

## Description

### **Titre de l'invention : Procédé de calcul pour calculer des dimensions d'éléments d'espacement destinés à la construction d'une installation de stockage d'un produit liquide**

#### **Domaine technique**

- [0001] L'invention se rapporte à la construction d'une installation de stockage d'un produit liquide. Plus particulièrement, l'invention se rapporte au calcul de dimensions d'éléments d'espacement destinés à la construction d'une installation de stockage d'un produit liquide, l'installation de stockage comportant une structure porteuse présentant un espace interne délimité par une paroi porteuse et une cuve étanche installée dans l'espace interne de la paroi porteuse.
- [0002] La cuve étanche peut être une cuve étanche et thermiquement isolante pour le stockage et/ou le transport de gaz liquéfié à basse température, telles que des cuves pour le transport de Gaz de Pétrole Liquéfié (aussi appelé GPL) présentant par exemple une température comprise entre -50°C et 0°C, ou pour le transport de Gaz Naturel Liquéfié (GNL) à environ -162°C à pression atmosphérique. Ces cuves peuvent être installées à terre ou sur un ouvrage flottant. Dans le cas d'un ouvrage flottant, la cuve peut être destinée au transport de gaz liquéfié ou à recevoir du gaz liquéfié servant de carburant pour la propulsion de l'ouvrage flottant.
- [0003] Dans un mode de réalisation, le gaz liquéfié est du GNL, à savoir un mélange à forte teneur en méthane stocké à une température d'environ -162°C à la pression atmosphérique. D'autres gaz liquéfiés peuvent aussi être envisagés, notamment l'éthane, le propane, le butane ou l'éthylène mais aussi l'hydrogène. Des gaz liquéfiés peuvent aussi être stockés sous pression, par exemple à une pression relative comprise entre 2 et 20 bar, et en particulier à une pression relative voisine de 2 bar. La cuve peut être réalisée selon différentes techniques, notamment sous la forme d'une cuve intégrée à membrane ou d'une cuve autoporteuse.
- [0004] La cuve étanche peut alternativement être une cuve étanche pour le stockage et/ou le transport à pression ambiante et à température ambiante d'un produit liquide, tel que du pétrole brut ou du pétrole raffiné, notamment du kérosène, du gasoil ou de l'essence.

#### **Technique antérieure**

- [0005] On connaît par le document WO 2020/193584 A1 un procédé de construction d'une cuve étanche et thermiquement isolante dans une structure porteuse. Une pluralité de blocs isolants sont juxtaposés et ancrés sur la surface interne de la paroi porteuse. Des cales d'épaisseur et des cordons de mastic sont disposés entre les blocs isolants et la

paroi porteuse. Les cales d'épaisseur et cordons de mastic permettent de rattraper les défauts de planéité de la surface interne de la structure porteuse, et ainsi de fournir une barrière thermiquement isolante présentant une planéité satisfaisante pour le support de la membrane étanche de la cuve.

### Résumé de l'invention

[0006] Une idée à la base de l'invention est de fournir un procédé de calcul pour calculer des dimensions d'éléments d'espacement destinés à la construction d'une installation de stockage d'un produit liquide, l'installation de stockage comportant une structure porteuse présentant un espace interne délimité par une paroi porteuse et une cuve étanche installée dans l'espace interne de la paroi porteuse. Une autre idée à la base de l'invention est de calculer les dimensions des éléments d'espacement de façon itérative, plus précisant en diminuant itérativement ces dimensions sous contrainte de critères d'acceptabilité, les critères d'acceptabilité comportant des critères de planéité limitant des déformations de facettes planes que comporte la cuve.

[0007] L'invention propose ainsi un procédé de calcul pour calculer des dimensions d'éléments d'espacement destinés à la construction d'une installation de stockage d'un produit liquide, l'installation de stockage comportant une structure porteuse présentant un espace interne délimité par une paroi porteuse et une cuve étanche installée dans l'espace interne de la paroi porteuse,

le procédé de calcul étant mis en œuvre par ordinateur et comprenant :

- obtenir des mesures de position de la paroi porteuse en trois dimensions ;

- à partir desdites mesures de position, définir, dans l'espace interne de la structure porteuse, une position initiale de la cuve, la position initiale de la cuve comprenant une position initiale pour la paroi périphérique de la cuve, la paroi périphérique présentant dans la position initiale une pluralité de facettes planes formant une surface cylindrique polygonale ayant comme directrice un polygone convexe et une génératrice perpendiculaire à la directrice ; et

- pour chaque facette plane :

- définir des lignes de positionnement définissant des emplacements de modules de paroi juxtaposés destinés à former la paroi périphérique de la cuve ;

- à partir des positions des lignes de positionnement, définir des lignes de réglage s'étendant perpendiculairement à la facette plane entre la facette plane et la paroi porteuse, les lignes de réglage étant disposées de telle sorte qu'au moins une ligne de réglage coupe chacun des emplacements des modules de paroi, lesdites lignes de réglage représentant les positions d'éléments d'espacement destinés à être disposés entre chaque module de paroi et la paroi porteuse dans une position finale de la paroi périphérique de la cuve ;

calculer des dimensions initiales des lignes de réglage à partir des mesures de position de la paroi porteuse ;

diminuer itérativement les dimensions des lignes de réglage pour rapprocher les modules de paroi de la paroi porteuse jusqu'à la position finale de la paroi périphérique de la cuve, la diminution itérative étant réalisée sous la contrainte de critères d'acceptabilité, les critères d'acceptabilité comportant des critères de planéité limitant des déformations des facettes planes.

[0008] Grâce à ces caractéristiques, le calcul des dimensions des éléments d'espacement est réalisé de façon à diminuer le plus possible les dimensions des éléments d'espacement, et donc à diminuer un volume perdu entre la paroi périphérique de la cuve et la paroi porteuse, tant que des critères d'acceptabilité sont vérifiés. Les critères d'acceptabilité limitent les déformations des facettes planes et assurent ainsi que la paroi périphérique de la cuve dans sa position finale présente une planéité suffisante, par exemple pour assurer le soutien d'une membrane d'étanchéité.

[0009] Le procédé de calcul est mis en œuvre par ordinateur, par exemple par un programme d'ordinateur convenable exécuté par un ordinateur. Un utilisateur peut alors obtenir les dimensions des éléments d'espacement de façon automatique, sans intervention humaine sauf éventuellement pour spécifier au préalable les critères d'acceptabilité. Les mesures de position peuvent être entrées entièrement ou partiellement manuellement par l'utilisateur, ou bien être fournies au programme d'ordinateur dans un format lisible par ordinateur.

[0010] Selon des modes de réalisation, un tel procédé de calcul peut présenter une ou plusieurs des caractéristiques suivantes.

[0011] Selon un mode de réalisation, diminuer itérativement les dimensions des lignes de réglage comprend :

a) sélectionner une ligne de réglage ;

b) diminuer la dimension de la ligne de réglage sélectionnée jusqu'à une dimension réduite ;

c) vérifier par le calcul que les critères d'acceptabilité sont vérifiés, et : dans l'affirmative, conserver la dimension réduite obtenue à l'étape b) ; dans la négative, annuler la diminution de dimension réalisée à l'étape b) ;

d) vérifier s'il existe au moins une ligne de réglage encore non sélectionnée, et dans l'affirmative, effectuer les étapes a) à c) sur une dite ligne de réglage encore non sélectionnée ; dans la négative, vérifier si la dimension réduite a été conservée à l'étape c) pour au moins une ligne de réglage, et : dans l'affirmative, effectuer de nouveau les étapes a) à d) ; dans la négative, enregistrer en mémoire les dimensions des lignes de réglage en tant que dimensions des éléments d'espacement.

[0012] Selon un mode de réalisation, les dimensions des lignes de réglage sont diminuées

d'un incrément prédéterminé.

- [0013] Selon un mode de réalisation, les critères d'acceptabilité comprennent un critère de borne inférieure selon lequel les dimensions des lignes de réglage restent supérieures ou égales à une première borne inférieure prédéfinie.
- [0014] Selon un mode de réalisation, les critères d'acceptabilité comprennent un critère d'écart selon lequel une distance entre chaque module de paroi et la paroi porteuse, perpendiculairement audit module de paroi, reste supérieure ou égale à une deuxième borne inférieure prédéfinie.
- [0015] Selon un mode de réalisation, les critères d'acceptabilité comprennent un critère de pente portant sur la différence de pente entre les sommets de trois éléments d'espacement voisins alignés.
- [0016] Selon un mode de réalisation, les critères d'acceptabilité comprennent un critère de torsion portant sur les écarts entre chaque module de paroi au droit des éléments d'espacement et un plan moyen dudit module de paroi, perpendiculairement audit module de paroi.
- [0017] Selon un mode de réalisation, définir ladite position initiale de la paroi périphérique de la cuve comprend définir des valeurs de référence d'angles formés par lesdites facettes planes au niveau d'arêtes séparant lesdites facettes planes.
- [0018] Selon un mode de réalisation, la paroi périphérique de la cuve est entièrement formée de modules de paroi plans juxtaposés, et les critères d'acceptabilité comprennent un critère d'angle selon lequel un angle formé par deux pentes reliant les sommets des deux éléments d'espacement alignés les plus proches d'une arête, de part et d'autre de ladite arête, est compris dans un intervalle incluant la valeur de référence de l'angle au niveau de ladite arête.
- [0019] Selon un mode de réalisation, les modules de paroi comprennent, au niveau d'une desdites arêtes, des modules de paroi diédriques disposés sur ladite arête et présentant un dièdre dont l'angle est égal à la valeur de référence de l'angle au niveau de ladite arête, et les critères d'acceptabilité comprennent un deuxième critère de pente portant sur une différence de pente entre, d'une part, une pente entre le sommet d'un l'élément d'espacement correspondant au bloc diédrique et le sommet d'un l'élément d'espacement adjacent, et, d'autre part, une pente entre le sommet dudit élément d'espacement correspondant au bloc diédrique et un point situé sur le dièdre du bloc diédrique et aligné avec lesdits éléments d'espacement.
- [0020] Selon un mode de réalisation,
- la structure porteuse comporte en outre une paroi porteuse de fond plane présentant des tolérances dimensionnelles ;
  - obtenir des mesures de position de la paroi porteuse en trois dimensions comprend en outre obtenir des mesures de position de la paroi porteuse de fond en trois di-

mensions ;

- la position initiale de la cuve comprend en outre une facette plane de fond définissant une position initiale pour une paroi de fond de la cuve ;

- le procédé de calcul comprend en outre :

définir, à partir des lignes de positionnement, des lignes de positionnement de fond définissant des emplacements de modules de paroi de fond plans juxtaposés destinés à former la paroi de fond de la cuve ;

à partir des positions des lignes de positionnement de fond, définir des lignes de réglage de fond s'étendant perpendiculairement à la facette plane de fond entre la facette plane de fond et la paroi porteuse de fond, les lignes de réglage de fond étant disposées de telle sorte qu'au moins une ligne de réglage de fond coupe chacun des emplacements des modules de paroi de fond, lesdites lignes de réglage de fond représentant les positions d'éléments d'espacement destinés à être disposés entre chaque module de paroi de fond et la paroi porteuse de fond dans une position finale de la paroi de fond de la cuve ;

calculer des dimensions initiales des lignes de réglage de fond à partir des mesures de position de la paroi porteuse de fond ;

diminuer itérativement les dimensions des lignes de réglage de fond pour rapprocher les modules de paroi de la paroi porteuse de fond jusqu'à la position finale de la paroi de fond de la cuve, la diminution itérative étant réalisée sous la contrainte de critères d'acceptabilité, les critères d'acceptabilité comportant des critères de planéité limitant des déformations de la facette plane de fond.

[0021] Selon un mode de réalisation, les modules de paroi destinés à former la paroi périphérique de la cuve présentent un contour extérieur rectangulaire, les lignes de positionnement définissent des emplacements rectangulaires pour les modules de paroi, et les lignes de réglage sont disposées de telle sorte qu'au moins quatre lignes de réglage coupent chacun des emplacements rectangulaires des modules de paroi au voisinage des coins des emplacements rectangulaires.

[0022] Selon un mode de réalisation, les modules de paroi comportent des moyens pour retenir au moins une tôle métallique destinée à constituer une membrane d'étanchéité de la cuve.

[0023] Selon un mode de réalisation, la cuve est une cuve étanche et thermiquement isolante.

[0024] Selon un mode de réalisation, les modules de paroi sont des blocs thermiquement isolants.

[0025] Selon un mode de réalisation, les blocs thermiquement isolants comprennent chacun un bloc de mousse polymère pris en sandwich entre une plaque de couvercle et une plaque de fond. Selon un mode de réalisation, le bloc de mousse polymère est un bloc

de mousse polyuréthane optionnellement renforcée de fibres de verre. Selon un mode de réalisation, la mousse polymère présente une densité comprise entre 130 et 200 kg/m<sup>3</sup>. Selon un mode de réalisation, la plaque de couvercle et la plaque de fond sont réalisées en bois contreplaqué.

- [0026] Selon un mode de réalisation, la plaque de couvercle présente une platine, la platine étant destinée à être soudée à un bord d'une tôle métallique pour retenir la tôle métallique sur la plaque de couvercle.
- [0027] Selon un mode de réalisation, la paroi périphérique de la cuve présente dans la position initiale une pluralité de facettes planes formant une surface cylindrique polygonale ayant comme directrice un polygone convexe régulier.
- [0028] Selon un mode de réalisation, la paroi porteuse forme une surface cylindrique polygonale ou circulaire présentant des tolérances dimensionnelles.
- [0029] Selon un mode de réalisation, les éléments d'espacement comprennent des cales d'épaisseur.
- [0030] Selon un mode de réalisation, les éléments d'espacement comprennent des tiges d'ancrage. Selon un mode de réalisation, les tiges d'ancrage retiennent les modules de paroi sur la paroi porteuse.
- [0031] Selon un mode de réalisation, obtenir des mesures de position de la paroi porteuse en trois dimensions comprend réaliser un relevé tridimensionnel de la position de la paroi porteuse verticale à l'aide d'un télémètre laser à balayage.
- [0032] Selon un mode de réalisation, le relevé tridimensionnel est réalisé avec une résolution égale à un point tous les 2 cm<sup>2</sup> ou moins.

### **Brève description des figures**

- [0033] L'invention sera mieux comprise, et d'autres buts, détails, caractéristiques et avantages de celle-ci apparaîtront plus clairement au cours de la description suivante de plusieurs modes de réalisation particuliers de l'invention, donnés uniquement à titre illustratif et non limitatif, en référence aux dessins annexés.
- [0034] [Fig.1A] La [Fig.1A] est un schéma où l'on a représenté une position initiale pour une paroi périphérique d'une cuve dans l'espace interne d'une structure porteuse.
- [0035] [Fig.1B] La [Fig.1B] est un schéma identique à la [Fig.1A], montrant la forme de la structure porteuse selon une variante.
- [0036] [Fig.2] La [Fig.2] est un schéma où l'on a représenté une partie d'une paroi porteuse principale de la structure porteuse, une facette plane de la paroi périphérique de la cuve dans la position initiale, et les dimensions initiales de lignes de réglage dans la position initiale de la [Fig.1A].
- [0037] [Fig.3] La [Fig.3] est un schéma analogue à la [Fig.2], où l'on a représenté les dimensions de lignes de réglage dans une position finale de la paroi périphérique de la

paroi de cuve.

- [0038] [Fig.4A] La [Fig.4A] est un diagramme-blocs représentant les étapes d'un procédé de calcul conforme à l'invention.
- [0039] [Fig.4B] La [Fig.4B] est un diagramme-blocs détaillant l'une des étapes du procédé de calcul de la [Fig.4A].
- [0040] [Fig.5] La [Fig.5] est un schéma où l'on a représenté une façon de définir les dimensions initiales des lignes de réglage.
- [0041] [Fig.6] La [Fig.6] est un schéma représentant des modules de paroi plans juxtaposés destinés à former la paroi périphérique de la cuve et des éléments d'espacement destinés à être disposés entre chaque module de paroi et la paroi porteuse dans la position finale de la paroi périphérique de la cuve.
- [0042] [Fig.7] La [Fig.7] est un autre schéma représentant des modules de paroi plans juxtaposés et des éléments d'espacement.
- [0043] [Fig.8A] La [Fig.8A] est un schéma représentant des emplacements des lignes de réglage représentées sur les figures 3A, 3B et 5 ainsi que des lignes de positionnement définissant des emplacements des modules de paroi plans.
- [0044] [Fig.8B] La [Fig.8B] est un schéma représentant des pentes entre les sommets d'éléments d'espacement voisins alignés.
- [0045] [Fig.9] La [Fig.9] est un schéma représentant un plan moyen d'un module de paroi plan ainsi que des écarts entre le module de paroi au droit des éléments d'espacement et le plan moyen, perpendiculairement audit module de paroi.
- [0046] [Fig.10] La [Fig.10] est un schéma représentant des pentes entre les sommets d'éléments d'espacement voisins alignés de part et d'autre d'une arête séparant deux parois planes de la cuve.
- [0047] [Fig.11] La [Fig.11] est un schéma montrant une première variante de réalisation de la paroi périphérique de la cuve, dans laquelle les éléments d'espacement sont des cales.
- [0048] [Fig.12] La [Fig.12] est un schéma montrant une structure possible pour les modules de paroi dans la première variante de réalisation.
- [0049] [Fig.13] La [Fig.13] est un schéma montrant une la paroi périphérique de la cuve dans la première variante de réalisation, au niveau d'une arête séparant deux parois planes de la cuve.
- [0050] [Fig.14] La [Fig.14] est une vue partielle en coupe montrant une deuxième variante de réalisation de la paroi périphérique de la cuve, dans laquelle les éléments d'espacement sont des tiges d'ancrage.
- [0051] [Fig.15A] La [Fig.15A] est un schéma montrant une structure possible de la paroi périphérique de la cuve dans la deuxième variante de réalisation, au niveau d'une arête séparant deux parois planes de la cuve.

- [0052] [Fig.15B] La [Fig.15B] est un schéma illustrant une transformation virtuelle d'un bloc diédrique en un bloc plan.
- [0053] [Fig.15C] La [Fig.15C] est un schéma illustrant un calcul d'une position d'un point situé sur le dièdre du bloc diédrique des figures 15A et 15B.
- [0054] [Fig.15D] La [Fig.15D] est un schéma analogue à la [Fig.15C], représentant des pentes entre les sommets d'éléments d'espacement voisins alignés et entre les sommets de ces éléments d'espacement et du point situé sur le dièdre du bloc diédrique des figures 15A et 15B.
- [0055] [Fig.16] La [Fig.16] est une vue partielle en perspective de la structure porteuse, montrant une partie d'une paroi de fond de la structure porteuse ainsi qu'une partie de la paroi porteuse principale de la structure porteuse.
- [0056] [Fig.17] La [Fig.17] est un schéma représentant des pentes entre les sommets d'éléments d'espacement voisins alignés de part et d'autre d'une arête séparant la paroi de fond et la paroi porteuse principale de la structure porteuse.

### **Description des modes de réalisation**

- [0057] Comme on l'a mentionné ci-dessus, l'invention s'intéresse à la réalisation d'une installation de stockage d'un produit liquide, qui porte la référence 1 dans la description qui va suivre.
- [0058] Selon une variante, l'installation 1 est apte à stocker un gaz liquéfié, en particulier du gaz naturel liquéfié (GNL) à une température d'environ -162°C et à pression atmosphérique ou d'autres gaz liquéfiés. Selon une autre variante, l'installation 1 est apte à stocker un autre produit liquide, tel que du pétrole brut ou du pétrole raffiné, notamment du kérosène, du gasoil ou de l'essence.
- [0059] L'installation 1 comporte principalement une structure porteuse 10 et une cuve étanche 20.
- [0060] On décrit tout d'abord la structure porteuse 10. La structure porteuse 10 comprend au moins une paroi porteuse qui définit une cavité destinée à recevoir la cuve étanche 20. Dans un mode de réalisation, une paroi porteuse principale 12 présente une géométrie à peu près cylindrique qui entoure la cavité. Une telle paroi porteuse principale 12 peut en outre être fermée par une autre paroi porteuse à au moins une extrémité dans la direction directrice. Dans un mode de réalisation, une telle paroi porteuse principale 12 peut s'étendre entre une paroi porteuse de fond et une paroi porteuse de couvercle.
- [0061] L'installation 1 peut être prévue pour être située à terre. La paroi porteuse principale 12 est alors typiquement verticale, c'est-à-dire située dans un plan parallèle à la direction de l'accélération de pesanteur aux tolérances dimensionnelles près. La structure porteuse 10 est par exemple réalisée en béton. De façon non représentée sur les dessins, la paroi porteuse de fond peut être située au niveau du sol ou éven-

tuellement sous le niveau du sol. De façon non représentée sur les dessins, à l'extrémité de la paroi porteuse principale 12 opposée à la paroi porteuse de fond, la structure porteuse 10 comprend une paroi porteuse de couvercle fermant l'espace interne délimité par la paroi porteuse de fond et la paroi porteuse verticale 12. Cette paroi porteuse de couvercle peut supporter divers équipements utilisables pour acheminer le produit liquide depuis ou vers cet espace interne. La paroi porteuse de fond et/ou la paroi porteuse de couvercle peuvent par exemple être planes. Toutefois, d'autres formes sont possibles pour la paroi porteuse de fond et la paroi porteuse de couvercle, notamment des formes de calotte sphérique.

- [0062] En alternative, l'installation 1 peut être prévue pour être installée à bord d'une structure flottante, telle qu'un navire. Dans ce cas, la structure porteuse 10 est une portion d'une double coque que présente la structure flottante. La paroi porteuse principale 12 peut éventuellement être non verticale, et même présenter une direction directrice perpendiculaire à la direction de l'accélération de pesanteur lorsque la structure flottante est au repos.
- [0063] Dans la suite, on considère plus particulièrement le cas d'une installation 1 située à terre et où la paroi porteuse principale 12 est verticale. On parlera ainsi dans la suite d'une paroi porteuse verticale 12. Il est néanmoins précisé que la description qui suit s'applique à une orientation quelconque de la paroi porteuse principale 12 par rapport à la direction de l'accélération de pesanteur.
- [0064] La [Fig.1A] est une vue schématique en coupe de la structure porteuse 10, prise perpendiculairement à un axe vertical de la paroi porteuse verticale 12. La paroi porteuse verticale 12 est représentée en trait plein sur la [Fig.1A]. La paroi porteuse verticale 12 forme une surface cylindrique polygonale et a été typiquement construite par des techniques de génie civil. Ainsi, la paroi porteuse verticale 12 présente des pans verticaux 14 séparés les uns des autres par des arêtes 13. La position et les orientations des pans verticaux 14 peuvent présenter des déviations dimensionnelles par rapport à une forme prévue de polygone régulier. En outre, comme représenté sur la [Fig.2], chaque pan vertical 14 peut présenter des déviations dimensionnelles par rapport à une forme idéale plane. Ces déviations dimensionnelles peuvent par exemple être dues à des tolérances dimensionnelles sur une construction en béton.
- [0065] En variante, comme représenté sur la [Fig.1B], la paroi porteuse verticale 12 peut former une surface cylindrique convexe quelconque, par exemple vaguement circulaire tout en présentant des déviations dimensionnelles par rapport à une forme de cercle. Une telle paroi porteuse peut être une cavité naturelle ou une construction présentant des tolérances élevées. Toutefois, de façon plus générale, la paroi porteuse verticale 12 peut avoir une forme moins régulière ou plus régulière que les formes illustrées.
- [0066] La cuve étanche 20 (en pointillés sur les figures 1A et 1B) est destinée à être installée

dans l'espace interne 11 de la structure porteuse 10. La cuve 20 comporte une paroi périphérique verticale 22 destinée à être en regard de la paroi porteuse verticale 12. De façon non représentée sur les dessins, la cuve 20 comporte en outre une paroi de fond en regard de la paroi porteuse de fond et une paroi de couvercle en regard de la paroi porteuse de couvercle.

- [0067] La paroi périphérique verticale 22 est formée de modules de paroi plans 30 juxtaposés. Le bord des modules de paroi 30 qui est le plus proche de la paroi porteuse verticale 12 est représenté en pointillés sur la [Fig.3]. Typiquement, les modules de paroi 30 sont disposés selon des rangées parallèles et verticales. Des éléments d'espacement 40 sont disposés entre les modules de paroi 30 et la paroi porteuse verticale 12 afin de rattraper les déviations dimensionnelles précitées.
- [0068] Il convient de donner aux éléments d'espacement 40 des dimensions aussi petites que possible, afin de maximiser le volume interne de la cuve et de minimiser la quantité de matière à disposer entre la paroi porteuse verticale 12 et la paroi périphérique verticale 22, tout en assurant à la paroi périphérique verticale 22 une planéité suffisante pour supporter une membrane étanche assurant l'étanchéité de la cuve 20.
- [0069] Avant de décrire un procédé de calcul 400 qui permet d'atteindre ces objectifs, on en explique le principe global en se référant aux figures 1A, 1B, 2 et 3. Sur ces figures, une position initiale 220 de la paroi périphérique verticale 22 est représentée en trait mixte. On précise que la distance entre la position initiale 220 et la paroi porteuse verticale 12 a été grandement exagérée sur les figures 1A et 1B afin de faciliter la lisibilité du dessin.
- [0070] La position initiale 220 satisfait certains critères d'acceptabilité qui sont décrits ci-après. La position initiale 220 est ainsi considérée comme acceptable pour assurer à la paroi périphérique verticale 22 une planéité suffisante. Mais la position initiale 220 laisse un espace important entre la paroi périphérique verticale 22 et la paroi porteuse verticale 12. Il en résulte que si on positionnait naïvement la paroi périphérique verticale 22 à la position initiale 220, comme représenté sur la [Fig.2], les dimensions des éléments d'espacement 40 seraient importantes. En outre, si la construction de la cuve 20 impose de disposer de la matière entre la paroi porteuse verticale 12 et la paroi périphérique verticale 22 afin d'assurer la tenue mécanique à cette dernière, le volume de matière consommé serait important.
- [0071] Inversement, à l'issue du procédé de calcul 400, on a trouvé des dimensions réduites des éléments d'espacement 40 dans une position finale 320 de la paroi périphérique verticale 22. La position finale 320 satisfait les mêmes critères d'acceptabilité que la position initiale 220 et assure ainsi toujours à la paroi périphérique verticale 22 une planéité suffisante. Mais les dimensions des éléments d'espacement 40 ayant été réduites, le volume de matière à disposer entre la paroi porteuse verticale 12 et la paroi

périphérique verticale 22 est diminué, et le volume intérieur de la cuve 20 est augmenté.

- [0072] On décrit maintenant les étapes du procédé de calcul 400 en se référant aux figures 4A à 10.
- [0073] Le procédé 400 comprend une étape 401 consistant à obtenir des mesures de position de la paroi porteuse verticale 12 en trois dimensions. Selon un exemple particulier, cette étape 401 consiste à réaliser un relevé tridimensionnel de la position de la paroi porteuse verticale 12 avec une résolution élevée, par exemple égale à un point tous les 2 cm<sup>2</sup> ou moins, à l'aide d'un télémètre laser à balayage.
- [0074] Dans une étape 402, à partir des mesures de position obtenues à l'étape 401, on définit, dans l'espace interne 11, la position initiale 220 de la paroi périphérique verticale 22 de la cuve 20. Dans la position initiale 220, la paroi périphérique verticale 22 présente une pluralité de facettes planes 224 formant une surface cylindrique polygonale ayant comme directrice un polygone convexe et une génératrice perpendiculaire à la directrice. Dans une variante particulière, la surface cylindrique polygonale formée par les facettes planes 224 a comme directrice un polygone convexe régulier. Selon un exemple particulier, la position initiale 220 est obtenue en recherchant une position de la paroi périphérique verticale 22 par simulation numérique sous contrainte d'un ou plusieurs critères, qui peuvent par exemple inclure un critère de minimisation de l'espace qui subsiste entre la paroi périphérique verticale 22 de la cuve 20 et la paroi porteuse verticale 12.
- [0075] Après les étapes 401 et 402, le procédé 400 passe à une étape 403 consistant à définir des lignes de positionnement 100. Les lignes de positionnement 100 définissent des emplacements 130 pour les modules de paroi 30 comme représenté sur la [Fig.8A].
- [0076] Dans l'exemple représenté sur les figures, les lignes de positionnement 100 comprennent des lignes de positionnement verticales 110 et des lignes de positionnement horizontales 120 perpendiculaires aux lignes de positionnement verticales 110, de façon à définir des emplacements 130 qui sont rectangulaires et correspondent au contour extérieur rectangulaire des modules de paroi 30. Selon un exemple particulier, les lignes de positionnement verticales 110 sont déterminées en déterminant une ligne verticale médiane verticale d'une facette plane 224, et en disposant les lignes de positionnement verticales 110 à intervalles réguliers de cette ligne verticale médiane verticale. De même, les lignes de positionnement horizontales 120 sont déterminées en déterminant une ligne horizontale médiane horizontale d'une facette plane 224, et en disposant les lignes de positionnement horizontales 120 à intervalles réguliers de cette ligne horizontale médiane horizontale.
- [0077] Après l'étape 403, le procédé 400 passe à une étape 404 consistant à définir des lignes de réglage 150 à partir des positions des lignes de positionnement 100. Les

lignes de réglage 150 représentent les positions des éléments d'espacement 40 dans la position finale 320. Les lignes de réglage 150 sont disposées de telle sorte qu'au moins une ligne de réglage 150 coupe chacun des emplacements 130 pour les modules de paroi 30.

- [0078] Dans l'exemple représenté sur les figures, les lignes de réglage 150 sont disposées de telle sorte qu'au moins quatre lignes de réglage 150 coupent chacun des emplacements rectangulaires 130 au voisinage des coins de ces emplacements rectangulaires. Toutefois un nombre différent de lignes de réglage 150 peut être prévu, notamment lorsque des éléments d'espacement 40 sont disposés ailleurs qu'au voisinage des coins des emplacements rectangulaires 130.
- [0079] Après l'étape 404, le procédé passe à une étape 405 consistant à calculer des dimensions initiales des lignes de réglage 150 à partir des mesures de position de la paroi porteuse verticale 12 obtenues à l'étape 401, puis à diminuer itérativement les dimensions des lignes de réglage 150 pour rapprocher les modules de paroi 30 de la paroi porteuse verticale 12. Cette diminution itérative est réalisée sous la contrainte de critères d'acceptabilité comportant des critères de planéité limitant des déformations des facettes planes 224.
- [0080] Dans certaines variantes, lors de l'étape 405, les dimensions des lignes de réglage 150 sont diminuées itérativement d'un incrément  $\delta$  prédéterminé.
- [0081] Les étapes 403, 404 et 405 sont effectuées pour chacune des facettes planes 224.
- [0082] On détaille maintenant, en se référant aux figures 4B à 10, une implémentation possible de l'étape 405 ainsi que des exemples de critères d'acceptabilité.
- [0083] Dans une étape 500, on initialise les hauteurs des lignes de réglage 150 de telle sorte que les critères d'acceptabilité sont vérifiés. Selon un exemple particulier représenté schématiquement sur la [Fig.5], les dimensions des lignes de réglage 150 sont initialisées de la façon suivante. On identifie la ligne de réglage 150-1 au niveau de laquelle la paroi porteuse verticale 12 est la plus proche de la facette plane 224, et on fixe la dimension de cette ligne de réglage 150-1 à la dimension minimale  $\ell_{\min}$  discutée ci-après en rapport avec l'étape 503. Les dimensions des autres lignes de réglage 150 sont ensuite fixées de telle sorte que les critères d'acceptabilité sont vérifiés.
- [0084] Après l'initialisation de l'étape 500, on passe à une étape 501 qui consiste à sélectionner une ligne de réglage 150.
- [0085] Dans une étape 502, on diminue de l'incrément  $\delta$  la dimension de la ligne de réglage 150 sélectionnée à l'étape 501.
- [0086] Dans une étape 503, on vérifie que la dimension de la ligne de réglage 150 diminuée à l'étape 502 satisfait un critère de borne inférieure selon lequel la dimension de cette ligne de réglage 150 reste supérieure à la dimension minimale  $\ell_{\min}$ . La dimension minimale  $\ell_{\min}$  est fixée à l'avance. Il peut s'agir par exemple d'une dimension

minimale qu'il est possible de donner à un élément d'espacement 40 tout en permettant la fabrication et l'utilisation de l'élément d'espacement 40. On a illustré sur la [Fig.6] la dimension minimale  $\ell_{\min}$  dans le cas où l'élément d'espacement 40 est une cale comme décrit plus loin en rapport avec les figures 10 et 11. Sur la [Fig.6], on a également illustré une multiplicité d'incréments  $\delta$ .

[0087] Dans une étape 504, on vérifie que la dimension de la ligne de réglage 150 diminuée à l'étape 502 satisfait un critère d'écart selon lequel une distance entre le module de paroi 30 auquel elle correspond et la paroi porteuse verticale 12, perpendiculairement à ce module de paroi 30, reste supérieure, en tout point 39 du bord inférieur du module de paroi 30 pour lequel une mesure de position de la paroi porteuse verticale 12 obtenue à l'étape 401 est disponible, à un écart minimal  $e_{\min}$ . L'écart minimal  $e_{\min}$  est fixé à l'avance. On a représenté schématiquement sur la [Fig.7] l'écart minimal  $e_{\min}$  dans le cas où l'élément d'espacement 40 est une cale comme décrit plus loin en rapport avec les figures 10 et 11.

[0088] Dans une étape 505, on vérifie que la dimension de la ligne de réglage 150 diminuée à l'étape 502 satisfait un critère de pente portant sur la différence de pente  $\alpha$  entre les sommets de trois éléments d'espacement 40 voisins alignés. Plus précisément, on vérifie que cette différence de pente  $\alpha$  reste inférieure à un seuil  $2A$ , où  $A$  est une grandeur fixée à l'avance.

[0089] On a illustré sur les figures 8A et 8B un exemple de calcul du critère de pente. Les coordonnées des sommets de trois lignes de réglage 150 alignées étant désignées par  $(x_1, z_1)$ ,  $(x_2, z_2)$ ,  $(x_3, z_3)$ , dans un repère cartésien  $(x, z)$  où  $x$  est parallèle à une ligne 190 (voir [Fig.8A]) reliant ces trois lignes de réglage 150, le critère de pente est vérifié si l'inégalité suivante est vérifiée :

[0090] [Math.1]

$$\alpha = \left| \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} - \frac{z_3 - z_2}{x_3 - x_2} \right| \leq 2A$$

[0091] Dans une étape 506, on vérifie que la dimension de la ligne de réglage 150 diminuée à l'étape 502 satisfait un critère de torsion portant sur les écarts entre le module de paroi 30 auquel elle correspond, au droit des éléments d'espacement correspondant à ce module de paroi 30, et un plan moyen dudit module de paroi, perpendiculairement audit module de paroi 30.

[0092] On a illustré sur la [Fig.9] un exemple du critère de torsion. Pour un module de paroi 30 correspondant à plusieurs lignes de réglage 150, il est possible de définir un plan moyen 430 du module de paroi 30. Les sommets des lignes de réglage 150 sont à des distances  $d_1, d_2, d_3, d_4 \dots$  de ce plan moyen 430. Pour faciliter la compréhension de la

[Fig.9], on précise que sur cette figure, les sommets des lignes de réglage 150 qui sont séparés du plan moyen 430 par les distances  $d_2$  et  $d_4$  sont au-dessus du plan moyen 430, tandis que les sommets des lignes de réglage 150 qui sont séparés du plan moyen 430 par les distances  $d_1$  et  $d_3$  sont en-dessous du plan moyen 430. Les parties du module de paroi 30 qui sont en-dessous du plan moyen 430 sont en outre représentées en trait interrompu. Le critère de torsion est considéré comme vérifié si la quantité  $D = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + \dots$  est inférieure à un seuil prédéterminé.

[0093] Les critères d'acceptabilité des étapes 503 à 506 portent uniquement sur des lignes de réglage 150 correspondant à une même facette plane 224. Or il peut également être souhaité de s'assurer que les dimensions des lignes de réglage 150 permettent un raccord suffisamment aisé entre deux facettes planes 224 adjacentes séparées par une arête 225 comme représenté sur la [Fig.10].

[0094] Pour cela, à l'étape 402, il est en outre défini une valeur de référence  $\beta$  de l'angle séparant deux facettes planes 224 au niveau d'une arête 225 (cf. figures 1A et 10). Cette valeur de référence  $\beta$  peut être identique pour toutes les arêtes 225.

[0095] Dans une étape 507, on calcule un angle  $\gamma$  formé par deux pentes P1, P2 reliant les sommets des deux éléments d'espacement 40 alignés les plus proches de l'arête 225, de part et d'autre de ladite arête 225, et on vérifie si l'angle  $\gamma$  vérifie un critère d'angle. Le critère d'angle est considéré comme vérifié si l'angle  $\gamma$  est compris dans un intervalle incluant la valeur de référence  $\beta$ . La largeur de cet intervalle quantifie l'écart que l'on accepte entre  $\gamma$  et  $\beta$  : plus cet intervalle est étroit, plus on contraint les facettes planes 224 à former un angle  $\gamma$  qui est proche de la valeur de référence  $\beta$ . En assurant une uniformité plus élevée des angles entre facettes, le raccordement mécanique des facettes est facilité, par exemple par la possibilité d'utiliser des pièces standardisées.

[0096] On a illustré sur la [Fig.10] l'angle  $\gamma$  ainsi qu'une manière de le calculer. Les distances entre les sommets des éléments d'espacement 40 et la facette plane correspondante étant désignées par  $dZ_1, dZ_2, dZ_3, dZ_4$ , et les distances séparant les éléments d'espacement 40 étant désignées par  $d_{12}$  et  $d_{34}$ , on a :

[0097] [Math.2]

$$\gamma - \beta = \tan^{-1} \frac{dZ_2 - dZ_1}{d_{12}} - \tan^{-1} \frac{dZ_4 - dZ_3}{d_{34}}$$

[0098] Le critère de l'étape 507 est considéré comme vérifié si la valeur absolue de  $\gamma - \beta$  est comprise dans un intervalle prédéterminé.

[0099] Si l'un des critères d'acceptabilité des étapes 503 à 507 n'est pas vérifié, on passe à une étape 508 où on annule la diminution de la ligne de réglage 150 réalisée à l'étape 502. Autrement dit, on redonne à la ligne de réglage 150 sélectionnée à l'étape 501 la

dimension qu'elle avait avant l'étape 502.

- [0100] Si au contraire tous les critères d'acceptabilité des étapes 503 à 507 sont vérifiés, on passe à une étape 509 où on valide la diminution de la dimension de la ligne de réglage 150 réalisée à l'étape 502.
- [0101] Après les étapes 508 ou 509, on passe à une étape 510 où on vérifie s'il existe encore une ligne de réglage 150 non sélectionnée.
- [0102] Dans l'affirmative, on passe à une étape 511 où on sélectionne une ligne de réglage 150 encore non sélectionnée, après quoi on répète les étapes 502 à 510 pour cette ligne de réglage 150. La sélection à l'étape 511 d'une ligne de réglage 150 encore non sélectionnée peut se faire de diverses manières. Selon une variante, cette sélection est entièrement aléatoire. Selon une autre variante, cette sélection est limitée aux lignes de réglage 150 d'une même facette plane 224 ; autrement dit, à l'étape 511, on continue de sélectionner des lignes de réglage 150 correspondant à une facette plane 224 donnée tant qu'il reste des lignes de réglage 150 encore non sélectionnées sur cette facette plane 224.
- [0103] Dans la négative, on passe à une étape 512 où on vérifie si la diminution de la dimension a été validée à l'étape 508 pour au moins une ligne de réglage 150. On comprend que si cette vérification est négative, il n'est plus possible de diminuer davantage les dimensions des lignes de réglage 150 sans violer les critères d'acceptabilité des étapes 503 à 507 ; on passe donc à une étape 513 où on enregistre en mémoire les dimensions des lignes de réglage 150 en tant que dimensions des éléments d'espacement 40. On comprend que si au contraire cette vérification est positive, il est encore éventuellement possible de diminuer les dimensions de certaines des lignes de réglage 150 sans violer les critères d'acceptabilité des étapes 503 à 507 ; on retourne donc à l'étape 501 pour sélectionner de nouveau une ligne de réglage 150 et répéter les étapes 502 à 509.
- [0104] En variante, seulement certains des critères d'acceptabilité des étapes 503 à 507 peuvent être utilisés.
- [0105] Les étapes du procédé de calcul 400 peuvent être mises en œuvre par un programme d'ordinateur convenable exécuté par un ordinateur. Les mesures de position obtenues à l'étape 401 peuvent être entrées entièrement ou partiellement manuellement par un utilisateur, ou bien être fournies au programme d'ordinateur dans un format lisible par ordinateur.
- [0106] Les principes qui précèdent peuvent être appliqués à de nombreux types de paroi de cuve comprenant des modules de paroi plans et des éléments d'espacement disposés entre les modules de paroi plans et une paroi porteuse. On décrit ci-après deux variantes de réalisation de telles parois de cuve.
- [0107] On a représenté sur les figures 11 à 13 une première variante de réalisation de la

paroi périphérique verticale 22. Dans cette variante, les éléments d'espacement 40 prennent la forme de cales d'épaisseur. La [Fig.12] est une vue en coupe des modules de paroi 30 au niveau de leurs centres et ne montre donc pas les cales 40.

- [0108] Les modules de paroi 30 prennent la forme de blocs thermiquement isolants de forme générale parallélépipédique. Les blocs 30 sont ancrés sur la paroi porteuse verticale 12 au niveau de leurs coins par des organes d'ancrage dont les positions sont indiquées par les repères 90 sur la [Fig.10]. Les cales 40 sont agencées sur ces organes d'ancrage, ou bien à proximité de ces organes d'ancrage. En outre, les cales 40 sont agencés sous les blocs 30. Les dimensions variables des cales 40 permettent ainsi de rattraper les défauts de planéité de la paroi porteuse verticale 12.
- [0109] La [Fig.12] montre plus précisément la structure des blocs 30. Les blocs 30 comprennent un bloc 32 de mousse polymère, par exemple en mousse polyuréthane, optionnellement renforcée de fibres de verre et pouvant présenter une densité comprise entre 130 et 200 kg/m<sup>3</sup>. Le bloc 32 est pris en sandwich entre une plaque de couvercle 31 et une plaque de fond 33, qui sont par exemple réalisées en bois contreplaqué.
- [0110] On voit en outre sur la [Fig.12] que des bouchons de laine de verre 318 et/ou des blocs de mousse polyuréthane 319 peuvent être disposés entre les blocs 30 afin de combler des interstices 990 ménagés entre ces derniers. En outre, des cordons de mastic 98 peuvent éventuellement être disposés entre les blocs 30 et la paroi porteuse verticale 12. Un revêtement 99, par exemple en polymère, peut être avoir été appliqué à la surface de la paroi porteuse verticale 12 préalablement à la pose des blocs 30 et des cales 40.
- [0111] Des tôles métalliques 171 sont disposées au-dessus des blocs 30 et sont soudées par leurs bords selon la technique connue afin de constituer une membrane étanche. De façon non représentée, les bords des tôles métalliques 171 peuvent être soudés à des platines métalliques que portent les plaques de couvercle 31 des blocs 32 afin de retenir les tôles métalliques 171 sur les plaques de couvercle 31. Les tôles métalliques 171 peuvent présenter des ondulations 172 afin d'absorber les phénomènes de contraction thermique dus au contact avec un produit liquide froid, tel que du GNL.
- [0112] La [Fig.13] représente une partie de la paroi périphérique verticale 22 au niveau d'un angle entre deux de ses facettes planes. Les angles de la paroi périphérique verticale 22 sont uniquement matérialisés par une jonction (non représentée) entre deux blocs 30 adjacents.
- [0113] La disposition des cales 40 sous les blocs 30 représentée sur la [Fig.10] n'est qu'un exemple. Les cales 40 pourraient être disposées différemment par rapport aux blocs 30 ; par exemple une cale 40 pourrait être disposée sous chaque coin de chaque bloc 30.
- [0114] En outre, des cales supplémentaires 80 peuvent être disposées sous chaque bloc 30,

entre les emplacements des cales 40, comme représenté sur la [Fig.6]. Les dimensions de ces cales supplémentaires 80 peuvent être calculées à partir des dimensions des cales 40 calculées par le procédé de calcul 400 et des mesures de position obtenues à l'étape 401.

- [0115] En outre, les éléments d'espacement 40 peuvent prendre d'autres formes que des cales d'épaisseur. Purement à titre d'illustration, on a représenté schématiquement sur la [Fig.14] une deuxième variante de réalisation de la paroi périphérique verticale 22 dans laquelle les éléments d'espacement 40 prennent la forme de tiges d'ancrage. Les modules de paroi 30 prennent la forme de panneaux plans de forme générale parallélogrammique. De façon non représentée, des tôles métalliques sont disposées au-dessus des modules de paroi 30 et sont soudées par leurs bords selon la technique connue afin de constituer une membrane étanche. Par exemple les tôles métalliques peuvent être soudées à des platines que présentent les modules de paroi 30.
- [0116] Chaque panneau 30 comporte ici une plaque de fixation 51 rectangulaire qui est ancrée, au niveau de chacun de ses coins, par les tiges d'ancrage 40. Pour cela la plaque de fixation 51 présente au niveau de ses coins des lamages 52. Les extrémités des tiges d'ancrage 40 opposées à la paroi porteuse verticale 12 sont reçues dans des trous transversants (non référencés) que présentent les fonds des lamages 52. Les tiges d'ancrage 40 peuvent ainsi être fixées au fond des lamages 52 par des moyens d'ancrage (non représentés) qui maintiennent chaque panneau 30 en appui en direction de la paroi porteuse verticale 12. Après avoir installé les panneaux 30 sur la paroi porteuse verticale 12, on peut injecter, dans l'espace 94 laissé entre les panneaux 30 et la paroi porteuse verticale 12, un coulis de ciment ou autre matériau analogue afin d'assurer la tenue mécanique de la paroi périphérique verticale 22 sur la paroi porteuse verticale 12.
- [0117] On a décrit jusqu'ici une paroi périphérique verticale 22 qui est réalisée exclusivement en juxtaposant des modules de paroi 30 qui sont plans. Toutefois, comme représenté sur la [Fig.15A], la paroi périphérique verticale 22 peut en variante comprendre des blocs diédriques 660 disposés entre les modules de paroi 30 plans. Les blocs diédriques 660 présentent un dièdre d'angle  $\beta$ , où  $\beta$  est la valeur de référence discutée précédemment. Des éléments d'espacement 40, ici des cales d'épaisseur, sont également disposés entre ces blocs diédriques 660 et la paroi porteuse verticale 12. Les principes décrits ci-dessus peuvent également s'appliquer à une paroi périphérique verticale 22 réalisée de cette manière, à condition de tenir compte de la présence des blocs diédriques 660 en modifiant le procédé de calcul 400 de la façon suivante :
- [0118] À l'étape 506, le critère de torsion décrit ci-dessus est adapté pour les lignes de réglage 150 qui correspondent aux éléments d'espacement 40 correspondant aux blocs diédriques 660. Pour ces lignes de réglage 150, afin de permettre de calculer le plan

moyen 430, on déplace virtuellement les sommets de deux lignes de réglage 150 situées d'un même côté du dièdre du bloc diédrique 660 par une rotation destinée à transformer virtuellement le bloc diédrique 660 en un bloc virtuel plan 660', comme représenté sur la [Fig.15B]. On vérifie ensuite le critère de torsion au moyen plan moyen 430 comme on l'a expliqué ci-dessus en rapport avec la [Fig.10].

[0119] On ne vérifie pas le critère d'angle de l'étape 507 ; au lieu de cela, uniquement pour les lignes de réglage 150 qui correspondent aux éléments d'espacement 40 correspondant aux blocs diédriques 660, on vérifie à l'étape 507 si un critère de pente spécifique aux blocs diédriques 660 est vérifié. Ce critère de pente porte sur la différence de pente  $\zeta$  entre :

- d'une part, une pente entre le sommet de l'élément d'espacement 40 correspondant au bloc diédrique 660 et le sommet de l'élément d'espacement 40 adjacent, et
- d'autre part, une pente entre le sommet de l'élément d'espacement 40 correspondant au bloc diédrique 660 et un point 660P situé sur le dièdre du bloc diédrique 660 et aligné avec ces éléments d'espacement 40 (cf. figures 15A, 15C et 15D).

Plus précisément, on vérifie que cette différence de pente  $\zeta$  reste inférieure à un seuil 2B, où B est une grandeur fixée à l'avance. B est de préférence choisie égale à A afin de faciliter le raccord entre le bloc diédrique 660 et les modules de paroi plans 30.

[0120] On a illustré sur les figures 15C et 15D un exemple de calcul du critère de pente spécifique aux blocs diédriques 660. Tout d'abord, en référence à la [Fig.15C], on calcule la position du point 660P : il se trouve à l'intersection de la bissectrice 612 de l'angle de référence  $\beta$  avec la position 960 du bloc diédrique 660 compte tenu des hauteurs des éléments d'espacement 40 qui correspondent à ce dernier. Ensuite, en référence à la [Fig.15D], les coordonnées du point 660P et des sommets des deux lignes de réglage 150 alignées avec ce point étant désignées respectivement par  $(x_1, z_1)$   $(x_2, z_2)$ ,  $(x_p, z_p)$ , dans un repère cartésien  $(x, z)$  où x est parallèle à une ligne 190 (voir [Fig.8A]) reliant ces deux lignes de réglage 150, le critère de pente spécifique aux blocs diédriques 660 est vérifié si l'inégalité suivante est vérifiée :

[0121] [Math.3]

$$\zeta = \left| \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} - \frac{z_p - z_2}{x_p - x_2} \right| \leq 2B$$

[0122] Les principes décrits ci-dessus pour la paroi périphérique verticale 22 de la cuve 20 peuvent également s'appliquer à une paroi de fond 23 sensiblement plane de la cuve 20 disposée sur une paroi porteuse de fond 19 de la structure porteuse 10. Une telle paroi porteuse de fond 19 est représentée schématiquement sur les figures 16 et 17.

[0123] Comme représenté sur la [Fig.17], la paroi porteuse de fond 19 peut présenter des dé-

viations dimensionnelles par rapport à une forme idéale plane. Ces déviations dimensionnelles peuvent par exemple être dues à des tolérances dimensionnelles sur une construction en béton.

- [0124] Sur la [Fig.17], on a également esquissé en pointillés la position de la paroi de fond 23 de la cuve 20. Comme la paroi périphérique verticale 22, la paroi de fond 23 de la cuve 20 est formée de modules de paroi plans juxtaposés (non représentés), qui peuvent être identiques aux modules de paroi plans 30 constituant la paroi périphérique verticale 22 ; et des éléments d'espacement (non représentés), qui peuvent être identiques aux éléments d'espacement 40 de la paroi périphérique verticale 22, sont disposés entre les modules de paroi et la paroi porteuse de fond afin de rattraper les dimensions précitées.
- [0125] Comme pour la paroi périphérique verticale 22, il convient de donner aux éléments d'espacement des dimensions aussi petites que possible, afin de maximiser le volume interne de la cuve et de minimiser la quantité de matière à disposer entre la paroi porteuse de fond 19 et la paroi de fond 23, tout en assurant à la paroi de fond 23 une planéité suffisante pour supporter une membrane étanche assurant l'étanchéité de la cuve 20.
- [0126] Pour cela le procédé de calcul 400 est modifié de la façon suivante :
- à l'étape 401, les mesures de position obtenues incluent des mesures de position de la paroi porteuse de fond 19 en trois dimensions ;
  - à l'étape 402, on définit en outre, dans l'espace interne 11, une position initiale de la paroi de fond 23. Cette position initiale est définie par une facette plane de fond 223 (cf. [Fig.17]) ;
  - à l'étape 403, on définit en outre des lignes de positionnement 700 (cf. [Fig.16]) définissant des emplacements 730 pour les modules de paroi de la paroi de fond 23. Selon un exemple de réalisation, les lignes de positionnement 700 sont définies à partir des lignes de positionnement 100. Par exemple, comme représenté sur la [Fig.16], les lignes de positionnement 700 comprennent des premières lignes de positionnement 710 qui sont des prolongements des lignes de positionnement verticales 110 sur la paroi porteuse de fond 19, et des deuxièmes lignes de positionnement 720 chacune orthogonale à des premières lignes de positionnement 710 ;
  - à l'étape 404, on définit en outre des lignes de réglage 750 (cf. [Fig.17]). Les lignes de réglage 750 représentent les positions des éléments d'espacement de la paroi de fond 23 dans sa position finale, et, comme les lignes de réglage 150, sont disposées de telle sorte qu'au moins une ligne de réglage 750 coupe chacun des emplacements pour les modules de paroi de la paroi de fond 23 ;
  - à l'étape 405, on calcule en outre des dimensions initiales des lignes de réglage 750 à partir des mesures de position de la paroi porteuse de fond 19 obtenues à l'étape 401,

et on diminue itérativement les dimensions des lignes de réglage 750 pour rapprocher les modules de paroi de la paroi de fond 23 de la paroi porteuse de fond 19. Cette diminution itérative est réalisée sous la contrainte de critères d'acceptabilité comportant des critères de planéité limitant des déformations de la facette plane de fond 223.

- [0127] Pour résumer ce qui précède, le procédé de calcul 400 définit et traite les lignes de réglage 750 pour la paroi de fond 23 de la cuve 20 ensemble avec les lignes de réglage 150 pour la paroi périphérique verticale 22 de la cuve 20.
- [0128] Les critères d'acceptabilité pour les lignes de réglage 750 sont analogues voire identiques à ceux déjà discutés ci-dessus pour les lignes de réglage 150. On ne les détaille donc pas à nouveau.
- [0129] On précise toutefois que pour permettre un raccord suffisamment aisé entre la facette plane de fond 223 et les facettes planes 224, il est défini une valeur de référence  $\theta$  de l'angle séparant la facette plane de fond 223 et chaque facette plane 224. Cette valeur de référence  $\theta$  peut être identique pour chacune des arêtes 725 séparant la facette plane de fond 223 d'une facette plane 224.
- [0130] Le critère d'angle déjà décrit ci-dessus en rapport avec l'étape 507 et la [Fig.10] consiste, pour les arêtes 725, à calculer un angle  $\varphi$  formé par deux pentes PF, PV (cf. [Fig.17]) reliant les sommets des deux éléments d'espacement alignés les plus proches de l'arête 725, et à vérifier si l'angle  $\varphi$  est compris dans un intervalle incluant la valeur de référence  $\theta$ .
- [0131] En variante, le raccord entre la facette plane de fond 223 et les facettes planes 224 peut être réalisé au moyen de blocs diédriques, de façon analogue à ce qui a été décrit ci-dessus en rapport avec les figures 15A à 15D. Dans ce cas, le critère de pente spécifique aux blocs diédriques déjà décrit ci-dessus en rapport avec les figures 15A à 15D est vérifié pour les lignes de réglage 150 et 750 correspondant à ces blocs diédriques.
- [0132] 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.
- [0133] 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.
- [0134] Dans les revendications, tout signe de référence entre parenthèses ne saurait être interprété comme une limitation de la revendication.

## Revendications

- [Revendication 1] Procédé de calcul (400) pour calculer des dimensions d'éléments d'espacement (40) destinés à la construction d'une installation de stockage (1) d'un produit liquide, l'installation de stockage (1) comportant une structure porteuse (10) présentant un espace interne (11) délimité par une paroi porteuse (12) et une cuve étanche (20) installée dans l'espace interne (11) de la paroi porteuse (12), le procédé de calcul (400) étant mis en œuvre par ordinateur et comprenant :
- obtenir (401) des mesures de position de la paroi porteuse (12) en trois dimensions ;
  - à partir desdites mesures de position, définir (402), dans l'espace interne (11) de la structure porteuse (12), une position initiale de la cuve (20), la position initiale de la cuve comprenant une position initiale (220) pour la paroi périphérique (22) de la cuve (20), la paroi périphérique (22) présentant dans la position initiale (220) une pluralité de facettes planes (224) formant une surface cylindrique polygonale ayant comme directrice un polygone convexe et une génératrice perpendiculaire à la directrice ; et
  - pour chaque facette plane (224) :
    - définir (403) des lignes de positionnement (100) définissant des emplacements (130) de modules de paroi (30, 660) juxtaposés destinés à former la paroi périphérique (22) de la cuve (20) ;
    - à partir des positions des lignes de positionnement (100), définir (404) des lignes de réglage (150) s'étendant perpendiculairement à la facette plane (224) entre la facette plane (224) et la paroi porteuse (12), les lignes de réglage (150) étant disposées de telle sorte qu'au moins une ligne de réglage (150) coupe chacun des emplacements (130) des modules de paroi (30, 660), lesdites lignes de réglage (150) représentant les positions d'éléments d'espacement (40) destinés à être disposés entre chaque module de paroi (30, 660) et la paroi porteuse (12) dans une position finale de la paroi périphérique (22) de la cuve (20) ;
    - calculer (405) des dimensions initiales des lignes de réglage (150) à partir des mesures de position de la paroi porteuse (12) ;
    - diminuer (405) itérativement les dimensions des lignes de réglage (150) pour rapprocher les modules de paroi (30, 660) de la paroi porteuse (12) jusqu'à la position finale de la paroi périphérique (22) de la cuve (20), la

- diminution itérative étant réalisée sous la contrainte de critères d'acceptabilité, les critères d'acceptabilité comportant des critères de planéité limitant des déformations des facettes planes (224).
- [Revendication 2] Procédé de calcul (400) selon la revendication 1, dans lequel diminuer (405) itérativement les dimensions des lignes de réglage comprend :
- a) sélectionner (501, 510) une ligne de réglage (150) ;
  - b) diminuer (502) la dimension de la ligne de réglage (150) sélectionnée jusqu'à une dimension réduite ;
  - c) vérifier par le calcul (503, 504, 505, 506) que les critères d'acceptabilité sont vérifiés, et : dans l'affirmative, conserver (508) la dimension réduite obtenue à l'étape b) ; dans la négative, annuler (507) la diminution de dimension réalisée à l'étape b) ;
  - d) vérifier (509) s'il existe au moins une ligne de réglage encore non sélectionnée, et dans l'affirmative, effectuer les étapes a) à c) sur une dite ligne de réglage encore non sélectionnée ; dans la négative, vérifier (511) si la dimension réduite a été conservée à l'étape c) pour au moins une ligne de réglage, et : dans l'affirmative, effectuer de nouveau les étapes a) à d) ; dans la négative, enregistrer en mémoire (512) les dimensions des lignes de réglage (150) en tant que dimensions des éléments d'espacement (40).
- [Revendication 3] Procédé de calcul (400) selon la revendication 1 ou 2, dans lequel les dimensions des lignes de réglage (150) sont diminuées d'un incrément ( $\delta$ ) prédéterminé.
- [Revendication 4] Procédé de calcul (400) selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel les critères d'acceptabilité comprennent un critère de borne inférieure selon lequel les dimensions des lignes de réglage (150) restent supérieures ou égales à une première borne inférieure prédéfinie ( $\ell_{\min}$ ).
- [Revendication 5] Procédé de calcul (400) selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel les critères d'acceptabilité comprennent un critère d'écart selon lequel une distance entre chaque module de paroi (30, 660) et la paroi porteuse (12), perpendiculairement audit module de paroi (30, 660), reste supérieure ou égale à une deuxième borne inférieure prédéfinie ( $e_{\min}$ ).
- [Revendication 6] Procédé de calcul (400) selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel les critères d'acceptabilité comprennent un critère de pente portant sur une différence de pente ( $\alpha$ ) entre les sommets de trois éléments d'espacement voisins (40) alignés.
- [Revendication 7] Procédé de calcul (400) selon l'une quelconque des revendications 1 à 6,

- dans lequel les critères d'acceptabilité comprennent un critère de torsion portant sur les écarts entre chaque module de paroi (30, 660) au droit des éléments d'espacement (40) et un plan moyen (430) dudit module de paroi (30, 660), perpendiculairement audit module de paroi (30, 660).
- [Revendication 8] Procédé de calcul (400) selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel définir (402) ladite position initiale (220) de la paroi périphérique de la cuve comprend définir des valeurs de référence d'angles ( $\beta$ ) formés par lesdites facettes planes (224) au niveau d'arêtes (225) séparant lesdites facettes planes (224).
- [Revendication 9] Procédé de calcul (400) selon la revendication 8, dans lequel la paroi périphérique (22) de la cuve (20) est entièrement formée de modules de paroi plans (30) juxtaposés, et dans lequel les critères d'acceptabilité comprennent un critère d'angle selon lequel un angle ( $\gamma$ ) formé par deux pentes reliant les sommets des deux éléments d'espacement (40) alignés les plus proches d'une arête (225), de part et d'autre de ladite arête (225), est compris dans un intervalle incluant la valeur de référence de l'angle ( $\beta$ ) au niveau de ladite arête (225).
- [Revendication 10] Procédé de calcul (400) selon la revendication 8, dans lequel les modules de paroi comprennent, au niveau d'une desdites arêtes (225), des modules de paroi diédriques (660) disposés sur ladite arête (225) et présentant un dièdre dont l'angle est égal à la valeur de référence de l'angle ( $\beta$ ) au niveau de ladite arête (225), et dans lequel les critères d'acceptabilité comprennent un deuxième critère de pente portant sur une différence de pente ( $\zeta$ ) entre, d'une part, une pente entre le sommet d'un l'élément d'espacement (40) correspondant au bloc diédrique (660) et le sommet d'un l'élément d'espacement (40) adjacent, et, d'autre part, une pente entre le sommet dudit élément d'espacement (40) correspondant au bloc diédrique (660) et un point (660P) situé sur le dièdre du bloc diédrique (660) et aligné avec lesdits éléments d'espacement (40).
- [Revendication 11] Procédé de calcul (400) selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans lequel :
- la structure porteuse (10) comporte en outre une paroi porteuse de fond (19) plane présentant des tolérances dimensionnelles ;
  - obtenir (401) des mesures de position de la paroi porteuse (12) en trois dimensions comprend en outre obtenir des mesures de position de la paroi porteuse de fond (19) en trois dimensions ;
  - la position initiale de la cuve (20) comprend en outre une facette plane

de fond (223) définissant une position initiale pour une paroi de fond (23) de la cuve (20) ;

- le procédé de calcul (400) comprend en outre :

définir, à partir des lignes de positionnement (100), des lignes de positionnement de fond (700) définissant des emplacements de modules de paroi de fond juxtaposés (30) destinés à former la paroi de fond (23) de la cuve (20) ;

à partir des positions des lignes de positionnement de fond (700), définir des lignes de réglage de fond (750) s'étendant perpendiculairement à la facette plane de fond (223) entre la facette plane de fond (223) et la paroi porteuse de fond (19), les lignes de réglage de fond (750) étant disposées de telle sorte qu'au moins une ligne de réglage de fond (750) coupe chacun des emplacements (730) des modules de paroi de fond (30), lesdites lignes de réglage de fond (750) représentant les positions d'éléments d'espacement (40) destinés à être disposés entre chaque module de paroi de fond (30) et la paroi porteuse de fond (19) dans une position finale de la paroi de fond (23) de la cuve (20) ;

calculer des dimensions initiales des lignes de réglage de fond (750) à partir des mesures de position de la paroi porteuse de fond (19) ;

diminuer itérativement les dimensions des lignes de réglage de fond (750) pour rapprocher les modules de paroi (30) de la paroi porteuse de fond (19) jusqu'à la position finale de la paroi de fond (23) de la cuve (20), la diminution itérative étant réalisée sous la contrainte de critères d'acceptabilité, les critères d'acceptabilité comportant des critères de planéité limitant des déformations de la facette plane de fond (223).

[Revendication 12] Procédé de calcul (400) selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, dans lequel les modules de paroi (30) destinés à former la paroi périphérique (22) de la cuve (20) présentent un contour extérieur rectangulaire, les lignes de positionnement (100) définissent des emplacements rectangulaires (130) pour les modules de paroi, et les lignes de réglage (150) sont disposées de telle sorte qu'au moins quatre lignes de réglage (150) coupent chacun des emplacements rectangulaires (130) des modules de paroi (30) au voisinage des coins des emplacements rectangulaires (130).

[Revendication 13] Procédé de calcul (400) selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, dans lequel la paroi périphérique (22) de la cuve (20) présente dans la position initiale (220) une pluralité de facettes planes (224) formant une surface cylindrique polygonale ayant comme directrice un polygone

- convexe régulier.
- [Revendication 14] Procédé de calcul (400) selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, dans lequel la paroi porteuse (12) forme une surface cylindrique polygonale ou circulaire présentant des tolérances dimensionnelles.
- [Revendication 15] Procédé de calcul (400) selon l'une quelconque des revendications 1 à 14, dans lequel les éléments d'espacement (40) comprennent des cales d'épaisseur.
- [Revendication 16] Procédé de calcul (400) selon l'une quelconque des revendications 1 à 15, dans lequel les éléments d'espacement (40) comprennent des tiges d'ancrage.