouvrages flottants. Plus particulièrement, l'invention se rapporte à un procédé et à un dispositif d'estimation d'une probabilité d'un endommagement dû au ballottement d'un chargement liquide pendant une opération de transfert dudit chargement liquide depuis un premier ouvrage flottant vers un deuxième ouvrage flottant.

Arrière-plan technologique

[0002] Dans le domaine des ouvrages flottants aptes à transporter un chargement liquide, il est connu de procéder à des opérations de transfert du chargement liquide depuis un premier ouvrage flottant, tel qu'un navire transporteur de liquide, vers un deuxième ouvrage flottant.

[0003] De telles opérations de transfert d'un chargement liquide sont notamment couramment mises en œuvre pour des cargaisons de gaz naturel liquéfié (GNL ou LNG pour « Liquefied Natural Gas » en anglais). Pour de telles cargaisons, de façon connue, un navire transporteur de GNL, tel qu'un méthanier (aussi connu sous le sigle LNGC pour « LNG Carrier » en anglais), peut se rapprocher d'une unité flottante de stockage et de regazéification de gaz naturel liquéfié (aussi connue sous le sigle FSRU pour « Floating Storage and Regasification Unit » en anglais). La FSRU est par exemple située au large et amarrée à une bouée sous-marine ou à un système d'amarrage à tourelle permettant à la structure de s'orienter librement au gré des contraintes qui lui sont appliquées (vagues, vent, courant...). Le LNGC s'amarre ensuite à la FSRU, et des conduites flexibles sont installées entre le LNGC et la FSRU de façon à transférer le GNL entre le LNGC et la FSRU. Une telle opération de transfert de GNL est connue en tant que telle, sous le sigle STS pour « Ship-to-Ship Transfer ». Elle peut aussi s'effectuer entre un LNGC et une autre installation flottante, telle qu'une unité flottante de production de gaz naturel liquéfié (aussi connue sous le sigle FLNG pour « Floating Liquid Natural Gas » en anglais).

[0004] Toutefois, pendant une opération de ce type, les cuves du LNGC et de la FSRU destinées à contenir le GNL sont partiellement remplies. Il est connu que dans une telle situation, le GNL contenu dans les cuves est agité sous l'effet des vagues. L'agitation

du liquide, généralement désignée sous le terme anglais de « sloshing » ou ballottement, 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 destinée à contenir du GNL, de par la nature inflammable ou explosive du liquide transporté et le risque de point froid sur la coque en acier de l'ouvrage flottant.

[0005] En outre, une opération de ce type est susceptible de prendre un temps important, de l'ordre de plusieurs dizaines d'heures lorsqu'elle implique un LNGC et une FSRU de grande capacité ou une unité flottante de production de gaz naturel liquéfié (FLNG). Or, plus le temps nécessaire à l'opération est important, plus des conditions climatiques susceptibles de provoquer un ballottement du GNL dans les cuves risquent de se produire.

[0006] Au vu de ce qui précède, il serait utile de pouvoir disposer de procédés et de systèmes aidant à limiter voire supprimer le risque d'endommagement des cuves dû au ballottement.

Résumé

[0007] Une idée à la base de l'invention est de tirer parti de prévisions météorologiques et océanographiques relatives à la position géographique de l'opération de transfert de chargement liquide, pour une durée prévue de ladite opération de transfert, pour estimer une probabilité d'endommagement d'au moins une cuve d'au moins un des ouvrages flottants impliqués dans l'opération de transfert. Une autre idée à la base de l'invention est de fournir à un utilisateur une indication en fonction de la probabilité d'endommagement ainsi estimée.

[0008] Selon un mode d'exécution conforme à une première variante, l'invention fournit un procédé d'estimation d'une probabilité d'un endommagement dû au ballottement d'un chargement liquide pendant une opération de transfert dudit chargement liquide depuis un premier ouvrage flottant vers un deuxième ouvrage flottant, le premier ouvrage flottant et le deuxième ouvrage flottant étant associés l'un à l'autre pendant ladite opération de transfert de telle sorte que le premier ouvrage flottant et le deuxième ouvrage flottant soient orientés selon un cap commun, ledit procédé comprenant :

- obtenir une position géographique prévue de ladite opération de transfert ;
- obtenir des prévisions météorologiques et océanographiques relatives à ladite position géographique pour une pluralité de périodes de temps, lesdites périodes de temps couvrant ensemble une durée prévue de ladite opération de transfert, lesdites prévisions comprenant, pour chaque période de temps, un état de la houle, dans lequel l'état de la houle comprend une direction de la houle, une hauteur significative de la houle et une période de la houle ;
- pour chaque période de temps : obtenir le cap commun du premier et du deuxième

ouvrages flottants ; déterminer au moins un niveau de remplissage prévisionnel d'au moins une cuve d'au moins un desdits premier et deuxième ouvrages flottants destinée à contenir la totalité ou une partie dudit chargement liquide ; déterminer un angle d'incidence de houle, lequel est un angle entre ledit cap commun des premier et deuxième ouvrages flottants et la direction de la houle ; et estimer au moins une probabilité d'endommagement de ladite au moins une cuve en fonction de l'angle d'incidence de houle ainsi déterminé, de la hauteur significative de la houle, de la période de la houle et du niveau de remplissage prévisionnel de ladite cuve ; et
- fournir à un utilisateur une indication en fonction de ladite au moins une probabilité d'endommagement ainsi estimée.

- [0009] Grâce à un tel procédé, un utilisateur tel qu'un membre d'équipage peut entreprendre toute mesure nécessaire pour limiter le risque d'endommagement des cuves du ou des ouvrages flottants, comme par exemple modifier le cap commun aux deux ouvrages flottants et/ou en modifier un paramètre de l'opération de transfert, par exemple un débit de transfert de chargement liquide et/ou un niveau de remplissage de la ou des cuves (entre les cuves d'un même ouvrage flottant et/ou entre les cuves des deux ouvrages flottants).
- [0010] Selon des modes de réalisation, un tel procédé peut comporter une ou plusieurs des caractéristiques suivantes.
- [0011] Selon un mode de réalisation, la période de la houle est une période de pic de la houle, c'est-à-dire une période de temps entre le passage de deux pics successifs de la houle. Selon un mode de réalisation, la période de la houle est une période moyenne de la houle, c'est-à-dire une période de temps entre trois passages successifs de la houle à la hauteur moyenne de la mer ; cette période moyenne est couramment notée T_z .
- [0012] Le niveau de remplissage prévisionnel de la cuve peut être estimé de diverses manières. Selon un mode de réalisation, ledit au moins un niveau de remplissage prévisionnel est déterminé à partir d'un scénario de transfert du chargement liquide, le scénario de transfert du chargement liquide définissant une évolution du niveau de remplissage de ladite cuve en fonction du temps.
- [0013] Un tel scénario de transfert du chargement liquide peut notamment être saisi par l'utilisateur au début de l'opération de transfert.
- [0014] Selon un mode de réalisation, pour chaque période de temps, deux niveaux de remplissage prévisionnel de ladite cuve sont déterminés, les deux niveaux de remplissage prévisionnel incluant un niveau bas de remplissage prévisionnel et un niveau haut de remplissage prévisionnel, et une probabilité d'endommagement de ladite cuve est estimée pour chacun des deux niveaux de remplissage prévisionnel.
- [0015] De cette manière, l'estimation de la probabilité d'endommagement peut tenir compte du fait que le ballonnement du chargement liquide est différent suivant le niveau de

remplissage de la cuve.

- [0016] Selon un mode de réalisation, le niveau bas de remplissage prévisionnel et le niveau haut de remplissage prévisionnel sont déterminés à l'avance lors d'une étape préalable consistant à rechercher, par exemple par simulation et/ou par essais expérimentaux, deux niveaux de remplissage de la cuve qui sont les plus susceptibles d'amener un risque d'endommagement de la cuve dû au ballottement.
- [0017] La probabilité d'endommagement peut être estimée de diverses manières. Selon un mode de réalisation, la probabilité d'endommagement est estimée par consultation d'une base de données préalablement établie pour ladite cuve, ladite base de données comportant des données relatives au ballottement en fonction d'un angle d'incidence de la houle, d'une hauteur significative de la houle, de la période de la houle et d'un niveau de remplissage courant de ladite cuve,
- les données relatives au ballottement étant déterminées par des mesures expérimentales, et
- la probabilité d'endommagement étant relative à une densité de probabilité de rencontrer une pression sur une surface interne de la cuve supérieure à une résistance interne de la cuve en fonction de l'angle d'incidence de la houle, de la hauteur significative de la houle, de la période de la houle et du niveau de remplissage courant de ladite cuve.
- [0018] Selon un mode de réalisation, ladite indication comprend une information représentative de la probabilité d'endommagement estimée en fonction desdites périodes de temps. En particulier, selon un mode de réalisation, ladite indication comprend une indication visuelle de la probabilité d'endommagement estimée en fonction desdites périodes de temps.
- [0019] Selon un mode de réalisation, le premier ouvrage flottant et le deuxième ouvrage flottant sont ancrés à un point d'ancrage pendant ladite opération de transfert.
- [0020] Selon un mode de réalisation, lesdites prévisions comprennent en outre un état de mer du vent, l'état de mer du vent comprenant une hauteur significative de mer du vent et/ou une période de mer du vent et/ou une direction de mer du vent.
- [0021] Selon un mode de réalisation, la période de mer du vent est une période de pic de mer du vent, c'est-à-dire une période de temps entre le passage de deux pics successifs de la mer du vent. Selon un mode de réalisation, la période de la houle est une période moyenne de la mer du vent, c'est-à-dire une période de temps entre trois passages successifs de la mer du vent à la hauteur moyenne de la mer ; cette période moyenne est couramment notée T_z .
- [0022] Selon un mode de réalisation, la probabilité d'endommagement de ladite au moins une cuve est en outre estimée en fonction de l'état de mer du vent.
- [0023] Le cap commun du premier et du deuxième ouvrages flottants peut simplement être

fourni à l'avance pour chaque période de temps, par exemple par l'utilisateur. En alternative, selon un mode de réalisation, pour chaque période de temps, ledit cap commun des deux ouvrages flottants est obtenu en :

- calculant, pour une pluralité de caps théoriques, une résultante des forces subies par les premier et deuxième ouvrages flottants en fonction de l'état de la houle et un moment par rapport au point d'ancrage de ladite résultante ;
- sélectionnant, parmi la dite pluralité de caps théoriques, un cap commun qui minimise la valeur absolue du moment par rapport au point d'ancrage de ladite résultante.

[0024] Selon un mode de réalisation, la résultante des forces subies par les premier et deuxième ouvrages flottants est en outre calculée en fonction de l'état de mer du vent.

[0025] Selon un mode de réalisation, lesdites prévisions comprennent en outre un état du vent, l'état du vent comprenant une vitesse du vent et/ou une direction du vent, et la résultante des forces subies par les premier et deuxième ouvrages flottants est en outre calculée en fonction de l'état du vent.

[0026] Selon un mode de réalisation, lesdites prévisions comprennent en outre un état du courant, l'état du courant comprenant une vitesse du courant et/ou une direction du courant, et la résultante des forces subies par les premier et deuxième ouvrages flottants est en outre calculée en fonction de l'état du courant.

[0027] Selon un mode de réalisation, ladite indication comprend une information représentative de la probabilité d'endommagement estimée en fonction de ladite pluralité de caps théoriques.

[0028] Selon un mode de réalisation, le procédé comprend en outre une étape d'aide à la décision destinée à réduire la probabilité d'endommagement estimée.

[0029] Selon un mode de réalisation, l'étape d'aide à la décision comprend le fait de fournir à l'utilisateur :

- une proposition de changement du cap commun, et/ou
- une proposition de modification d'au moins un paramètre de l'opération de transfert.

[0030] Selon un mode de réalisation, la proposition de modification d'au moins un paramètre de l'opération de transfert comprend une proposition de modification d'un débit de transfert de chargement liquide et/ou d'un niveau de remplissage de la ou des cuves (entre les cuves d'un même ouvrage flottant et/ou entre les cuves des deux ouvrages flottants).

[0031] Ainsi, l'utilisateur est mis en capacité de prendre les mesures nécessaires, sur la base de ces propositions, afin réduire le risque d'endommagement des cuves.

[0032] Le procédé est applicable à des ouvrages flottants transportant tout type de chargement liquide. Il trouve toutefois une application particulière à des ouvrages

flottants transportant un chargement d'un produit liquide froid.

- [0033] Selon un mode de réalisation, le chargement liquide est un chargement de gaz liquéfié, en particulier un chargement de gaz de pétrole liquéfié (GPL) ou un chargement de gaz naturel liquéfié (GNL).
- [0034] Selon un mode de réalisation, la au moins une cuve est une cuve étanche et/ou thermiquement isolante.
- [0035] Selon un mode de réalisation, le premier ouvrage flottant est un navire transporteur de gaz naturel liquéfié (LNGC), et le deuxième ouvrage flottant est une unité flottante de stockage et de regazéification (FSRU) de gaz naturel liquéfié ou une unité flottante de production de gaz naturel liquéfié (FLNG).
- [0036] Selon un mode de réalisation, l'invention fournit également un dispositif d'estimation d'une probabilité d'un endommagement dû au ballotement d'un chargement liquide pendant une opération de transfert dudit chargement liquide depuis un premier ouvrage flottant vers un deuxième ouvrage flottant, le premier ouvrage flottant et le deuxième ouvrage flottant étant associés l'un à l'autre pendant ladite opération de transfert de telle sorte que le premier ouvrage flottant et le deuxième ouvrage flottant soient orientés selon un cap commun, le dispositif comprenant un processeur configuré pour mettre en œuvre le procédé selon n'importe lequel des modes de réalisation décrits ci-dessus.
- [0037] Un tel dispositif présente les mêmes avantages que ceux décrits ci-dessus en rapport avec le procédé.
- [0038] Selon un mode de réalisation, l'invention fournit également un ouvrage flottant comprenant un dispositif tel que décrit ci-dessus.
- [0039] Les principes décrits ci-dessus sont également applicables à un ouvrage flottant transportant un chargement liquide et ancré à un point d'ancrage. En effet, le chargement liquide d'un tel ouvrage flottant est lui aussi susceptible d'être agité sous l'effet des vagues, ce qui peut aussi conduire à un phénomène de ballotement qui est susceptible de nuire à l'intégrité de la ou des cuves contenant le chargement liquide.
- [0040] Ainsi, selon un mode d'exécution conforme à une deuxième variante, l'invention fournit un procédé d'estimation d'une probabilité d'un endommagement dû au ballotement d'un chargement liquide d'un ouvrage flottant, l'ouvrage flottant étant amarré à un point d'ancrage par rapport au fond marin tout en étant libre de pivoter autour dudit point d'ancrage, ledit procédé comprenant :
- obtenir une position géographique de l'ouvrage flottant amarré au point d'ancrage ;
 - obtenir des prévisions météorologiques et océanographiques relatives à ladite position géographique pour une pluralité de périodes de temps, lesdites prévisions comprenant, pour chaque période de temps, un état de la houle, dans lequel l'état de la houle comprend une direction de la houle, une hauteur significative de la houle et une

période de la houle ;

- pour chaque période de temps : obtenir un cap de l'ouvrage flottant ; déterminer au moins un niveau de remplissage prévisionnel d'au moins une cuve dudit ouvrage flottant destinée à contenir ledit chargement liquide ; déterminer un angle d'incidence de houle, lequel est un angle entre ledit cap et la direction de la houle ; et estimer au moins une probabilité d'endommagement de ladite au moins une cuve en fonction de l'angle d'incidence de houle ainsi déterminé, de la hauteur significative de la houle, de la période de la houle et du niveau de remplissage prévisionnel de ladite cuve ; et

- fournir à un utilisateur une indication en fonction de ladite au moins une probabilité d'endommagement ainsi estimée.

[0041] Grâce à un tel procédé, un utilisateur tel qu'un membre d'équipage peut entreprendre toute mesure nécessaire pour limiter le risque d'endommagement de la ou des cuves de l'ouvrage flottant, comme par exemple modifier le cap de l'ouvrage flottant, étant rappelé que l'ouvrage flottant est libre de pivoter autour de son point d'ancrage.

[0042] Selon des modes de réalisation, un tel procédé peut comporter une ou plusieurs des caractéristiques suivantes.

[0043] Selon un mode de réalisation, la période de la houle est une période de pic de la houle, c'est-à-dire une période de temps entre le passage de deux pics successifs de la houle. Selon un mode de réalisation, la période de la houle est une période moyenne de la houle, c'est-à-dire une période de temps entre trois passages successifs à la hauteur moyenne de la mer ; cette période moyenne est couramment notée T_z .

[0044] Selon un mode de réalisation, la probabilité d'endommagement est estimée par consultation d'une base de données préalablement établie pour ladite cuve, ladite base de données comportant des données relatives au ballotement en fonction d'un angle d'incidence de la houle, d'une hauteur significative de la houle, de la période de la houle et d'un niveau de remplissage courant de ladite cuve,

les données relatives au ballotement étant déterminées par des mesures expérimentales, et

la probabilité d'endommagement étant relative à une densité de probabilité de rencontrer une pression sur une surface interne de la cuve supérieure à une résistance interne de la cuve en fonction de l'angle d'incidence de la houle, de la hauteur significative de la houle, de la période de la houle et du niveau de remplissage courant de ladite cuve.

[0045] Selon un mode de réalisation, ladite indication comprend une information représentative de la probabilité d'endommagement estimée en fonction desdites périodes de temps. En particulier, selon un mode de réalisation, ladite indication comprend une indication visuelle de la probabilité d'endommagement estimée en fonction desdites périodes de temps.

- [0046] Selon un mode de réalisation, lesdites prévisions comprennent en outre un état de mer du vent, l'état de mer du vent comprenant une hauteur significative de mer du vent et/ou une période de mer du vent et/ou une direction de mer du vent.
- [0047] Selon un mode de réalisation, la période de mer du vent est une période de pic de mer du vent, c'est-à-dire une période de temps entre le passage de deux pics successifs de la mer du vent. Selon un mode de réalisation, la période de la houle est une période moyenne de la mer du vent, c'est-à-dire une période de temps entre trois passages successifs à la hauteur moyenne de la mer ; cette période moyenne est couramment notée T_z .
- [0048] Selon un mode de réalisation, la probabilité d'endommagement de ladite au moins une cuve est en outre estimée en fonction de l'état de mer du vent.
- [0049] Le cap de l'ouvrage peut simplement être fourni à l'avance pour chaque période de temps, par exemple par l'utilisateur. En alternative, selon un mode de réalisation, pour chaque période de temps, ledit cap commun de l'ouvrage flottant est obtenu en :
- calculant, pour une pluralité de caps théoriques, une résultante des forces subies par l'ouvrage flottant en fonction de l'état de la houle et un moment par rapport au point d'ancrage de ladite résultante ;
 - sélectionnant, parmi la dite pluralité de caps théoriques, un cap commun qui minimise la valeur absolue du moment par rapport au point d'ancrage de ladite résultante.
- [0050] Selon un mode de réalisation, la résultante des forces subies par l'ouvrage flottant est en outre calculée en fonction de l'état de mer du vent.
- [0051] Selon un mode de réalisation, lesdites prévisions comprennent en outre un état du vent, l'état du vent comprenant une vitesse du vent et/ou une direction du vent, et la résultante des forces subies par l'ouvrage flottant est en outre calculée en fonction de l'état du vent.
- [0052] Selon un mode de réalisation, lesdites prévisions comprennent en outre un état du courant, l'état du courant comprenant une vitesse du courant et/ou une direction du courant, et la résultante des forces subies par l'ouvrage flottant est en outre calculée en fonction de l'état du courant.
- [0053] Selon un mode de réalisation, la résultante des forces subies par l'ouvrage flottant est en outre calculée en fonction de l'état de mer du vent.
- [0054] Selon un mode de réalisation, lesdites prévisions comprennent en outre un état du vent, l'état du vent comprenant une vitesse du vent et/ou une direction du vent, et la résultante des forces subies par l'ouvrage flottant est en outre calculée en fonction de l'état du vent.
- [0055] Selon un mode de réalisation, lesdites prévisions comprennent en outre un état du courant, l'état du courant comprenant une vitesse du courant et/ou une direction du

courant, et la résultante des forces subies par l'ouvrage flottant est en outre calculée en fonction de l'état du courant.

- [0056] Selon un mode de réalisation, ladite indication comprend une information représentative de la probabilité d'endommagement estimée en fonction de ladite pluralité de caps théoriques.
- [0057] Selon un mode de réalisation, le procédé comprend en outre une étape d'aide à la décision destinée à réduire la probabilité d'endommagement estimée.
- [0058] Selon un mode de réalisation, l'étape d'aide à la décision comprend le fait de fournir à l'utilisateur :
- une proposition de changement du cap de l'ouvrage flottant, et/ou
 - une proposition de modification d'un niveau de remplissage d'au moins une des cuves de l'ouvrage flottant.
- [0059] Ainsi, l'utilisateur est mis en capacité de prendre les mesures nécessaires, sur la base de ces propositions, afin réduire le risque d'endommagement de la ou des cuves de l'ouvrage flottant.
- [0060] Le procédé est applicable à des ouvrages flottants transportant tout type de chargement liquide. Il trouve toutefois une application particulière à des ouvrages flottants transportant un chargement d'un produit liquide froid.
- [0061] Selon un mode de réalisation, le chargement liquide est un chargement de gaz liquéfié, en particulier un chargement de gaz de pétrole liquéfié (GPL) ou un chargement de gaz naturel liquéfié (GNL).
- [0062] Selon un mode de réalisation, la au moins une cuve est une cuve étanche et/ou thermiquement isolante.
- [0063] Selon un mode de réalisation, l'ouvrage flottant est un navire transporteur de gaz naturel liquéfié (LNGC), une unité flottante de stockage et de regazéification (FSRU) de gaz naturel liquéfié ou une unité flottante de production de gaz naturel liquéfié (FLNG).
- [0064] Selon un mode de réalisation, l'invention fournit également un dispositif de prédiction d'estimation d'une probabilité d'un endommagement dû au ballonnement d'un chargement liquide d'un ouvrage flottant, l'ouvrage flottant étant amarré à un point d'ancrage par rapport au fond marin tout en étant libre de pivoter autour dudit point d'ancrage, le dispositif comprenant un processeur configuré pour mettre en œuvre le procédé selon n'importe lequel des modes de réalisation décrits ci-dessus.
- [0065] Un tel dispositif présente les mêmes avantages que ceux décrits ci-dessus en rapport avec le procédé.
- [0066] Selon un mode de réalisation, l'invention fournit également un ouvrage flottant comprenant un dispositif tel que décrit ci-dessus.

Brève description des figures

- [0067] 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 d'exécution particuliers de l'invention, donnés uniquement à titre illustratif et non limitatif, en référence aux dessins annexés.
- [0068] [Fig.1] La [Fig.1] est une représentation schématique en coupe longitudinale d'un ouvrage flottant, en l'espèce un navire, comportant une pluralité de cuves comprenant un chargement liquide.
- [0069] [Fig.2]. La [Fig.2] est un schéma représentant deux ouvrages flottants, en l'espèce un navire et une unité flottante, associés l'un à l'autre pendant une opération de transfert de chargement liquide, et d'un état de mer du vent, d'un état de houle, d'un état du courant et d'un état du vent auxquels peuvent être soumis les deux ouvrages flottants.
- [0070] [Fig.3A] La [Fig.3A] est un organigramme représentant un procédé d'estimation d'un risque d'un endommagement dû au ballonnement d'un chargement liquide pendant une opération de transfert dudit chargement liquide depuis un premier ouvrage flottant vers un deuxième ouvrage flottant.
- [0071] [Fig.3B] La [Fig.3B] est un détail de l'organigramme de la [Fig.3A] représentant une variante du procédé.
- [0072] [Fig.4] La [Fig.4] représente un dispositif de prédiction du ballonnement d'un chargement liquide pendant une opération de transfert dudit chargement liquide depuis un premier ouvrage flottant vers un deuxième ouvrage flottant.
- [0073] [Fig.5] La [Fig.5] représente un exemple d'indication visuelle de la probabilité d'endommagement estimée d'une cuve d'un ouvrage flottant en fonction de périodes de temps.
- [0074] [Fig.6] La [Fig.6] est un schéma représentant un ouvrage flottant amarré à un point d'ancrage par rapport au fond marin tout en étant libre de pivoter autour dudit point d'ancrage, et d'un état de mer du vent, d'un état de houle, d'un état du courant et d'un état du vent auxquels peut être soumis l'ouvrage flottant.
- [0075] [Fig.7A] La [Fig.7A] est un organigramme représentant un procédé d'estimation d'un risque d'un endommagement dû au ballonnement d'un chargement liquide de l'ouvrage flottant de la [Fig.6].
- [0076] [Fig.7B] La [Fig.7B] est un détail de l'organigramme de la [Fig.7A] représentant une variante du procédé.

Description des modes de réalisation

- [0077] 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.

- [0078] De telles cuves étanches et thermiquement isolantes 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 liquéfiée.
- [0079] 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 FR 2 691 520 A1, de type NO96® tel que décrit par exemple dans FR 2 877 638 A1, ou autre tel que décrit par exemple dans WO 2014/057221 A2.
- [0080] La [Fig.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.
- [0081] Sur la [Fig.2], on a représenté le navire 1 associé à un ouvrage flottant stationnaire 40, afin de réaliser une opération de transfert (« Ship-to-Ship Transfer » ou STS) du GNL contenu dans les quatre cuves 2 du navire 1 vers des cuves étanches et thermiquement isolantes (non représentées) que comprend l'ouvrage flottant stationnaire 40. L'ouvrage flottant stationnaire 40 est ici une unité flottante de stockage et de régazéification (FSRU) de gaz naturel liquéfié, mais il pourrait également s'agir d'une unité flottante de production de gaz naturel liquéfié (FLNG), d'un autre navire de transport de GNL analogue au navire 1, ou plus généralement de tout ouvrage flottant, stationnaire ou non, comprenant des cuves étanches et thermiquement isolantes pour recevoir du GNL.
- [0082] L'ouvrage flottant stationnaire 40 est ici situé au large et amarré à un point d'ancrage 90 par rapport au fond marin, tel qu'une bouée sous-marine ancrée au fond marin ou un système d'amarrage à tourelle. Le navire 1 est associé à l'ouvrage flottant stationnaire 40 à l'aide de plusieurs lignes d'amarrage 92, typiquement situées à la proue et à la poupe du navire 1 et de l'ouvrage flottant stationnaire 40. Des flotteurs 91 peuvent être disposés entre l'ouvrage flottant stationnaire 40 et le navire 1 afin d'éviter une collision accidentelle entre ceux-ci. Au moins une conduite flexible 93 est installée afin de réaliser le transfert du GNL contenu dans les quatre cuves 2 du navire 1 vers les

cuves de l'ouvrage flottant stationnaire 40.

- [0083] Pendant l'opération de transfert de GNL, le navire 1 et l'ouvrage flottant stationnaire sont orientés selon un même cap 99, ci-après dénommé le cap commun 99. Il est toutefois précisé que le cap commun 99 peut être modifié durant l'opération de transfert, qui peut durer plusieurs heures voire plusieurs dizaines d'heures.
- [0084] Le navire 1 arrive typiquement près de l'ouvrage flottant stationnaire 40 avec ses quatre cuves 2 presque entièrement remplies de GNL. Toutefois, à mesure que le GNL est transféré, les cuves 2 sont progressivement vidées. Les quatre cuves 2 présentent sur la [Fig.1] un état de remplissage partiel. 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.
- [0085] Ce remplissage partiel des cuves 3, 4, 5, 6 peut engendrer des risques importants d'endommagement desdites cuves 3, 4, 5, 6 pendant l'opération de transfert de GNL. En effet, lorsqu'il est en mer, le navire 1 est sujet à de nombreux mouvements liés aux conditions climatiques.
- [0086] En particulier, le navire 1 est sujet à une excitation de mer du vent représentée par l'axe 10, à une excitation de la houle représentée par l'axe 12, à une excitation du courant 14, et à une excitation du vent 16. La mer du vent est créée par l'excitation du vent 16 qui règne au voisinage du navire 1, et induit des vagues ayant une direction de mer du vent parallèle à l'axe 10, une hauteur significative de mer du vent et une période de pic de mer du vent. La houle est créée par une excitation du vent loin du navire 1, et provoque des vagues ayant une direction de la houle parallèle à l'axe 12, une hauteur significative de la houle et une période de pic de la houle. La rencontre des vagues induites par la houle et la mer du vent provoque des mouvements du navire 1. Le navire 1 est en outre sujet aux mouvements dus au courant, le courant ayant une direction parallèle à l'axe 14 et une vitesse du courant. Enfin, le navire 1 est sujet à l'excitation du vent, le vent ayant une direction parallèle à l'axe 16 et une vitesse du vent. Ces mouvements du navire 1 se répercutent sur le liquide contenu dans les cuves 3, 4, 5, 6 qui, en conséquence, est sujet à du ballonnement dans les cuves 3, 4, 5, 6 en produisant des impacts sur les parois de cuves. Lorsque le ballonnement dépasse la capacité des parois de cuves à absorber ou disperser le ballonnement, les impacts sur les parois de cuves 3, 4, 5, 6 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. Il est donc important d'estimer une probabilité d'un endommagement dû au ballonnement afin d'éviter de telles dégradations.
- [0087] Bien évidemment, le risque de dégradation des parois des cuves 3, 4, 5, 6 du navire 1

est tout aussi présent pour les parois des cuves de l'ouvrage flottant stationnaire 40, qui est lui aussi soumis à l'excitation de mer du vent 10, à l'excitation de la houle 12, et à l'excitation du courant 14.

- [0088] Un procédé 300, représenté sur la [Fig.3A], peut être mis en œuvre afin de prédire une probabilité d'endommagement des cuves du navire 1 et/ou de l'ouvrage flottant stationnaire 40.
- [0089] Le procédé 300 comprend d'abord une étape 301 dans laquelle on obtient une position géographique prévue de l'opération de transfert de GNL. Cette position géographique peut être saisie par un utilisateur, ou bien être acquise automatiquement par un système embarqué du navire 1 ou de l'ouvrage flottant stationnaire 40, par exemple sous forme de coordonnées GPS.
- [0090] Après l'étape 301, le procédé 300 passe à une étape 302 dans laquelle on obtient des prévisions météorologiques et océanographiques relatives à la position géographique obtenue à l'étape 301. De telles prévisions sont par exemple transmises par un moyen de communication tel que radio ou satellite par un fournisseur de prévisions météorologiques et océanographiques. Les prévisions sont obtenues pour une pluralité de périodes de temps qui couvrent ensemble une durée prévue de l'opération de transfert de GNL, cette durée prévue pouvant être saisie par un utilisateur.
- [0091] Pour chaque période de temps, les prévisions comprennent au moins un état de la houle. Elles comprennent de préférence en outre un état de mer du vent ou un état du courant ou un état du vent, plus préférablement plusieurs de ces états, et plus préférablement encore tous ces états.
- [0092] Après l'étape 302, le procédé 300 comprend en outre les étapes suivantes :
- une étape 303A dans laquelle on extrait des prévisions obtenues à l'étape 302, pour chaque période de temps, une direction de la houle (représentée sur la [Fig.2] par la direction de l'axe 12) et une hauteur significative de la houle, et une période de pic de la houle ;
 - le cas échéant, une étape 303B dans laquelle on extrait, des prévisions obtenues à l'étape 302, pour chaque période de temps, une hauteur significative de mer du vent et/ou une période de pic de mer du vent et/ou une direction de mer du vent (représentée sur la [Fig.2] par la direction de l'axe 10) ;
 - le cas échéant, une étape 303C dans laquelle on extrait, des prévisions obtenues à l'étape 302, pour chaque période de temps, une vitesse du courant et/ou une direction du courant (représentée sur la [Fig.2] par la direction de l'axe 14) ;
 - le cas échéant, une étape 303D dans laquelle on extrait, des prévisions obtenues à l'étape 302, pour chaque période de temps, une vitesse du vent et/ou une direction du vent (représentée sur la [Fig.2] par la direction de l'axe 16).
- [0093] Le procédé 300 comprend ensuite les étapes suivantes, qui sont répétées pour

chacune des périodes de temps :

- une étape 304 dans laquelle on obtient le cap commun 99 du navire 1 et de l'ouvrage flottant stationnaire 40 ;
- une étape 305 dans laquelle on détermine au moins un niveau de remplissage prévisionnel d'au moins une cuve d'au moins un du navire 1 et de l'ouvrage flottant stationnaire 40 ;
- une étape 306 dans laquelle on détermine un angle d'incidence de houle, c'est-à-dire un angle entre le cap commun 99 et la direction de la houle (représentée sur la [Fig.2] par la direction de l'axe 12) ;
- une étape 307 dans laquelle on estime au moins une probabilité d'endommagement de la cuve dont le niveau de remplissage prévisionnel a été déterminé à l'étape 305, en fonction de : l'angle d'incidence de houle déterminé à l'étape 306 ; la hauteur significative de la houle et la période de pic de la houle extraites à l'étape 303A ; et le au moins un niveau de remplissage prévisionnel de la cuve en question déterminé à l'étape 305.

[0094] L'étape 305 peut être réalisée de diverses manières. Selon une variante, un ou plusieurs niveaux de remplissage prévisionnel de la cuve sont déterminés à partir d'un scénario de transfert du chargement liquide, le scénario de transfert du chargement liquide définissant une évolution du niveau de remplissage de ladite cuve en fonction du temps. Un tel scénario de transfert du chargement liquide peut être déterminé à l'avance, et par exemple être saisi par l'utilisateur préalablement à l'opération de transfert.

[0095] Plusieurs niveaux de remplissage prévisionnel de la cuve peuvent être déterminés à l'étape 305, une probabilité d'endommagement de la cuve étant estimée à l'étape 307 pour chaque niveau de remplissage prévisionnel de la cuve déterminé à l'étape 305. Selon une variante, à l'étape 305, deux niveaux de remplissage prévisionnel de la cuve sont déterminés, les deux niveaux de remplissage prévisionnel incluant un niveau bas de remplissage prévisionnel et un niveau haut de remplissage prévisionnel. Selon une variante particulière, le niveau bas de remplissage prévisionnel et le niveau haut de remplissage prévisionnel sont des niveaux de remplissage prévisionnel déterminés à l'avance : l'étape 305 consiste alors simplement à lire – par exemple dans la base de données mentionnée ci-dessous en rapport avec l'étape 307 – les valeurs du niveau bas de remplissage prévisionnel et du niveau haut de remplissage prévisionnel. Le niveau bas de remplissage prévisionnel et le niveau haut de remplissage prévisionnel peuvent être déterminés à l'avance lors d'une étape préalable (non représentée sur les dessins) consistant à rechercher, par exemple par simulation et/ou par essais expérimentaux, deux niveaux de remplissage de la cuve qui sont les plus susceptibles d'amener un risque d'endommagement de la cuve dû au ballonnement.

- [0096] Lorsque plusieurs cuves du navire 1 et/ou de l'ouvrage flottant stationnaire 40 sont prises en considération, les étapes 305 et 307 sont mises en œuvre pour chacune de ces cuves. On peut également choisir de ne considérer que certaines des cuves du navire 1 et/ou de l'ouvrage flottant stationnaire 40, par exemple une ou certaines des cuves du navire 1 et/ou de l'ouvrage flottant stationnaire 40 dont on a déterminé par une analyse préalable qu'elles sont le plus sujettes à un risque d'endommagement dû au ballotement.
- [0097] L'étape 307 peut être réalisée par consultation d'une base de données préalablement établie pour la cuve considérée, selon le cas, du navire 1 ou de l'ouvrage flottant stationnaire 40. Une telle base de données comporte des données relatives au ballotement en fonction d'un angle d'incidence de la houle, d'une hauteur significative de la houle, d'une période de pic de la houle, et d'un niveau de remplissage courant de ladite cuve, les données relatives au ballotement étant déterminées par des mesures expérimentales. La probabilité d'endommagement étant relative à une densité de probabilité de rencontrer une pression sur une surface interne de la cuve supérieure à une résistance interne de la cuve en fonction de l'angle d'incidence de la houle, de la hauteur significative de la houle, de la période de pic de la houle et du niveau de remplissage de ladite cuve.
- [0098] Le cap commun 99 obtenu à l'étape 304 peut être défini à l'avance. Selon une variante, le cap commun 99 peut être saisi par un utilisateur, pour chaque période de temps voire pour toutes les périodes de temps considérées. Selon une variante avantageuse, pour chaque période de temps, ce cap commun 99 est obtenu de façon à tenir compte des forces subies par le navire 1 et l'ouvrage flottant 40 en raison de l'état de la houle, et de préférence de l'état de mer du vent et/ou de l'état du courant.
- [0099] La [Fig.3B] représente un exemple d'une telle mise en œuvre de l'étape 304, dans laquelle :
- dans une première étape 304-1, on calcule les forces subies par le navire 1 et l'ouvrage flottant 40 en raison de l'état de la houle, et de préférence de l'état de mer du vent et/ou de l'état du courant et/ou de l'état du vent ;
 - dans une seconde étape 304-2, on calcule une résultante des forces déterminées à l'étape 304-1 ;
 - dans une troisième étape 304-3, on calcule un moment de la résultante déterminée à l'étape 304-2 autour du point d'ancrage 90.
- Les étapes 304-1, 304-2, 304-3 sont mises en œuvre pour une pluralité de caps théoriques, c'est-à-dire une pluralité de valeurs possibles du cap commun 99. Par exemple, les étapes 304-1, 304-2, 304-3 sont mises en œuvre pour des incréments de valeurs du cap commun 99, ces incréments étant de 5 degrés, 2 degrés ou encore 1 degré. Ensuite, dans une étape 304-4, on sélectionne, parmi ladite pluralité de caps

théoriques, un cap commun 99 qui minimise la valeur absolue du moment déterminé aux étapes 304-3.

- [0100] Après l'étape 307, le procédé 300 passe à une étape 308 dans laquelle une indication est fournie à un utilisateur en fonction des probabilités d'endommagement estimées à l'étape 307.
- [0101] Cette étape 308 peut simplement consister à fournir une alarme visuelle et/ou sonore à l'utilisateur lorsque la probabilité d'endommagement de l'une des cuves excède un seuil prédéterminé. En complément ou en alternative, l'indication fournie à l'étape 308 peut comprendre le fait de fournir à l'utilisateur au moins une indication visuelle des probabilités d'endommagement estimées à l'étape 307, en fonction d'une autre grandeur.
- [0102] La [Fig.5] représente à titre d'exemple une indication visuelle des probabilités d'endommagement estimées à l'étape 307 en fonction des périodes de temps auxquelles elles se rapportent. Sur cette figure, l'indication visuelle comprend une case correspondant à chacune des périodes de temps. Une absence de hachures indique que la probabilité d'endommagement est nulle ou inférieure à un seuil bas. Des hachures simples indiquent que la probabilité d'endommagement est comprise entre un seuil bas et un seuil haut. Des hachures doubles indiquent que la probabilité d'endommagement est supérieure à un seuil haut. Il est bien entendu qu'au lieu de hachures différentes, des couleurs différentes suivant un code couleur ou toute autre représentation peuvent être employées. Il est en outre bien entendu qu'un nombre différent de seuils de probabilité d'endommagement peut être utilisé.
- [0103] De préférence, après l'étape 308, le procédé 300 passe à une étape 309 d'aide à la décision destinée à réduire la ou les probabilités d'endommagement estimées à l'étape 307. Cette étape 309 d'aide à la décision peut notamment comprendre le fait de fournir à l'utilisateur :
- une proposition de changement du cap commun 99, et/ou
 - une proposition de modification d'au moins un paramètre de l'opération de transfert, par exemple d'un débit de transfert de chargement liquide et/ou d'un niveau de remplissage de la ou des cuves (entre les cuves du navire 1 et/ou entre les cuves de l'ouvrage flottant stationnaire 40 et/ou entre les cuves du navire 1 et les cuves de l'ouvrage flottant stationnaire 40).
- [0104] Grâce à cette étape 309, l'utilisateur est mis en capacité de prendre les mesures nécessaires, sur la base de ces propositions, afin réduire le risque d'endommagement des cuves.
- [0105] La [Fig.4] illustre un dispositif 100 de détermination du ballottement pouvant être embarqué sur le navire 1. Ce dispositif 100 comporte une unité centrale 110 configurée pour réaliser les différentes étapes du procédé 300 pour estimer la probabilité

d'endommagement d'une cuve du navire 1 et/ou de l'ouvrage flottant stationnaire 40.

- [0106] L'unité centrale 110 est connectée à une pluralité de capteurs 120 embarqués permettant d'obtenir les différentes grandeurs indiquées ci-dessus. Ainsi, les capteurs 120 comportent, par exemple et de manière non exhaustive, un capteur de niveau de remplissage 121 de chaque cuve, et d'autres capteurs 122, 123 aptes à fournir en sortie des grandeurs indicatives de l'état de la houle, et de préférence de l'état de mer du vent et/ou de l'état du courant et/ou de l'état du vent.
- [0107] Le dispositif 100 comporte en outre une interface homme-machine 140. Cette interface homme machine 140 comporte un moyen d'affichage 41 permettant à un opérateur du navire 1 d'obtenir différentes informations, par exemple les probabilités d'endommagement estimées en mettant en œuvre les étapes du procédé 300, la ou les indications générées à l'étape 308, l'aide à la décision générée à l'étape 309, les grandeurs obtenues par les capteurs 120, l'état de chargement du navire ou encore des informations météorologiques.
- [0108] L'interface homme-machine 140 comporte en outre un moyen d'acquisition 42 permettant à l'opérateur de fournir manuellement des grandeurs à l'unité centrale 110, typiquement pour fournir à l'unité centrale 110 des données ne pouvant pas être obtenues par des capteurs car le navire 1 ne comporte pas le capteur nécessaire ou que ce dernier est endommagé. Par exemple, dans un mode de réalisation, le moyen d'acquisition 42 permet à l'opérateur d'entrer des informations sur l'état de mer du vent et/ou l'état de la houle.
- [0109] Le dispositif 100 comporte une base de données 150. Cette base de données 316 comporte par exemple certaines grandeurs obtenues en laboratoire ou lors de campagnes de mesures embarquées en mer. Par exemple, la base de données 150 peut comporter, pour une cuve donnée, des données relatives au ballottement en fonction d'un angle d'incidence de la houle, d'une hauteur significative de la houle, d'une période de pic de la houle et d'un niveau de remplissage courant de ladite cuve.
- [0110] Le dispositif 100 comporte également une interface de communication 130 permettant à l'unité centrale 110 de communiquer avec des dispositifs distants par exemple pour obtenir des prévisions météorologiques, des données de position du navire ou autre.
- [0111] Certains éléments représentés, notamment l'unité centrale 110, 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++, C#, Java (marque déposée) ou VHDL. Cette liste n'est pas exhaustive.

- [0112] Dans la description ci-dessus, on a fait référence à une période de pic de la houle, c'est-à-dire une période de temps entre le passage de deux pics successifs de la houle. En variante, en lieu et place de la période de pic de la houle, on peut considérer la période moyenne de la houle, c'est-à-dire une période de temps entre trois passages successifs de la houle à la hauteur moyenne de la mer.
- [0113] De même, en lieu et place de la période de pic de mer du vent, on peut considérer la période moyenne de mer du vent, c'est-à-dire une période de temps entre trois passages successifs de la mer du vent à la hauteur moyenne de la mer.
- [0114] Les principes décrits ci-dessus sont également applicables à un ouvrage flottant transportant un chargement liquide et ancré à un point d'ancrage. En effet, le chargement liquide d'un tel ouvrage flottant est lui aussi susceptible d'être agité sous l'effet des vagues, ce qui peut aussi conduire à un phénomène de ballotement qui est susceptible de nuire à l'intégrité de la ou des cuves contenant le chargement liquide.
- [0115] Sur la [Fig.6], on a ainsi représenté le navire 1 de la [Fig.1], amarré par une ou plusieurs lignes d'amarrage 92 à un point d'ancrage 90 par rapport au fond marin, tel qu'une bouée sous-marine ancrée au fond marin. Le navire 1 est libre de pivoter autour du point d'ancrage 90, et peut ainsi adopter n'importe quel cap du fait de son pivotement autour du point d'ancrage 90. Le cap du navire 1 porte ici la référence 190.
- [0116] Comme on l'a décrit précédemment en rapport avec la [Fig.2], le navire 1 est ici aussi sujet à une excitation de mer du vent représentée par l'axe 10, à une excitation de la houle représentée par l'axe 12, à une excitation du courant 14, et à une excitation du vent 16. Les mouvements du navire 1 se répercutent sur le liquide contenu dans les cuves 3, 4, 5, 6 qui, en conséquence, est sujet à du ballotement dans les cuves 3, 4, 5, 6 en produisant des impacts sur les parois de cuves. Lorsque le ballotement dépasse la capacité des parois de cuves à absorber ou disperser le ballotement, les impacts sur les parois de cuves 3, 4, 5, 6 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. Il est donc, ici aussi, important d'estimer une probabilité d'un endommagement dû au ballotement afin d'éviter de telles dégradations.
- [0117] Un procédé 1300, représenté sur la [Fig.7A], peut être mis en œuvre afin de prédire une probabilité d'endommagement des cuves du navire 1.
- [0118] Le procédé 1300 comprend d'abord une étape 1301 dans laquelle on obtient une position géographique du navire 1 amarré au point d'ancrage 90. Cette position géographique peut être saisie par un utilisateur, ou bien être acquise automatiquement par un système embarqué du navire 1, par exemple sous forme de coordonnées GPS.
- [0119] Après l'étape 1301, le procédé 1300 passe à une étape 1302 dans laquelle on obtient des prévisions météorologiques et océanographiques relatives à la position géo-

graphique obtenue à l'étape 1301. De telles prévisions sont par exemple transmises par un moyen de communication tel que radio ou satellite par un fournisseur de prévisions météorologiques et océanographiques. Les prévisions sont obtenues pour une pluralité de périodes de temps qui couvrent ensemble une durée prévue de l'opération de transfert de GNL, cette durée prévue pouvant être saisie par un utilisateur.

- [0120] Pour chaque période de temps, les prévisions comprennent au moins un état de la houle. Elles comprennent de préférence en outre un état de mer du vent ou un état du courant ou un état du vent, plus préférentiellement plusieurs de ces états, et plus préférentiellement encore tous ces états.
- [0121] Après l'étape 1302, le procédé 1300 comprend en outre les étapes suivantes :
- une étape 1303A dans laquelle on extrait des prévisions obtenues à l'étape 1302, pour chaque période de temps, une direction de la houle (représentée sur la [Fig.6] par la direction de l'axe 12) et une hauteur significative de la houle, et une période de pic de la houle ;
 - le cas échéant, une étape 1303B dans laquelle on extrait, des prévisions obtenues à l'étape 1302, pour chaque période de temps, une hauteur significative de mer du vent et/ou une période de pic de mer du vent et/ou une direction de mer du vent (représentée sur la [Fig.6] par la direction de l'axe 10) ;
 - le cas échéant, une étape 1303C dans laquelle on extrait, des prévisions obtenues à l'étape 1302, pour chaque période de temps, une vitesse du courant et/ou une direction du courant (représentée sur la [Fig.6] par la direction de l'axe 14) ;
 - le cas échéant, une étape 1303D dans laquelle on extrait, des prévisions obtenues à l'étape 1302, pour chaque période de temps, une vitesse du vent et/ou une direction du vent (représentée sur la [Fig.6] par la direction de l'axe 16).
- [0122] Le procédé 1300 comprend ensuite les étapes suivantes, qui sont répétées pour chacune des périodes de temps :
- une étape 1304 dans laquelle on obtient le cap 190 du navire 1 ;
 - une étape 1305 dans laquelle on détermine au moins un niveau de remplissage prévisionnel d'au moins une cuve du navire 1 ;
 - une étape 1306 dans laquelle on détermine un angle d'incidence de houle, c'est-à-dire un angle entre le cap 190 du navire 1 et la direction de la houle (représentée sur la [Fig.6] par la direction de l'axe 12) ;
 - une étape 1307 dans laquelle on estime au moins une probabilité d'endommagement de la cuve dont le niveau de remplissage prévisionnel a été déterminé à l'étape 1305, en fonction de : l'angle d'incidence de houle déterminé à l'étape 1306 ; la hauteur significative de la houle et la période de pic de la houle extraites à l'étape 1303A ; et le au moins un niveau de remplissage prévisionnel de la cuve en question déterminé à l'étape 1305.

- [0123] Lorsque plusieurs cuves du navire 1 sont prises en considération, les étapes 1305 et 1307 sont mises en œuvre pour chacune de ces cuves. On peut également choisir de ne considérer que certaines des cuves du navire 1, par exemple une ou certaines des cuves du navire 1 dont on a déterminé par une analyse préalable qu'elles sont le plus sujettes à un risque d'endommagement dû au ballottement.
- [0124] L'étape 1307 peut être réalisée par consultation d'une base de données préalablement établie pour la cuve considérée du navire 1. Une telle base de données comporte des données relatives au ballottement en fonction d'un angle d'incidence de la houle, d'une hauteur significative de la houle, d'une période de pic de la houle et d'un niveau de remplissage courant de ladite cuve, les données relatives au ballottement étant déterminées par des mesures expérimentales. La probabilité d'endommagement étant relative à une densité de probabilité de rencontrer une pression sur une surface interne de la cuve supérieure à une résistance interne de la cuve en fonction de l'angle d'incidence de la houle, de la hauteur significative de la houle, de la période de pic de la houle et du niveau de remplissage de ladite cuve.
- [0125] Le cap 190 obtenu à l'étape 1304 peut être défini à l'avance. Selon une variante, le cap 190 peut être saisi par un utilisateur, pour chaque période de temps voire pour toutes les périodes de temps considérées. Selon une variante avantageuse, pour chaque période de temps, ce cap du navire 190 est obtenu de façon à tenir compte des forces subies par le navire 1 en raison de l'état de la houle, et de préférence de l'état de mer du vent et/ou de l'état du courant.
- [0126] La [Fig.7B] représente un exemple d'une telle mise en œuvre de l'étape 1304, dans laquelle :
- dans une première étape 1304-1, on calcule les forces subies par le navire 1 en raison de l'état de la houle, et de préférence de l'état de mer du vent et/ou de l'état du courant et/ou de l'état du vent ;
 - dans une seconde étape 1304-2, on calcule une résultante des forces déterminées à l'étape 1304-1 ;
 - dans une troisième étape 1304-3, on calcule un moment de la résultante déterminée à l'étape 1304-2 autour du point d'ancrage 90.
- Les étapes 1304-1, 1304-2, 1304-3 sont mises en œuvre pour une pluralité de caps théoriques, c'est-à-dire une pluralité de valeurs possibles du cap 190. Par exemple, les étapes 1304-1, 1304-2, 1304-3 sont mises en œuvre pour des incréments de valeurs du cap 190, ces incréments étant de 5 degrés, 2 degrés ou encore 1 degré. Ensuite, dans une étape 1304-4, on sélectionne, parmi ladite pluralité de caps théoriques, un cap 190 qui minimise la valeur absolue du moment déterminé aux étapes 1304-3.
- [0127] Après l'étape 1307, le procédé 1300 passe à une étape 1308 dans laquelle une indication est fournie à un utilisateur en fonction des probabilités d'endommagement

estimées à l'étape 1307.

- [0128] Cette étape 1308 peut simplement consister à fournir une alarme visuelle et/ou sonore à l'utilisateur lorsque la probabilité d'endommagement de l'une des cuves excède un seuil prédéterminé. En complément ou en alternative, l'indication fournie à l'étape 1308 peut comprendre le fait de fournir à l'utilisateur au moins une indication visuelle des probabilités d'endommagement estimées à l'étape 1307, en fonction d'une autre grandeur. Cette indication visuelle peut être analogue à celle décrite ci-dessus en rapport avec la [Fig.5].
- [0129] De préférence, après l'étape 1308, le procédé 1300 passe à une étape 1309 d'aide à la décision destinée à réduire la ou les probabilités d'endommagement estimées à l'étape 1307. Cette étape 1309 d'aide à la décision peut notamment comprendre le fait de fournir à l'utilisateur :
- une proposition de changement du cap 190, et/ou
 - une proposition de modification d'un niveau de remplissage d'au moins une des cuves du navire 1.
- [0130] Grâce à cette étape 1309, l'utilisateur est mis en capacité de prendre les mesures nécessaires, sur la base de ces propositions, afin réduire le risque d'endommagement des cuves.
- [0131] Les différentes étapes du procédé 1300 peuvent être mises en œuvre par l'unité centrale 110 du dispositif 100 déjà décrit ci-dessus en rapport avec la [Fig.4].
- [0132] Dans la description ci-dessus, on a fait référence à une période de pic de la houle, c'est-à-dire une période de temps entre le passage de deux pics successifs de la houle. En variante, en lieu et place de la période de pic de la houle, on peut considérer la période moyenne de la houle, c'est-à-dire une période de temps entre trois passages successifs de la houle à la hauteur moyenne de la mer.
- [0133] De même, en lieu et place de la période de pic de mer du vent, on peut considérer la période moyenne de mer du vent, c'est-à-dire une période de temps entre trois passages successifs de la mer du vent à la hauteur moyenne de la mer.
- [0134] 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.
- [0135] En outre, il est bien évident qu'une caractéristique ou une combinaison de caractéristiques décrites en rapport avec un procédé s'applique tout autant à un système correspondant, et vice versa.
- [0136] 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.

[0137] Dans les revendications, tout signe de référence entre parenthèses ne saurait être interprété comme une limitation de la revendication.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé (300) d'estimation d'une probabilité d'un endommagement dû au ballottement d'un chargement liquide pendant une opération de transfert dudit chargement liquide depuis un premier ouvrage flottant (1) vers un deuxième ouvrage flottant (40), le premier ouvrage flottant (1) et le deuxième ouvrage flottant (40) étant associés l'un à l'autre pendant ladite opération de transfert de telle sorte que le premier ouvrage flottant (1) et le deuxième ouvrage flottant (40) soient orientés selon un cap commun (99), ledit procédé (300) comprenant :

- obtenir (301) une position géographique prévue de ladite opération de transfert ;
- obtenir (302) des prévisions météorologiques et océanographiques relatives à ladite position géographique pour une pluralité de périodes de temps, lesdites périodes de temps couvrant ensemble une durée prévue de ladite opération de transfert, lesdites prévisions comprenant, pour chaque période de temps, un état de la houle, dans lequel l'état de la houle comprend une direction de la houle, une hauteur significative de la houle et une période de la houle ;
- pour chaque période de temps : obtenir (304) le cap commun (99) du premier et du deuxième ouvrages flottants (1, 40) ; déterminer (305) au moins un niveau de remplissage prévisionnel d'au moins une cuve d'au moins un desdits premier et deuxième ouvrages flottants (1, 40) destinée à contenir la totalité ou une partie dudit chargement liquide ; déterminer (306) un angle d'incidence de houle, lequel est un angle entre ledit cap commun (99) des premier et deuxième ouvrages flottants et la direction de la houle (12) ; et estimer (307) au moins une probabilité d'endommagement de ladite au moins une cuve en fonction de l'angle d'incidence de houle ainsi déterminé, de la hauteur significative de la houle, de la période de la houle et dudit au moins un niveau de remplissage prévisionnel de ladite cuve ; et
- fournir à un utilisateur (308) une indication en fonction de ladite au moins une probabilité d'endommagement ainsi estimée.

[Revendication 2]

Procédé (300) selon la revendication 1, dans lequel ledit au moins un niveau de remplissage prévisionnel est déterminé (305) à partir d'un scénario de transfert du chargement liquide, le scénario de transfert du chargement liquide définissant une évolution du niveau de remplissage de ladite cuve en fonction du temps.

- [Revendication 3] Procédé (300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 2, dans lequel pour chaque période de temps, deux niveaux de remplissage prévisionnel de ladite cuve sont déterminés (305), les deux niveaux de remplissage prévisionnel incluant un niveau bas de remplissage prévisionnel et un niveau haut de remplissage prévisionnel, et une probabilité d'endommagement de ladite cuve est estimée (307) pour chacun des deux niveaux de remplissage prévisionnel.
- [Revendication 4] Procédé (300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel ladite au moins une probabilité d'endommagement est estimée (307) par consultation d'une base de données préalablement établie pour ladite cuve, ladite base de données comportant des données relatives au ballotement en fonction d'un angle d'incidence de la houle, d'une hauteur significative de la houle, de la période de la houle et d'un niveau de remplissage courant de ladite cuve, les données relatives au ballotement étant déterminées par des mesures expérimentales, et la probabilité d'endommagement étant relative à une densité de probabilité de rencontrer une pression sur une surface interne de la cuve supérieure à une résistance interne de la cuve en fonction de l'angle d'incidence de la houle, de la hauteur significative de la houle, de la période de la houle et du niveau de remplissage courant de ladite cuve.
- [Revendication 5] Procédé (300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel ladite indication comprend une information représentative de la probabilité d'endommagement estimée en fonction desdites périodes de temps.
- [Revendication 6] Procédé (300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel lesdites prévisions comprennent en outre un état de mer du vent, l'état de mer du vent comprenant une hauteur significative de mer du vent et/ou une période de mer du vent et/ou une direction de mer du vent (10), et la probabilité d'endommagement de ladite au moins une cuve est en outre estimée en fonction de l'état de mer du vent.
- [Revendication 7] Procédé (300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel le premier ouvrage flottant (1) et le deuxième ouvrage flottant (40) sont ancrés à un point d'ancrage (90) pendant ladite opération de transfert, et pour chaque période de temps, ledit cap commun (99) des deux ouvrages flottants (1, 40) est obtenu (304) en :
- calculant (304-2, 304-3), pour une pluralité de caps théoriques, une résultante des forces subies par les premier et deuxième ouvrages flottants

en fonction de l'état de la houle et un moment par rapport au point d'ancrage (90) de ladite résultante ;

- sélectionnant (304-4), parmi la dite pluralité de caps théoriques, un cap commun (99) qui minimise la valeur absolue du moment par rapport au point d'ancrage de ladite résultante.

- [Revendication 8] Procédé (300) selon la revendication 6 et la revendication 7 prises en combinaison, dans lequel la résultante des forces subies par les premier et deuxième ouvrages flottants (1, 40) est en outre calculée (304-2) en fonction de l'état de mer du vent.
- [Revendication 9] Procédé (300) selon la revendication 7 ou 8, dans lequel lesdites prévisions comprennent en outre un état du vent, l'état du vent comprenant une vitesse du vent et/ou une direction du vent (16), et dans lequel la résultante des forces subies par les premier et deuxième ouvrages flottants est en outre calculée en fonction de l'état du vent.
- [Revendication 10] Procédé (300) selon l'une quelconque des revendications 7 à 9, dans lequel lesdites prévisions comprennent en outre un état du courant, l'état du courant comprenant une vitesse du courant et/ou une direction du courant (14), et dans lequel la résultante des forces subies par les premier et deuxième ouvrages flottants (1, 40) est en outre calculée en fonction de l'état du courant.
- [Revendication 11] Procédé (300) selon l'une quelconque des revendications 7 à 10, dans lequel ladite indication comprend une information représentative de la probabilité d'endommagement estimée en fonction ladite pluralité de caps théoriques.
- [Revendication 12] Procédé (300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, comprenant en outre une étape d'aide à la décision (309) destinée à réduire la probabilité d'endommagement estimée.
- [Revendication 13] Procédé (300) selon la revendication 12, dans lequel l'étape d'aide à la décision (309) comprend le fait de fournir à l'utilisateur :
- une proposition de changement du cap commun (99), et/ou
 - une proposition de modification d'au moins un paramètre de l'opération de transfert.
- [Revendication 14] Procédé (300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, dans lequel le chargement liquide est un chargement de gaz liquéfié, en particulier un chargement de gaz de pétrole liquéfié ou un chargement de gaz naturel liquéfié.
- [Revendication 15] Procédé (300) selon la revendication 14, dans lequel le chargement liquide est un chargement de gaz naturel liquéfié, le premier ouvrage

flottant est un navire transporteur de gaz naturel liquéfié (1), et le deuxième ouvrage flottant est une unité flottante de stockage et de regazéification de gaz naturel liquéfié (40) ou une unité flottante de production de gaz naturel liquéfié.

[Revendication 16] Dispositif (100) d'estimation d'une probabilité d'un endommagement dû au ballonnement d'un chargement liquide pendant une opération de transfert dudit chargement liquide depuis un premier ouvrage flottant (1) vers un deuxième ouvrage flottant (40), le premier ouvrage flottant (1) et le deuxième ouvrage flottant (40) étant associés l'un à l'autre pendant ladite opération de transfert de telle sorte que le premier ouvrage flottant et le deuxième ouvrage flottant soient orientés selon un cap commun (99), le dispositif (100) comprenant un processeur (110) configuré pour mettre en œuvre le procédé (300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 15.

[Revendication 17] Ouvrage flottant (1, 40) comprenant un dispositif (100) selon la revendication 16.