



(11)

EP 3 390 893 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
09.10.2019 Bulletin 2019/41

(51) Int Cl.:
F17C 13/02 ^(2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **16825534.7**

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/FR2016/053518

(22) Date de dépôt: **16.12.2016**

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2017/103531 (22.06.2017 Gazette 2017/25)

(54) **PROCEDE ET SYSTEME POUR CALCULER EN TEMPS REEL LA DUREE D'AUTONOMIE D'UNE CUVE NON REFRIGEREE CONTENANT DU GNL**

VERFAHREN UND SYSTEM ZUR BERECHNUNG, IN ECHTZEIT, DER DAUER DER AUTONOMIE EINES UNGEKÜHLTEN TANKS MIT FLÜSSIGERDGS

METHOD AND SYSTEM FOR CALCULATING, IN REAL-TIME, THE DURATION OF AUTONOMY OF A NON-REFRIGERATED TANK CONTAINING LNG

(84) Etats contractants désignés:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**

- **ZELLOUF, Yacine**
92600 Asnieres Sur Seine (FR)
- **LEGRAND, Frédéric**
75013 Paris (FR)

(30) Priorité: **18.12.2015 FR 1562854**

(74) Mandataire: **Novagraaf Technologies**
Bâtiment O2
2, rue Sarah Bernhardt
CS90017
92665 Asnières-sur-Seine Cedex (FR)

(43) Date de publication de la demande:
24.10.2018 Bulletin 2018/43

(73) Titulaire: **Engie**
92400 Courbevoie (FR)

(56) Documents cités:
EP-A1- 1 145 740 EP-A1- 1 965 121
FR-A1- 2 868 160 FR-A1- 2 952 432
US-A1- 2007 193 379 US-B2- 7 104 124

(72) Inventeurs:
• **BEN BELGACEM-STREK, Michel**
75018 Paris (FR)

EP 3 390 893 B1

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

[0001] La présente invention se rapporte de manière générale à un procédé et un système pour calculer en temps réel la durée d'autonomie d'une cuve non réfrigérée contenant du gaz naturel (usuellement désigné par l'acronyme GN), comprenant une couche de gaz naturel liquéfié (GNL) et une couche de gaz naturel gazeux (GNG).

[0002] Par durée d'autonomie d'une cuve non réfrigérée contenant du GN, on entend, au sens de la présente invention, le temps de rétention (ou temps de stockage) restant du gaz naturel dans la cuve avant ouverture des soupapes de la cuve.

[0003] Le gaz naturel liquéfié (abrégié en GNL) est typiquement du gaz naturel composé essentiellement de méthane condensé à l'état liquide : Lorsqu'il est refroidi à une température d'environ -160°C à la pression atmosphérique, il prend la forme d'un liquide clair, transparent, inodore, non corrosif et non toxique. Dans une cuve contenant du GNL, celui-ci se présente généralement sous forme d'une couche de liquide, qui est recouverte par une couche de gaz (« ciel gazeux »).

[0004] Le GNL carburant est une alternative simple et efficace aux combustibles classiques. Tant du point de vue de l'émission de CO₂, que de particules polluantes et de densité énergétique. De plus en plus d'acteurs se tournent vers son utilisation, notamment les transporteurs routiers, maritimes ou ferroviaires.

[0005] Cependant, un des défauts intrinsèques du GNL est sa qualité de liquide cryogénique à pression atmosphérique. Cela signifie que le GNL doit être maintenu à une température bien inférieure à la température ambiante pour rester dans un état liquide. Cela implique des entrées de chaleur inévitables dans la cuve de GNL non réfrigérée et ainsi une montée en pression dans la couche gazeuse jusqu'à l'ouverture des soupapes de la cuve. Cette montée en pression limite la durée d'autonomie du GNL dans la cuve.

[0006] Or, la durée d'autonomie est un paramètre qu'il est crucial de connaître, afin de dimensionner la chaîne logistique, et notamment de transport du GNL et d'informer l'opérateur en temps réel de la durée d'autonomie résiduelle (de la même manière que la durée d'autonomie d'une batterie est généralement communiquée à son utilisateur). Lorsqu'une telle information n'est pas communiquée aux opérateurs d'une cuve de GNL, cela a pour conséquence par exemple des rejets de méthane à l'atmosphère qui sont incompatibles avec les exigences environnementales actuelles.

[0007] A l'heure actuelle, on ne connaît pas de solution pour informer en temps réel l'opérateur de la durée d'autonomie (ou temps de rétention) d'une cuve de GNL avant ouverture des soupapes. La seule information à disposition de l'opérateur est la pression du ciel gazeux (c'est-à-dire la couche de gaz superficielle dans la cuve). L'opérateur suit en conséquence des règles de bonnes conduites déduites de l'expérience et fournies par le constructeur de cuve pour éviter un rejet de gaz à l'atmosphère.

[0008] Le brevet américain US 7,104,124 décrit un procédé et un système permettant de calculer la quantité résiduelle d'un gaz comprimé dans un contenant et donc la durée d'utilisation restante lorsque ce contenant est vidé, cette durée correspondant à la durée pendant laquelle le gaz résiduel dans le contenant peut être délivré en fonction du débit d'utilisation du gaz. Toutefois, le brevet américain US 7,104,124 ne fait nullement référence à un fluide cryogénique qui s'évapore dans une cuve cryogénique, celle-ci contenant donc à la fois du gaz naturel en phase gazeuse et du gaz naturel en phase liquide cryogénique. Le brevet américain ne fait donc a fortiori pas référence au temps de rétention de ce fluide cryogénique s'évaporant dans la cuve.

[0009] Les normes de sécurité actuelles (en particulier celles données par l'«*American Society of Mechanical Engineers*», l'«*International Maritime Organization*»), l'«*Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route*», et l'«*International Maritime Dangerous Goods*») imposent aux constructeurs de cuves de calculer et de mesurer un temps de rétention maximal dans certaines conditions précises de remplissage, de température et de pression spécifiques à chaque norme. Ce temps de rétention maximal fait actuellement référence dans les études de dimensionnement de chaînes logistiques. Toutefois, il ne s'agit pas d'une information en temps réel concernant la durée d'autonomie de la cuve et l'absence de cette information en temps réel est problématique pour plusieurs raisons :

- on observe un manque de flexibilité dans la chaîne logistique : en effet, les temps de rétention maximaux sont calculés en amont de l'élaboration de la chaîne logistique. En cas d'imprévu, les clients ou les opérateurs n'ont pas d'outils à leur disposition pour les accompagner dans les choix à prendre ;
- la gestion du GNL hors équilibre n'est pas prise en compte : en effet, un GNL n'est pas nécessairement en état d'équilibre avec sa phase gazeuse, contrairement aux cas de figure pris en compte dans les normes actuelles. Un état de déséquilibre pourrait surprendre l'opérateur. Par exemple dans le cas d'un GNL sous-refroidi, l'augmentation de pression pourrait fortement s'accélérer une fois la température d'équilibre atteinte. Cette température d'équilibre est bien évidemment incalculable par l'opérateur ; Il est nécessaire que tous les opérateurs ayant à gérer du GNL reçoivent une formation adaptée à la manipulation de GNL et aux bonnes pratiques. C'est le cas des acteurs actuels du marché, qui sont en grande partie des professionnels ayant reçu une telle formation et qui sont également initiés aux bonnes pratiques. Mais cela est possible car le marché actuel du GNL carburant est de taille relativement faible. Néanmoins, si le marché venait à s'accroître rapidement, des acteurs moins formés se trouveraient mis en relation avec du GNL. Connaître le temps avant la mise à l'évent pourrait fortement aider ces nouveaux acteurs dans leur gestion du GNL.

[0010] En conclusion, l'objectif aujourd'hui est, pour assurer le développement du GNL comme carburant, de mettre en place une solution permettant de mieux prévoir son comportement en temps réel. L'obligation de travailler dans un carcan préétabli est un des verrous technologiques qui profitent actuellement à ses concurrents directs tel que le diesel.

[0011] Pour atteindre l'objectif susmentionné, le déposant a mis au point un procédé et système pour calculer en temps réel la durée d'autonomie d'une cuve non réfrigérée contenant du GNL, qui permettent de fournir instantanément la durée d'autonomie d'une cuve de GNL en fonction :

- d'une part des paramètres thermodynamiques du GNL mesurés à l'intérieur de la cuve par des capteurs à l'intérieur de la cuve (températures et compositions du liquide et du gaz, pression du GNL gazeux et proportion de GNL liquide dans la cuve), et
- d'autre part des données relatives à la cuve (forme, dimensions, pression de calibrage des soupapes de la cuve, et taux d'évaporation ou en anglais «*Boil Off Rate*» (BOR)).

[0012] La présente invention a donc pour objet un procédé pour calculer en temps réel la durée d'autonomie d'une cuve non réfrigérée et définie par une pression de tarage des soupapes P_{soup} , sa forme et ses dimensions, ainsi que son taux d'évaporation, (usuellement désigné en anglais par l'expression «*Boil Off Rate*» et l'acronyme correspondant BOR (données d'entrée relatives à la cuve), ladite cuve contenant du gaz naturel (GN) se répartissant en :

- une couche de gaz naturel à l'état liquide (GNL), définie à un instant t donné par sa température $T_{\text{liq}}(t)$, sa composition $x_{\text{liq}}(t)$, et le taux de remplissage de la cuve par ladite couche de gaz naturel à l'état liquide (paramètres thermodynamiques relatifs au GN à l'état liquide) ;
- une couche de gaz naturel à l'état gazeux (GNG), définie à un instant t donné par sa température $T_{\text{gaz}}(t)$ et sa composition $x_{\text{gaz}}(t)$, et une pression $p(t)$ (paramètres thermodynamiques relatifs au GN à l'état gazeux) ;

ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il consiste en un algorithme comportant les étapes suivantes :

A. à un instant t_0 , on procède à l'initialisation des paramètres physiques desdites couches de gaz naturel liquéfié, par mesure à l'aide de capteurs de pression et de température, de la pression du gaz $p(t_0)$, et la température du liquide $T_{\text{liq}}(t_0)$, tandis que les compositions respectives des phases liquide $x_{\text{liq}}(t_0)$ et gazeuse $x_{\text{gaz}}(t_0)$ sont des données d'entrée connues correspondant soit aux compositions respectives des phases liquide et gazeuse au moment du chargement de la cuve, soit à des compositions moyennes pour le type de GNL utilisé ;

B. pour chaque instant t supérieur à t_0 , on soustrait un volume V prédéterminé de gaz naturel à l'état gazeux ou liquide correspondant à l'état de fonctionnement de la cuve à cet instant t (si cette cuve est transportée par un véhicule à l'arrêt, $V=0$, sinon V correspond à la consommation du véhicule en GN) ; et on calcule, sur la base du volume de gaz naturel restant après soustraction, les paramètres physiques $p(t)$, $T_{\text{gaz}}(t)$, et $T_{\text{liq}}(t)$, à l'aide d'équations basées sur la conservation de la masse et de l'énergie du gaz naturel liquide et gazeux contenu dans la cuve ;

C. tant que la pression $p(t)$ est inférieure à P_{soup} , on réitère le calcul de l'étape B pour l'instant suivant $t+\delta t$, avec un pas de temps physique δt constant (notamment de l'ordre d'une minute, en fonction des flux de chaleur, et des constantes de temps des équilibres thermodynamiques).

D. dès qu'au cours de N itérations du processus de calcul de $p(t)$, $p(t+\delta t)$, ..., $p(t+N*\delta t)$, la pression $p(t+N*\delta t)$ devient égale ou supérieure à P_{soup} , on arrête le calcul ;

E. la durée d'autonomie recherchée est égale à la durée totale $N*\delta t$ parcourue par l'algorithme au moment de l'arrêt du calcul.

[0013] La cuve peut fonctionner en système ouvert (transportée dans ce cas par un véhicule en fonctionnement) ou fermé (transportée dans ce cas par un véhicule à l'arrêt ou non transportée).

[0014] Le procédé selon l'invention est illustré sur la figure 2.

[0015] En ce qui concerne les données d'entrée relatives à la cuve, celle-ci peut se présenter sous différentes formes, par exemple prismatique, cylindrique, ou encore sphérique. Ses dimensions peuvent être typiquement de l'ordre de 1,5 m de longueur et 0,5 m de diamètre pour une cuve cylindrique. La pression de tarage des soupapes de la cuve p_{soup} est donnée par le constructeur de la cuve de GNL. Elle est typiquement de l'ordre de 16 bars pour un réservoir de 300 litres de volume et peut même aller jusqu'à 25 bars.

[0016] Par taux d'évaporation (ou en anglais «*Boil Off Rate*»), on entend, au sens de la présente demande, le volume équivalent de liquide qui serait évaporé par jour à cause des entrées de chaleur dans le cas où la cuve serait ouverte. C'est également une valeur spécifique de la cuve, donnée habituellement par le constructeur.

[0017] En ce qui concerne les paramètres thermodynamiques relatifs au GN, on part de l'hypothèse que le gaz naturel liquéfié contenu dans la cuve se répartit en une couche de gaz naturel à l'état liquide et une couche de gaz naturel à l'état gazeux, comme illustré sur la figure 1. Chaque couche est définie à chaque instant t par sa température $T_{\text{liq}}(t)$ et

$T_{\text{gaz}}(t)$ (respectivement pour la couche de GNL à l'état liquide et la couche de GNL à l'état gazeux) et sa composition $x_{\text{liq}}(t)$ et $x_{\text{gaz}}(t)$ (respectivement pour la couche de GNL et la couche de GNG).

[0018] La phase gazeuse (c'est-à-dire la couche de gaz naturel à l'état gazeux) est de plus spécifiquement caractérisée par sa pression $p(t)$, qui est calculée à chaque instant t par l'équation d'état de Peng-Robinson^[1], tandis que la phase liquide (c'est à dire la couche de gaz naturel à l'état liquide) est de plus spécifiquement caractérisée par le taux de remplissage z de la cuve par la couche de gaz naturel à l'état liquide, qui est typiquement de l'ordre de 80 à 90% en volume après chargement de la cuve et en fin d'autonomie, de l'ordre de 10 à 20% en volume.

[0019] Les compositions $x_{\text{liq}}(t)$ et $x_{\text{gaz}}(t)$ sont des vecteurs donnant la fraction massique de chaque composant du GNL (usuellement la fraction massique de CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , iC_4H_{10} , nC_4H_{10} , iC_5H_{12} , nC_5H_{12} , nC_6H_{14} et N_2 dans chacune des phases gazeuse ou liquide du GNL). Il est à noter que la phase liquide et la phase gaz ne sont pas nécessairement en équilibre thermodynamique : en effet la compression de la phase gazeuse lors d'un remplissage peut induire un retard dans les échanges thermiques entre les deux phases (liquide à l'état sur-refroidi).

[0020] Le procédé de calcul selon l'invention consiste en un algorithme (ou code de comportement du GN) comportant différentes étapes A à D. Ce code (ou algorithme) prend en compte plusieurs phénomènes physiques (détaillés ci-après), qui impactent la pression :

- Compressibilité du gaz,
- Entrée de chaleur par conduction,
- Entrée de chaleur par rayonnement,
- Evaporation du GNL.

[0021] Le code de comportement du GN est de type itératif, c'est-à-dire qu'il calcule l'évolution de la pression à chaque pas de temps physique δt jusqu'à ouverture des soupapes.

[0022] La première (étape A) consiste en l'initialisation, à un instant initial t_0 , des paramètres physiques desdites couches de gaz naturel liquéfié, par mesure (en continu) à l'aide de capteurs de pression et de température, de la pression du gaz $p(t_0)$, et la température du liquide $T_{\text{liq}}(t_0)$. Par contre, les compositions respectives des phases liquide $x_{\text{liq}}(t_0)$ et gazeuse $x_{\text{gaz}}(t_0)$ sont des données d'entrée connues correspondant soit aux compositions respectives des phases liquide et gazeuse au moment du chargement de la cuve, soit à des compositions moyennes pour le type de GNL utilisé.

[0023] Puis, pour chaque instant t supérieur à t_0 , on soustrait un volume V prédéterminé de gaz naturel à l'état gazeux ou liquide correspondant à l'état de fonctionnement de la cuve ; puis on calcule, lors de l'étape B, les paramètres physiques $p(t)$, $T_{\text{gaz}}(t)$, et $T_{\text{liq}}(t)$, à l'aide d'équations basées sur la conservation de la masse et de l'énergie du gaz naturel liquide et gazeux contenu dans la cuve.

[0024] Ces équations, qui sont détaillées ci-après, se basent sur l'hypothèse que l'on considère la cuve non réfrigérée comme étant un système fermé : les équations de conservation de masse sont donc complémentaires entre la phase gaz et la phase liquide, et l'évaporation de surface est considérée comme le seul phénomène permettant un transfert de masse.

[0025] Le calcul de la masse de liquide est réalisé en prenant en compte le taux de remplissage z de la cuve par le gaz naturel et la masse volumique du GNL à la température du liquide $T_{\text{liq}}(t)$.

[0026] L'évolution de la masse de la phase gazeuse peut être donnée par la relation (1) :

$$(1) \quad \frac{\partial}{\partial t} m_i = \dot{m}_{Ev} * x_{Ev,liq,i}$$

avec :

- m_i désignant le débit massique d'un composant i du gaz naturel (voir plus loin le paragraphe relatif à l'évaporation de surface dans la partie de la description décrivant les phénomènes physiques à prendre en considération dans la loi de comportement), et
- $x_{Ev,liq,i}$ désignant la fraction massique du composant i associé à l'évaporation du GNL à la surface libre de la couche liquide (en d'autres termes, l'interface entre les faces liquide et gazeuse).

[0027] L'équation de conservation d'énergie utilisée pour la phase liquide peut être donnée par la relation (2) :

$$(2) \quad \frac{\partial}{\partial t} h_{liq} = \phi_{liq}^{Cond} + \phi_{Ray} - \phi_{Ev}$$

avec :

- h_{liq} désignant l'enthalpie totale de la phase liquide,
- Φ désignant le flux de chaleur associée à chaque phénomène agissant sur le GNL :
 - Φ_{liq}^{Cond} désignant en particulier les entrées de chaleur parasites par conduction à travers les parois mouillées de la cuve (côté et fond),
 - Φ_{Ray} désignant en particulier le rayonnement incident de la phase gazeuse (couche supérieure de la cuve), et
 - Φ_{EV} désignant le flux de GNL évaporé à la surface libre de la couche de GNL liquide.

[0028] L'équation de conservation d'énergie de la phase gazeuse peut être donnée par la relation (3) :

$$(3) \quad \frac{\partial}{\partial t} h_{gaz} = \phi_{Ev} + \phi_{Cond}^{gaz}$$

avec :

- h_{gaz} désignant l'enthalpie totale de la phase gazeuse, et
- Φ_{Ev} étant tel que défini ci-dessus, et
- Φ_{Cond}^{gaz} désignant en particulier les entrées de chaleur parasites par conduction à travers les parois sèches de la cuve (côté et fond).

[0029] Comme déjà indiqué précédemment, la pression $p(t)$ de la phase gazeuse peut être calculée par l'équation de Peng-Robinson^[1].

[0030] Les températures du gaz et du liquide, respectivement $T_{gaz}(t)$ et $T_{liq}(t)$, peuvent être déterminées par la capacité thermique à volume constant C_v de chaque phase, qui peut être donnée par la relation (4) :

$$(4) \quad T(t) = \frac{h}{C_v}$$

avec :

- $T(t)$ désignant la température de la phase considérée calculée à l'instant t ,
- h désignant l'enthalpie de la phase considérée, et
- C_v la capacité thermique à volume constant de la phase considérée.

[0031] Les principaux phénomènes physiques impactant la pression $p(t)$, qui sont pris en compte dans le calcul de la durée d'autonomie de la cuve selon le procédé selon invention, peuvent notamment comprendre la compressibilité du gaz, l'entrée de la chaleur par conduction, l'entrée de chaleur par rayonnement, et l'évaporation du GNL. Ces phénomènes sont détaillés ci-après :

Evaporation de surface

[0032] On considère que les échanges de chaleur et de masse entre la phase liquide et la phase gaz sont pilotés par une loi d'évaporation surfacique, dont le moteur est la différence de température entre le coeur du GNL stocké à l'état liquide et sa surface libre. La pression $p(T)$ dans la phase gazeuse de la cuve affecte l'évaporation de surface en influençant la température d'équilibre du GN à la surface liquide/vapeur correspondant à cette pression. La température de la surface libre du GNL est supposée égale à la température d'équilibre du GNL.

[0033] L'évaporation dans une cuve de GN au repos est un phénomène local qui se produit en surface. Le changement de phase est relativement "doux" (c'est-à-dire sans ébullition et dans une couche limite relativement mince) et se produit sans ébullition. On peut utiliser dans l'algorithme du procédé selon l'invention une loi basée sur les lois de convection naturelle turbulente, qui peut notamment être de la forme^[2] :

$$(5) \quad q_{ev} = K \cdot (\Delta T_{surchauffe})^\alpha$$

avec :

- K désignant une constante relative au GNL qui est toujours positive,
- $\Delta T_{\text{surchauffe}}$ désignant la surchauffe se produisant lors du phénomène d'évaporation dans la cuve de GNL,
- Q_{ev} désignant le débit d'évaporation normalisé de GNL, et
- α désignant un coefficient relatif au GNL, avec $1 \leq \alpha \leq 2$.

Conduction thermique au niveau des parois

[0034] Pour les échanges thermiques avec la paroi, on peut considérer un flux pariétal uniforme et constant. La valeur du flux est une grandeur d'entrée du calcul, il est relié directement au taux d'évaporation (usuellement désigné en anglais par l'expression « *Boil Off Rate* » ou l'acronyme correspondant BOR) selon les critères des constructeurs.

Rayonnement thermique des parois

[0035] Des parois verticales non mouillées peuvent également être le siège de flux thermiques, qui ont pour effet de réchauffer la phase gazeuse, mais aussi de contribuer au réchauffement du liquide par rayonnement.

[0036] Pour prendre en compte la contribution de la phase gazeuse dans le réchauffement du liquide, on peut utiliser un modèle simple établissant un bilan de rayonnement sur toutes les surfaces, c'est-à-dire la surface libre du GNL (interface) et les surfaces non mouillées de la cuve (surfaces de la cuve en contact uniquement la phase gazeuse du GN dans la cuve). Les hypothèses de ce modèle sont détaillées ci-dessous :

- la surface libre est supposée plane à la température de saturation du GNL. Cette surface est d'autre part supposée noire avec $\varepsilon = a = 1$, $\rho = 0$, ε étant l'émissivité, a le facteur d'absorption, et ρ désignant le facteur de réflexion,
- les parois verticales de la cuve sont supposées se trouver à une température constante. Ces surfaces sont également supposées grises avec une émissivité constante $\varepsilon = \alpha = \text{cte}$, $\rho = 1 - \alpha$,
- le gaz est supposé transparent au rayonnement des parois.

[0037] On peut utiliser, pour chacune des surfaces impliquées, l'équation de radiosité pour régir ces échanges :

$$(6) \quad \Phi_{\text{net}} = \text{Surface} \times (\text{Rayonnement renvoyé} - \text{Rayonnement incident}) = S \times (J - E)$$

où :

- E désigne l'éclairement (ou flux incident) et
- J désigne la radiosité qui s'exprime comme $(\varepsilon \sigma T^4 + \rho E)$;
- S_{Surface} désigne l'aire de la surface impliquée ;
- Φ_{net} signifie le flux net reçu par cette surface.

[0038] Ainsi, de manière avantageuse, le calcul à l'étape B des paramètres physiques $p(t)$, $T_{\text{gaz}}(t)$, et $T_{\text{liq}}(t)$ peut être réalisé selon les étapes définies comme suit.

- la température de la phase liquide $T_{\text{liq}}(t)$ et de la phase gazeuse $T_{\text{gaz}}(t)$ sont directement déterminées à partir de l'équation de conservation de l'énergie, avec comme données d'entrée les capacités thermiques du gaz naturel à l'état liquide et du gaz naturel à l'état gazeux, l'isolation thermique de la cuve définie par le constructeur de la cuve et les températures à l'instant $t-\delta t$ du GNL et du GNG,
- la masse de liquide évaporée dans la phase gazeuse est déterminée par la relation (5) en fonction de la température du liquide et de la pression déterminée à l'étape précédente à l'instant $t-\delta t$:

$$(7) \quad q_{\text{ev}} = K \cdot (\Delta T_{\text{surchauffe}})^{\alpha}$$

avec :

- K désignant une constante relative au GNL et étant toujours positif,
- $\Delta T_{\text{surchauffe}}$ désignant la surchauffe se produisant lors du phénomène d'évaporation dans la cuve de GNL,

- Q_{ev} désignant le débit d'évaporation normalisé de GNL, et
- α désignant un coefficient relatif au GNL, avec $1 \leq \alpha \leq 2$;
- un 2 coefficient relatif au GNL, avec $1 \leq \alpha \leq 2$;

- 5 • la pression $p(t)$ de la phase gazeuse est obtenue par l'équation de Peng-Robinson, avec comme données d'entrée la masse de liquide évaporée, le volume de la cuve et la température du gaz à l'instant t .

[0039] Au cours de l'étape C de l'algorithme du procédé selon l'invention, on réitère le calcul de l'étape B, en recommençant, pour l'instant suivant $t+\delta t$ (avec un pas de temps physique δt constant), les équations de conservation de masse et d'énergie tant que la pression $p(t)$ est inférieure à p_{sout} . Ce pas de temps δt peut être de l'ordre d'une minute. Sa valeur dépend des flux de chaleur, des constantes de temps des équilibres thermodynamiques.

10 [0040] Dès qu'au cours de N itérations du processus de calcul de $p(t)$, $p(t+\delta t)$, ..., $p(t+N*\delta t)$, la pression $p(t+N*\delta t)$ de la phase gazeuse à l'instant $t+N*\delta t$ devient égale ou supérieure à la pression d'ouverture des soupapes p_{sout} , l'algorithme se termine (étape D) et renvoie la durée totale parcourue par l'algorithme (étape E), qui est égale à la durée totale $N*\delta t$ parcourue par l'algorithme au moment de l'arrêt du calcul.

15 [0041] Un opérateur, connaissant cette durée pourra en déduire la durée d'autonomie de la cuve, c'est à dire le temps de rétention (ou temps de stockage) restant d'un GNL dans la cuve avant ouverture des soupapes de la cuve.

[0042] De manière avantageuse, on réitère, dans le procédé selon l'invention, l'ensemble des étapes A à D dès qu'un intervalle de temps ΔT (défini en fonction de la technologie du calculateur) s'est écoulé afin de recalculer la durée d'autonomie à l'instant $t_0 + \Delta T$. Typiquement, cet intervalle de temps pourra être de l'ordre de 1 minute, mais pourra varier en fonction de la technologie utilisée (calculateur, interface IHM notamment).

20 [0043] De manière avantageuse, l'algorithme (ou code de comportement GN) du procédé selon l'invention pourra être mis en oeuvre au moyen d'un calculateur connecté à une interface IHM permettant d'informer un opérateur sur cette durée d'autonomie. Grâce au calculateur connecté à une interface IHM, un calcul physique de la durée d'autonomie pourra être réalisé tous les intervalles de temps ΔT (variables en fonction de la technologie utilisée, par exemple toutes les minutes) et le résultat de ce calcul pourra être transmis à l'IHM.

[0044] Comme indiqué précédemment, différents types de données doivent être fournis au calculateur :

- 30 - données relatives à la cuve (à rentrer une seule fois par l'utilisateur) :

- forme de la cuve (prismatique, cylindrique, sphérique, ...),
- dimensions de la cuve,
- taux d'évaporation (ou BOR) de la cuve,
- évaluation des entrées de chaleur (donnée constructeur), et
- 35 • la pression de calibrage des soupapes p_{sout} .

- composition du GN (à rentrer au début de chargement de la cuve ou utilisation d'une composition moyenne), et

- 40 - données fournies par les capteurs (en continu) : Température du gaz et du liquide et Pression du gaz.

[0045] La présente invention a donc également pour objet un système pour calculer en temps réel la durée d'autonomie d'une cuve non réfrigérée, dans lequel l'algorithme est mis en oeuvre au moyen d'un calculateur calculant la durée d'autonomie de la cuve, la cuve étant définie par une pression de tarage des soupapes P_{sout} , sa forme et ses dimensions, ainsi que son taux d'évaporation, ledit système selon l'invention comportant :

- 45 - une cuve contenant du gaz naturel liquéfié se répartissant en :

- une couche de gaz naturel à l'état liquide, définie à un instant t donné par sa température $T_{liq}(t)$, sa composition $x_{liq}(t)$, et le taux de remplissage de la cuve par ladite couche de gaz naturel ; et
- 50 ◦ une couche de gaz naturel à l'état gazeux, définie à un instant t donné par sa température $T_{gaz}(t)$ et sa composition $x_{gaz}(t)$, et une pression $p(t)$;

- des capteurs de pression et de température,

55 ledit système étant caractérisé en ce qu'il comporte en outre :

- un calculateur connecté auxdits capteurs de pression et de température, ledit calculateur étant apte à exécuter l'algorithme du procédé tel que défini selon l'invention,

- une interface IHM interagissant avec ledit calculateur, pour remonter à un opérateur la durée d'autonomie calculée selon l'algorithme (ou code de comportement GNL) du procédé selon l'invention lorsqu'il est mis en oeuvre au moyen d'un calculateur connecté à une interface IHM.

[0046] A titre d'interfaces IHM (acronyme signifiant Interface Homme Machine) utilisables dans le cadre de la présente invention, on peut notamment citer les tableaux de bord de véhicules, les claviers d'ordinateur, les voyants LED, les écrans tactiles, et les tablettes.

[0047] Selon un mode de réalisation avantageux du système selon l'invention, ledit système selon l'invention est un système embarqué dans lequel :

- le calculateur est un calculateur embarqué connecté auxdits capteurs de pression et de température, ledit calculateur étant spécifiquement conçu pour exécuter l'algorithme du procédé selon l'invention,
- l'interface IHM peut être également embarquée ou alternativement déportée si par exemple le véhicule est connecté à une centrale de contrôle.
- Cette interface IHM, si elle est embarquée, peut être de type tableau de bord embarqué de véhicule, interagissant spécifiquement avec ledit calculateur embarqué pour remonter à l'opérateur (ici le conducteur) la durée d'autonomie calculée selon le procédé de l'invention.

[0048] Par calculateur spécifiquement conçu pour exécuter l'algorithme du procédé selon l'invention, on entend, au sens de la présente invention, un ordinateur de bord comprenant un processeur associé à une mémoire de stockage dédiée et à une carte mère d'interfaces ; l'ensemble de ces éléments étant assemblés de manière à assurer la robustesse de l'ensemble « ordinateur de bord » en termes de résistance mécanique, thermodynamique et électromagnétique, et ainsi permettre son adaptation à une utilisation dans un véhicules GNL.

[0049] Concrètement, le calculateur peut comprendre en outre un écran et un clavier. Il est connecté à deux capteurs, un de pression et un de température, qui fournissent l'information de l'état du GNL à l'intérieur de la cuve (voir figure 1).

[0050] Le système selon l'invention est illustré par la figure 2.

[0051] La présente invention a encore pour objet un véhicule (terrestre, maritime ou aérien) comportant une cuve de GNL et un système selon l'invention, la cuve et le système étant tels que définis précédemment. La durée d'autonomie, qui est la donnée intéressant l'opérateur (par exemple le conducteur du véhicule ou un opérateur à distance), peut par exemple être avantageusement affichée au niveau du tableau de bord d'un véhicule et/ou sur le côté du véhicule.

[0052] La présente invention présente donc les multiples avantages suivants :

- le fait d'avoir une information de durée de rétention d'une cuve GNL quelconque de manière instantanément.
- prendre en compte la qualité du GNL dans le calcul, ce qui n'est pas le cas avec les normes actuelles où le méthane pur sert de référence.
- pouvoir gérer des GNL hors équilibre.
- rendre en compte la compressibilité du ciel gazeux.

[0053] D'autres avantages et particularités de la présente invention résulteront de la description qui va suivre, donnée à titre d'exemple non limitatif et faite en référence aux figures annexées :

- o la figure 1 représente un schéma de principe d'une cuve 1 de GN selon l'invention ;
- o la figure 2 représente un schéma de principe du système selon l'invention,
- o la figure 3 représente un schéma de principe du procédé selon l'invention,
- o Les figures 4 à 8 sont des captures d'écrans de tableaux de bord de véhicules transportant chacun une cuve de GN non réfrigérée.

[0054] La figure 1 montre schématiquement une cuve 1 de GNL, qui est modélisée par un système bicouche avec deux couches homogènes de GN, une couche liquide 1 (GNL) et une couche gazeuse g (GNG).

[0055] La figure 2 un schéma de principe du système selon l'invention, comportant :

- une cuve 1 contenant du gaz naturel liquéfié se répartissant en
 - o une couche de gaz naturel à l'état liquide 1 ($T_{liq}(t)$, $x_{liq}(t)$, et taux de remplissage z de la cuve 1 par la couche de gaz naturel à l'état liquide) ;
 - o une couche de gaz naturel g à l'état gazeux g ($T_{gaz}(t)$, $x_{gaz}(t)$ et $p(t)$);
- des capteurs de pression 3 et de température 4,

- un calculateur 5 connecté auxdits capteurs de pression 3 et de température 4, le calculateur étant apte à exécuter l'algorithme du procédé tel que défini selon la revendication 4,
- une interface IHM 6 interagissant avec le calculateur, pour remonter à un opérateur 7 donné la durée d'autonomie calculée selon le procédé de la revendication 4.

[0056] La figure 3 un schéma de principe du procédé selon l'invention, montrant les différentes étapes du procédé comme décrit précédemment.

[0057] Les figures 4 à 8 sont des captures d'écrans de tableaux de bord de véhicules transportant chacun une cuve de GNL non réfrigérées.

[0058] En particulier, la figure 4 est une capture d'écran d'un tableau bord montrant les données d'entrée spécifiques à la cuve (dimensions, taux d'évaporation, pression maximale autorisée). Ces données sont communes à tous les exemples décrits ci-après.

[0059] La figure 5 est une capture d'écran d'un tableau bord montrant, pour un premier exemple de calcul selon le procédé de calcul selon l'invention, les données d'entrée spécifiques à un GNL (composition, température, pression et taux de remplissage z). Dans cet exemple, le GNL est légèrement surchauffé : température de -160°C alors que la température d'équilibre pour ce GNL est de $-162,31^{\circ}\text{C}$.

[0060] La figure 6 est une capture d'écran d'un tableau bord montrant, pour un deuxième exemple de calcul selon le procédé de calcul selon l'invention, les données d'entrée spécifiques à un GNL (composition, température, pression et taux de remplissage z). Dans cet exemple, le GNL est légèrement surrefroidi : température de -157°C alors que la température d'équilibre pour ce GNL est de $-154,17^{\circ}\text{C}$.

[0061] Les figures 7 et 8 sont des captures d'écran donnant, respectivement pour chacun des premier (données des figures 4 et 5) et deuxième exemples (données des figures 4 et 6), la durée d'autonomie calculée de la cuve non réfrigérée transportée par le véhicule.

Liste des références

[0062]

[1] Peng, D. Y. (1976). A New Two-Constant Equation of State. Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals, 15: 59-64.

[2] H.T Hashemi, H. W. (1971). CUT LNG STORAGE COSTS. Hydrocarbon Processing, 117-120.

Revendications

1. Procédé pour calculer en temps réel la durée d'autonomie d'une cuve non réfrigérée et définie par une pression de tarage des soupapes P_{soup} , sa forme et ses dimensions, ainsi que son taux d'évaporation, ladite cuve contenant du gaz naturel se répartissant en :

- une couche de gaz naturel à l'état liquide (l), définie à un instant t donné par sa température $T_{\text{liq}}(t)$, sa composition $x_{\text{liq}}(t)$, et le taux de remplissage de la cuve par ladite couche de gaz naturel ;
- une couche de gaz naturel à l'état gazeux (g), définie à un instant t donné par sa température $T_{\text{gaz}}(t)$ et sa composition $x_{\text{gaz}}(t)$, et une pression $p(t)$;

ledit procédé étant **caractérisé en ce qu'il** consiste en un algorithme comportant les étapes suivantes :

A. à un instant t_0 , on procède à l'initialisation des paramètres physiques desdites couches de gaz naturel, par mesure à l'aide de capteurs de pression et de température, de la pression du gaz $p(t_0)$, et la température du liquide $T_{\text{liq}}(t_0)$; tandis que les compositions respectives des phases liquide $x_{\text{liq}}(t_0)$ et gazeuse $x_{\text{gaz}}(t_0)$ sont des données d'entrée connues correspondant soit aux compositions respectives des phases liquide et gazeuse au moment du chargement de la cuve, soit à des compositions moyennes pour le type de GNL utilisé ;

B. pour chaque instant t supérieur à t_0 , on soustrait un volume prédéterminé de gaz naturel à l'état gazeux ou liquide, ledit volume correspondant à l'état de fonctionnement de la cuve à cet instant t ; et on calcule, sur la base du volume de gaz naturel restant après soustraction, les paramètres physiques $p(t)$, $T_{\text{gaz}}(t)$, et $T_{\text{liq}}(t)$, à l'aide d'équations basées sur la conservation de la masse et de l'énergie du gaz naturel liquide et gazeux contenu dans la cuve ;

C. tant que la pression $p(t)$ est inférieure à P_{soup} , on réitère le calcul de l'étape B pour l'instant suivant $t+\delta t$, avec un pas de temps physique δt constant.

D. dès qu'au cours de N itérations du processus de calcul de $p(t)$, $p(t+\delta t)$, ..., $p(t+N*\delta t)$, la pression $p(t+N*\delta t)$ devient égale ou supérieure à P_{soup} , on arrête le calcul ;

E. la durée d'autonomie recherchée est égale à la durée totale $N*\delta t$ parcourue par l'algorithme au moment de l'arrêt du calcul.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel on réitère l'ensemble des étapes A à D dès qu'un intervalle de temps ΔT s'est écoulé, afin de recalculer la durée d'autonomie à l'instant $t_0+\Delta T$.

3. Procédé selon la revendication 1, dans lequel le calcul à l'étape B des paramètres physiques $p(t)$, $T_{\text{gaz}}(t)$, et $T_{\text{liq}}(t)$ est réalisé selon les étapes définies comme suit.

- la température de la phase liquide $T_{\text{liq}}(t)$ et de la phase gazeuse $T_{\text{gaz}}(t)$ sont directement déterminées à partir de l'équation de conservation de l'énergie, avec comme données d'entrée les capacités thermiques du gaz naturel à l'état liquide et du gaz naturel à l'état gazeux, l'isolation thermique de la cuve définie par le constructeur de la cuve et les températures à l'instant $t-\delta t$ du GNL liquide et du GNL gazeux,

- la masse de liquide évaporée dans la phase gazeuse est déterminée par la relation (5) en fonction de la température du liquide et de la pression déterminée à l'étape précédente à l'instant $t-\delta t$:

$$(8) \quad q_{\text{ev}} = K \cdot (\Delta T_{\text{surchauffe}})^{\alpha}$$

avec :

- K désignant une constante relative au GNL et étant toujours positif,
- $\Delta T_{\text{surchauffe}}$ désignant la surchauffe se produisant lors du phénomène d'évaporation dans la cuve de GNL,
- Q_{ev} désignant le débit d'évaporation normalisé de GNL, et
- α désignant un coefficient relatif au GNL, avec $1 \leq \alpha \leq 2$;
- un 2 coefficient relatif au GNL, avec $1 \leq a \leq 2$;

- la pression $p(t)$ de la phase gazeuse est obtenue par l'équation de Peng-Robinson, avec comme données d'entrée la masse de liquide évaporée, le volume de la cuve et la température du gaz à l'instant t .

4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel l'algorithme est mis en oeuvre au moyen d'un calculateur calculant la durée d'autonomie de la cuve, ledit calculateur étant connecté à une interface IHM permettant d'informer un opérateur sur cette durée d'autonomie.

5. Système pour calculer en temps réel, selon le procédé tel que défini selon la revendication 3, la durée d'autonomie d'une cuve non réfrigérée et définie par une pression de tarage des soupapes P_{soup} , sa forme et ses dimensions, ainsi que son taux d'évaporation, ledit système comportant :

- une cuve contenant du gaz naturel liquéfié se répartissant en :

- o une couche de gaz naturel à l'état liquide, définie à un instant t donné par sa température $T_{\text{liq}}(t)$, sa composition $x_{\text{liq}}(t)$, et le taux de remplissage de la cuve par ladite couche de gaz naturel à l'état liquide ;
- o une couche de gaz naturel à l'état gazeux, définie à un instant t donné par sa température $T_{\text{gaz}}(t)$ et sa composition $x_{\text{gaz}}(t)$ et une pression $p(t)$;

- des capteurs de pression et de température,

ledit système étant **caractérisé en ce qu'il** est un système embarqué comportant en outre :

- un calculateur (5) embarqué connecté auxdits capteurs de pression (3) et de température (4), ledit calculateur étant conçu pour exécuter l'algorithme du procédé tel que défini selon la revendication 4,
- une interface IHM (6), de type tableau de bord embarqué de véhicule, interagissant spécifiquement avec ledit calculateur (5) embarqué, pour remonter à un opérateur (7) la durée d'autonomie calculée selon le procédé de

la revendication 4.

6. Véhicule comportant une cuve GN et un système tel que défini selon la revendication 5.

Patentansprüche

1. Verfahren, um in Echtzeit die Autonomiedauer eines Tanks zu berechnen, der nicht gekühlt wird und durch einen Tarierdruck der Ventile p_{soup} , seine Form und seine Abmessungen sowie seine Verdunstungsrate definiert ist, wobei der Tank Erdgas enthält, das sich aufteilt in:

- eine Schicht Erdgas im flüssigen Zustand (1), die zu einem gegebenen Zeitpunkt t durch ihre Temperatur $T_{\text{liq}}(t)$, ihre Zusammensetzung $x_{\text{liq}}(t)$, und die Füllrate des Tanks durch die Erdgasschicht definiert ist;
- eine Schicht Erdgas im gasförmigen Zustand (g), die zu einem gegebenen Zeitpunkt t durch ihre Temperatur $T_{\text{gat}}(t)$ und ihre Zusammensetzung $x_{\text{gas}}(t)$ und einen Druck $p(t)$ definiert ist;

wobei das Verfahren **dadurch gekennzeichnet ist, dass** es in einem Algorithmus besteht, der die folgenden Schritte umfasst:

- A. zu einem Zeitpunkt t_0 wird die Initialisierung der physikalischen Parameter der Erdgasschichten durch Messung des Drucks des Gases $p(t_0)$ und der Temperatur der Flüssigkeit $T_{\text{liq}}(t_0)$ mithilfe von Druck- und Temperatursensoren vorgenommen; wohingegen die jeweiligen Zusammensetzungen der flüssigen $x_{\text{liq}}(t_0)$ und gasförmigen Phase $x_{\text{gas}}(t_0)$ bekannte Eingangsdaten sind, die entweder den jeweiligen Zusammensetzungen der flüssigen und gasförmigen Phase zum Zeitpunkt der Befüllung des Tanks, oder durchschnittlichen Zusammensetzungen für den verwendeten LNG-Typ entsprechen;
- B. für jeden Zeitpunkt t , der größer ist als t_0 , wird ein vorbestimmtes Volumen Erdgas im gasförmigen oder flüssigen Zustand subtrahiert, wobei das Volumen dem Betriebszustand des Tanks zu diesem Zeitpunkt t entspricht; und es werden, auf der Basis des Erdgasvolumens, das nach Subtraktion verbleibt, die physikalischen Parameter $p(t)$, $T_{\text{gas}}(t)$ und $T_{\text{liq}}(t)$ mithilfe von Gleichungen berechnet, die auf der Erhaltung der Masse und der Energie des im Tank enthaltenen flüssigen und gasförmigen Erdgases basieren;
- C. solange der Druck $p(t)$ kleiner ist als p_{soup} wird die Berechnung aus dem Schritt B für den folgenden Zeitpunkt $t+\delta t$ mit einem konstanten physikalischen Zeitschritt δt wiederholt;
- D. sobald im Laufe von N Wiederholungen des Prozesses zur Berechnung von $p(t)$, $p(t+\delta t)$, ..., $p(t+N\delta t)$ der Druck $p(t+N\delta t)$ gleich oder größer wird als p_{soup} , wird die Berechnung gestoppt;
- E. die gesuchte Autonomiedauer ist gleich der zum Zeitpunkt des Stopps der Berechnung vom Algorithmus durchlaufenen Gesamtdauer $N\delta t$.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Gesamtheit der Schritte A bis D wiederholt wird, sobald ein Zeitintervall ΔT verstrichen ist, um die Autonomiedauer zum Zeitpunkt $T_0 + \Delta T$ neu zu berechnen.
3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Berechnung der physikalischen Parameter $p(t)$, $T_{\text{gas}}(t)$ und $T_{\text{liq}}(t)$ im Schritt B nach den wie folgt definierten Schritten ausgeführt wird

- die Temperatur der flüssigen Phase $T_{\text{liq}}(t)$ und der gasförmigen Phase $T_{\text{gat}}(t)$ wird direkt auf Grundlage der Energieerhaltungsgleichung bestimmt, mit den Wärmekapazitäten des Erdgases im flüssigen Zustand und des Erdgases im gasförmigen Zustand, der vom Hersteller des Tanks definierten Wärmeisolation des Tanks und den Temperaturen zum Zeitpunkt $t-\delta t$ des flüssigen LNG und des gasförmigen LNG als Eingangsdaten,
- die Masse verdunsteter Flüssigkeit in der gasförmigen Phase wird über die Beziehung (5) in Abhängigkeit von der Temperatur der Flüssigkeit und dem im vorhergehenden Schritt zum Zeitpunkt $t-\delta t$ bestimmten Druck bestimmt:

$$(8) \quad q_{\text{ev}} = K \cdot (\Delta T_{\text{surchauffe}})^{\alpha}$$

wobei:

- K eine Konstante bezeichnet, die sich auf das LNG bezieht und immer positiv ist,
- $\Delta T_{\text{surchauffe}}$ die Überhitzung bezeichnet, zu der es beim Verdunstungsphänomen im LNG-Tank kommt,

- Q_{ev} den normalisierten Verdunstungsstrom von LNG bezeichnet, und
- α einen Koeffizienten bezeichnet, der sich auf das LNG bezieht, wobei $1 \leq \alpha \leq 2$;
- einem Koeffizienten, der sich auf das LNG bezieht, wobei $1 \leq \alpha \leq 2$;

- der Druck $p(t)$ der gasförmigen Phase wird über die Peng-Robinson-Gleichung erhalten, mit der Masse verdunsteter Flüssigkeit, dem Volumen des Tanks und der Temperatur des Gases zum Zeitpunkt t als Eingangsdaten.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei der Algorithmus mittels eines Rechners umgesetzt wird, der die Autonomiedauer des Tanks berechnet, wobei der Rechner mit einer HCI-Schnittstelle verbunden ist, die es ermöglicht, einen Bediener über diese Autonomiedauer zu informieren.

5. System, um in Echtzeit nach dem Verfahren wie in Anspruch 3 definiert die Autonomiedauer eines Tanks zu berechnen, der nicht gekühlt wird und durch einen Trieredruck der Ventile p_{soup} , seine Form und seine Abmessungen sowie seine Verdunstungsrate definiert ist, wobei das System umfasst:

- einen Tank, der Flüssigerdgas enthält, das sich aufteilt in:

-- eine Schicht Erdgas im flüssigen Zustand, die zu einem gegebenen Zeitpunkt t durch ihre Temperatur $T_{liq}(t)$, ihre Zusammensetzung $x_{liq}(t)$, und die Füllrate des Tanks durch die Erdgasschicht im flüssigen Zustand definiert ist;

-- eine Schicht Erdgas im gasförmigen Zustand, die zu einem gegebenen Zeitpunkt t durch ihre Temperatur $T_{gat}(t)$ und ihre Zusammensetzung $x_{gas}(t)$ und einen Druck $p(t)$ definiert ist;

- Druck- und Temperatursensoren,

wobei das System **dadurch gekennzeichnet ist, dass** es ein Bordsystem ist, welches weiter umfasst:

- einen Bordrechner (5), der mit den Druck- (3) und Temperatursensoren (4) verbunden ist, wobei der Rechner dafür konzipiert ist, den Algorithmus des Verfahrens wie in Anspruch 4 definiert auszuführen,

- eine HCI-Schnittstelle (6) vom Typ eines Armaturenbretts an Bord eines Fahrzeugs, die spezifisch mit dem Bordrechner (5) interagiert, um einem Bediener (7) die nach dem Verfahren aus Anspruch 4 berechnete Autonomiedauer mitzuteilen.

6. Fahrzeug, das einen NG-Tank und ein System wie in Anspruch 5 definiert umfasst.

Claims

1. Method for calculating in real time, the autonomy duration of a non-refrigerated tank and defined by a setting pressure of the valves p_{valve} , the shape thereof and the dimensions thereof, as well as the evaporation rate thereof, said tank containing natural gas being distributed in:

- a natural gas layer in a liquid state (1), defined at a given instant t by the temperature thereof $T_{liq}(t)$, the composition $x_{liq}(t)$, and the filling rate of the tank by said natural gas layer;

- a natural gas layer in the gaseous state (g), defined at a given instant t by the temperature thereof $T_{gas}(t)$ and the composition thereof $x_{gas}(t)$, and a pressure $p(t)$;

said method being **characterised in that** it consists of an algorithm comprising the following steps:

A. at an instant t_0 , the initialisation of the physical parameters of said natural gas layers is proceeded with, by measuring using pressure and temperature sensors, of the pressure of the gas $p(t_0)$, and the temperature of the liquid $T_{liq}(t_0)$; while the respective compositions of the liquid $x_{liq}(t_0)$ and gaseous $x_{gas}(t_0)$ phases are known input data corresponding, either to the respective compositions of the liquid and gaseous phases at the time of loading the tank, or to average compositions for the LNG type used;

B. for each instant t greater than t_0 , a predetermined volume of natural gas in the gaseous or liquid state is subtracted, said volume corresponding to the functioning state of the tank at this instant t ; and based on the volume of natural gas remaining after subtraction, the physical parameters $p(t)$, $T_{gas}(t)$, and $T_{liq}(t)$ are calculated,

using equations based on conserving the mass and the energy of the liquid and gaseous natural gas contained in the tank;

C. while the pressure $p(t)$ is less than p_{valve} , the calculation of step B is reiterated for the instant following $t+\delta t$, with a constant physical time step δt ;

D. as soon as during N iterations of the process for calculating $p(t)$, $p(t+\delta t)$, ..., $p(t+N\delta t)$, the pressure $p(t+N\delta t)$ becomes equal to or greater than p_{valve} the calculation is stopped;

E. the autonomy duration sought is equal to the total duration $N\delta t$ covered by the algorithm at the time of stopping the calculation.

2. Method according to claim 1, wherein all of steps A to D are repeated as soon as a time interval ΔT has passed, in order to recalculate the autonomy duration at the instant $t_0+\Delta T$.

3. Method according to claim 1, wherein the calculation at step B of the physical parameters $p(t)$, $T_{\text{gas}}(t)$, and $T_{\text{liq}}(t)$ is carried out according to the steps defined as follows:

- the temperature of the liquid phase $T_{\text{liq}}(t)$ and the gaseous phase $T_{\text{gas}}(t)$ are directly determined from the equation for conserving energy, with, as input data, the thermal capacities of the natural gas in the liquid state and of the natural gas in the gaseous state, the thermal insulation of the tank defined by the manufacturer of the tank and the temperatures at the instant $t-\delta t$ of the liquid LNG and of the gaseous LNG,

- the liquid mass evaporated in the gaseous phase is determined by the ratio (5) according to the temperature of the liquid and of the pressure determined at the preceding step at the instant $t-\delta t$:

$$(8) \quad q_{\text{ev}} = K \cdot (\Delta T_{\text{overheating}})^{\alpha}$$

with:

- K meaning a relative constant to the LNG and always being positive,
- $\Delta T_{\text{overheating}}$ meaning the overheating being produced during the evaporation phenomenon in the LNG tank,
- Q_{ev} meaning the standardised LNG evaporation flow, and
- α meaning a coefficient relative to the LNG, with $1 \leq \alpha \leq 2$;
- a coefficient relative to the LNG, with $1 \leq \alpha \leq 2$;

- the pressure $p(t)$ of the gaseous phase is obtained by the Peng-Robinson equation, with as input data, the evaporated liquid mass, the volume of the tank and the temperature of the gas at the instant t .

4. Method according to any one of claims 1 to 3, wherein the algorithm is implemented by means of a calculator calculating the autonomy duration of the tank, said calculator being connected to a man-machine interface making it possible to inform an operator over this autonomy duration.

5. System for calculating in real time, according to the method such as defined according to claim 3, the autonomy duration of a non-refrigerated tank and defined by a setting pressure of the valves p_{valve} , the shape thereof and the dimensions thereof, as well as the evaporation rate thereof, said system comprising:

- a tank containing liquefied natural gas being distributed into:

- a natural gas layer in the liquid state, defined at a given instant t by the temperature $T_{\text{liq}}(t)$ thereof, the composition $x_{\text{liq}}(t)$ thereof, and the filling rate of the tank by said natural gas layer in the liquid state;

- a natural gas layer in the gaseous state, defined at a given instant t by the temperature $T_{\text{gas}}(t)$ thereof and the composition $x_{\text{gas}}(t)$ thereof and a pressure $p(t)$;

- pressure and temperature sensors,

said system being **characterised in that** it is an embedded system, further comprising:

- an embedded calculator (5) connected to said pressure (3) and temperature (4) sensors, said calculator being designed to execute the algorithm of the method such as defined according to claim 4,

- a man-machine interface (6), of vehicle-embedded dashboard type, interacting specifically with said embedded calculator (5), to recover the calculated autonomy duration to an operator (7), according to the method of claim 4.

6. Vehicle comprising an NG tank and a system such as defined according to claim 5.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55



FIG. 1

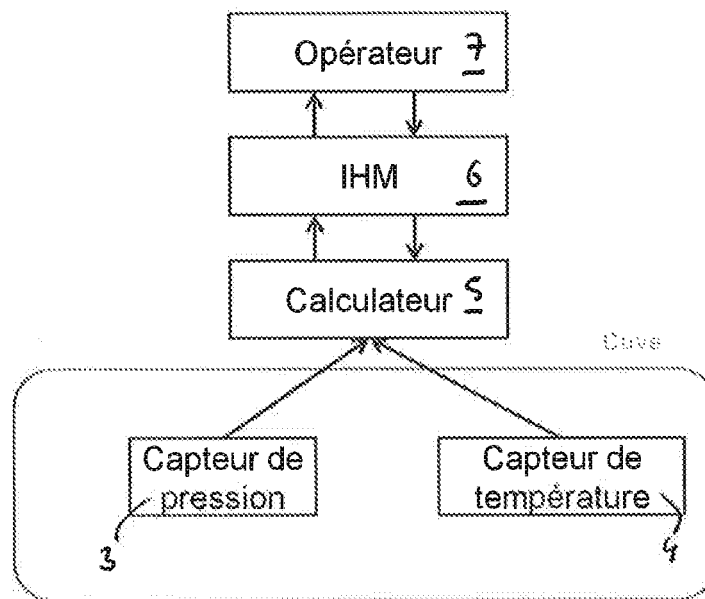


FIG. 2

FIG. 2

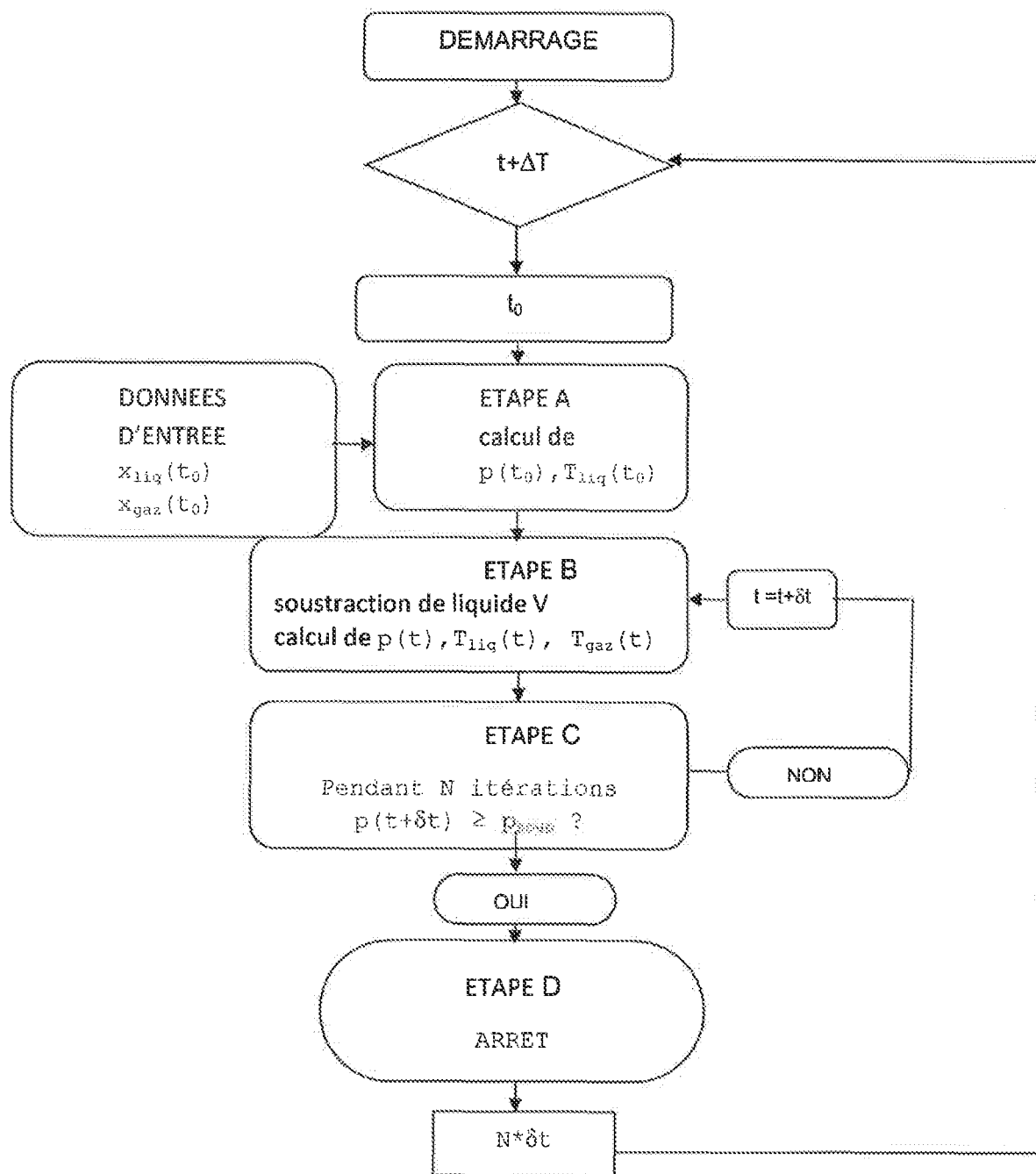


FIG. 3

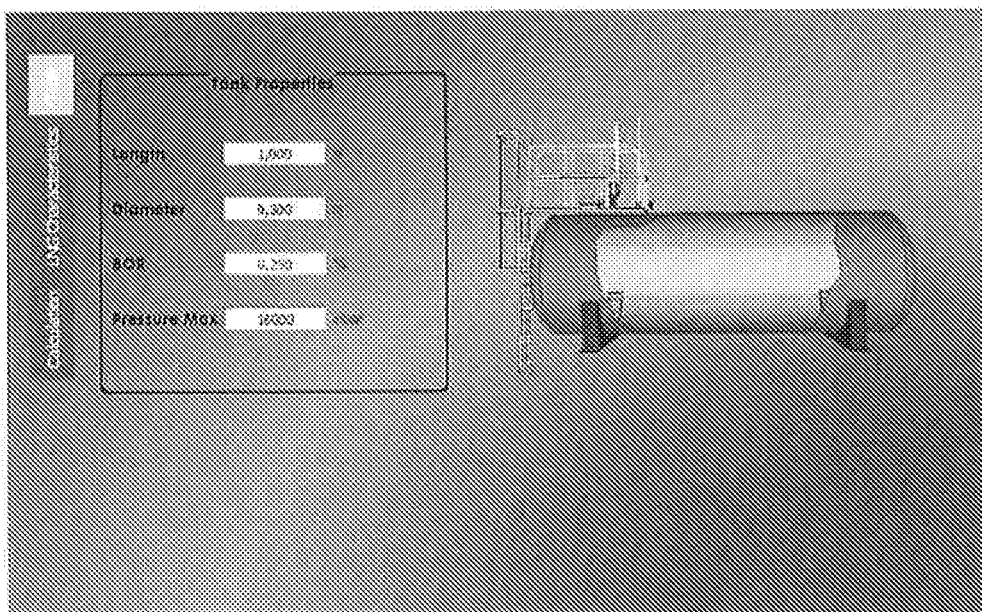


FIG. 4

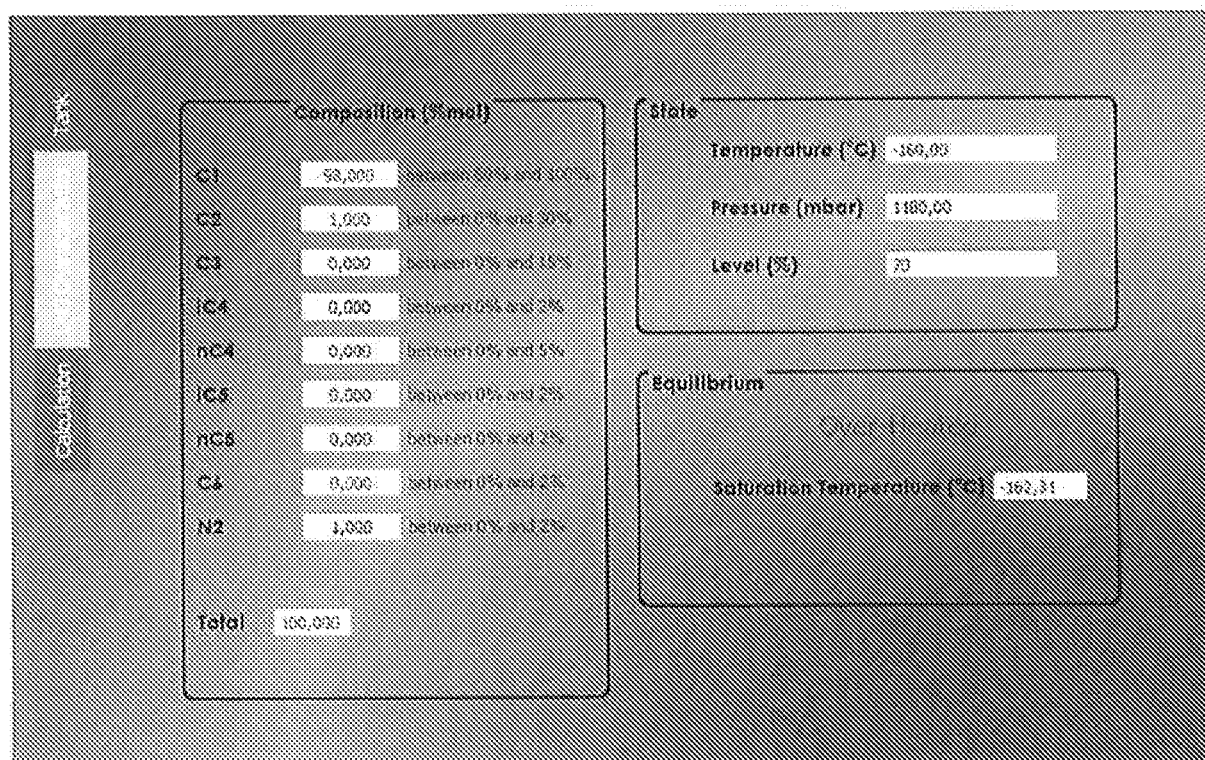


FIG. 5

Tank

Calculation

Composition (%mol)

C1	91,000	between 50,3% and 100%
C2	7,000	between 0% and 30%
C3	0,500	between 0% and 13%
IC4	0,500	between 0% and 2%
nC4	0,000	between 0% and 5%
IC5	0,000	between 0% and 2%
nC5	0,500	between 0% and 2%
C6	0,000	between 0% and 2%
N2	1,000	between 0% and 2%
Total	100,000	

State

Temperature (°C) -157

Pressure (mbar) 2000,00

Level (%) 70,00

Equilibrium

Sub-Cooled

Saturation Temperature (°C) -154,17

FIG. 6

Condenser

Results

Pressure max reached (days)

7.16

Stop

FIG. 7

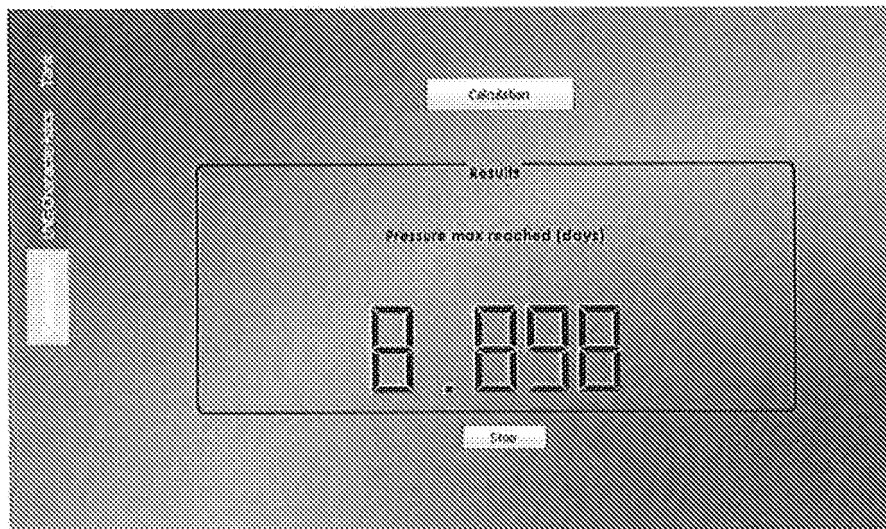


FIG. 8

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- US 7104124 B [0008]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **PENG, D. Y.** A New Two-Constant Equation of State. *Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals*, 1976, vol. 15, 59-64 [0062]
- **H.T HASHEMI, H. W.** CUT LNG STORAGE COSTS. *Hydrocarbon Processing*, 1971, 117-120 [0062]