

CUVE ETANCHE ET THERMIQUEMENT ISOLANTE COMPORTANT DES BANDES METALLIQUES

L'invention se rapporte au domaine de la fabrication de cuves
5 étanches et thermiquement isolantes et de leurs parties constitutives. En particulier, la présente invention se rapporte à des cuves destinées au stockage ou au transport de liquides froids ou chauds, par exemple des cuves pour le stockage et/ou le transport de gaz liquéfié par voie maritime.

Des cuves étanches et thermiquement isolantes peuvent être
10 utilisées dans différentes industries pour stocker des produits chauds ou froids. Par exemple, dans le domaine de l'énergie, le gaz naturel liquéfié (GNL) est un liquide qui peut être stocké à pression atmosphérique à environ -163°C dans des cuves de stockage terrestres ou dans des cuves embarquées dans des structures flottantes.

On connaît, par exemple d'après FR-A-2968284, une cuve de
15 stockage intégrée dans la coque d'un navire, dont la barrière étanche, notamment une barrière étanche primaire en contact avec le produit contenu dans la cuve, est constituée de virures métalliques qui sont reliées entre elles, de manière étanche, par des bords relevés définissant des
20 soufflets déformables de part et d'autre d'une aile de soudure. Ces virures sont reliées en leurs extrémités à un anneau de raccordement par l'intermédiaire des tôles de fourrures à la fois soudées sur l'anneau de raccordement et sur les virures.

25 Selon un mode de réalisation, l'invention fournit une cuve étanche et thermiquement isolante intégrée dans une structure porteuse, la structure porteuse comportant une pluralité de parois porteuses, la cuve comportant

une pluralité de parois de cuve fixées à chaque fois sur une paroi
30 porteuse respective, une paroi de cuve comportant :

une barrière d'isolation thermique retenue sur la paroi porteuse, la barrière d'isolation thermique présentant une surface de support plane

parallèle à la paroi porteuse respective,

une barrière d'étanchéité supportée par la barrière d'isolation et comportant une structure répétée comportant alternativement une virure métallique allongée et une aile de soudure allongée liée à la surface de support et saillante par rapport à celle-ci, l'aile de soudure s'étendant
5 parallèlement à la virure métallique sur au moins une partie de la longueur de la virure métallique, la virure métallique comportant dans le sens de la largeur une portion centrale plane posée sur la surface de support et des bords latéraux relevés par rapport à la surface de support qui sont disposés
10 contre les ailes de soudure adjacentes et soudés de manière étanche aux ailes de soudure,

dans laquelle la virure métallique s'étend entre deux bords opposés de la paroi de cuve et présente deux portions d'extrémité qui sont chacune assemblées de manière étanche à une structure d'arrêt respective au
15 niveau desdits bords opposés de la paroi de cuve,

caractérisée en ce que la virure métallique est constituée d'au moins une bande métallique continue présentant plusieurs portions longitudinales ayant des épaisseurs différentes, les portions longitudinales comportant une portion intermédiaire et au moins une portion d'extrémité dont l'épaisseur est
20 supérieure à l'épaisseur de la portion intermédiaire de la bande, la portion d'extrémité plus épaisse formant une zone d'assemblage de la bande avec la structure d'arrêt ou avec une autre bande métallique continue assemblée bout à bout avec la première bande métallique continue pour constituer la virure métallique.

25 Selon des modes de réalisation, une telle cuve peut comporter une ou plusieurs des caractéristiques suivantes.

Selon un mode de réalisation, la virure métallique est constituée d'une seule bande métallique s'étendant d'un seul tenant entre les deux bords opposés de la paroi de cuve, et dans laquelle les deux portions
30 d'extrémité de la bande sont plus épaisses que la portion intermédiaire et sont chacune assemblées à la structure d'arrêt respective au niveau des bords opposés de la paroi de cuve.

Selon un mode de réalisation, la virure métallique comporte une deuxième bande métallique continue assemblée bout à bout avec la première bande métallique continue dans le prolongement de la première bande métallique continue, dans laquelle chacune des deux bandes
5 métalliques continues présente, au niveau de la zone d'assemblage des deux bandes métalliques, une portion d'extrémité plus épaisse que la portion intermédiaire de la bande.

Selon un mode de réalisation, au moins une des deux bandes métalliques continues présente, au niveau de l'extrémité opposée à la zone
10 d'assemblage des deux bandes métalliques, une deuxième portion d'extrémité plus épaisse que la portion intermédiaire de la bande, la deuxième portion d'extrémité étant assemblée à la structure d'arrêt au niveau d'un bord de la paroi de cuve.

Selon un mode de réalisation, au moins une des deux bandes métalliques continues présente, au niveau de l'extrémité opposée à la zone
15 d'assemblage des deux bandes métalliques, une deuxième portion d'extrémité de même épaisseur que la portion intermédiaire de la bande, la deuxième portion d'extrémité étant assemblée à la structure d'arrêt au niveau d'un bord de la paroi de cuve.

20 Selon des modes de réalisation, chaque portion d'extrémité de la virure est soudée de manière étanche à la structure d'arrêt respective.

Selon des modes de réalisation, la virure est soudée sur la structure d'arrêt par un procédé CMT (pour transfert de métal à froid, de l'anglais Cold Metal Transfer) ou TIG (pour l'anglais Tungsten Inert Gas) ou par
25 soudure à froid.

Selon des modes de réalisation, la structure d'arrêt comporte une plaque positionnée au-dessus de la barrière d'isolation et la portion d'extrémité comporte un premier segment en appui sur la plaque de la structure d'arrêt et un second segment en appui sur la barrière d'isolation
30 thermique, le premier segment et le second segment étant reliés par un segment plié formant un décrochement dans la direction d'épaisseur de la virure métallique.

Selon des modes de réalisation, les ailes de soudure s'interrompent avant l'extrémité de la virure métallique, les bords relevés de deux bandes métalliques adjacentes étant soudés l'une à l'autre par une soudure d'arête disposée sur une partie de leur longueur jusqu'à l'extrémité de la virure métallique.

Selon des modes de réalisation, la soudure d'arête des bords relevés est réalisée à l'aide d'un procédé de transfert de métal à froid ou TIG avec fil d'apport.

Selon des modes de réalisation, la portion d'extrémité présente une épaisseur supérieure ou égale à 0.9mm.

Selon des modes de réalisation, la portion intermédiaire présente une épaisseur inférieure à 0.9mm et de préférence une épaisseur de 0.7mm.

Selon des modes de réalisation, la structure d'arrêt est soudée à une paroi porteuse.

Selon des modes de réalisation, la virure métallique et la structure d'arrêt sont réalisées en alliage d'acier au nickel à faible coefficient de dilatation, notamment connu sous le nom d'Invar®.

Selon un mode de réalisation, la virure métallique est en alliage à base de fer et comprend en poids:

$34,5\% \leq \text{Ni} \leq 53,5\%$

$0,15\% \leq \text{Mn} \leq 1,5\%$

$0 \leq \text{Si} \leq 0,35\%$, de préférence $0,1\% \leq \text{Si} \leq 0,35\%$

$0 \leq \text{C} \leq 0,07\%$

optionnellement :

$0 \leq \text{Co} \leq 20\%$

$0 \leq \text{Ti} \leq 0,5\%$

$0,01\% \leq \text{Cr} \leq 0,5\%$

le reste étant du fer et des impuretés résultant nécessairement de l'élaboration.

Selon des modes de réalisation, la paroi de cuve comporte en outre :

une barrière d'isolation thermique secondaire réalisée similairement à la

barrière d'isolation primaire,

une barrière d'étanchéité secondaire supportée par la barrière d'isolation secondaire et portant la barrière d'isolation primaire,

La barrière d'étanchéité secondaire étant réalisée similairement à la barrière

5 d'étanchéité primaire.

Selon des modes de réalisation, l'épaisseur varie progressivement sur une distance de 500mm. Selon des modes de réalisation, la portion d'extrémité s'étend sur 400mm.

10 Une telle cuve peut faire partie d'une installation de stockage terrestre, par exemple pour stocker du GNL ou être installée dans une structure flottante, côtière ou en eau profonde, notamment un navire méthanier, une unité flottante de stockage et de regazéification (FSRU), une unité flottante de production et de stockage déporté (FPSO) et autres.

15 Selon un mode de réalisation, un navire pour le transport d'un produit liquide froid comporte une double coque et une cuve précitée disposée dans la double coque.

Selon un mode de réalisation, l'invention fournit aussi un procédé de chargement ou déchargement d'un tel navire, dans lequel on achemine un
20 produit liquide froid à travers des canalisations isolées depuis ou vers une installation de stockage flottante ou terrestre vers ou depuis la cuve du navire.

Selon un mode de réalisation, l'invention fournit aussi un système de transfert pour un produit liquide froid, le système comportant le navire
25 précité, des canalisations isolées agencées de manière à relier la cuve installée dans la coque du navire à une installation de stockage flottante ou terrestre et une pompe pour entraîner un flux de produit liquide froid à travers les canalisations isolées depuis ou vers l'installation de stockage flottante ou terrestre vers ou depuis la cuve du navire.

30 Selon un mode de réalisation, l'invention fournit aussi une bande métallique continue à bords latéraux relevés convenant pour la réalisation d'une cuve précitée, la bande métallique étant obtenue à partir d'un flan

ayant, selon sa longueur, une première zone d'extrémité renforcée ayant une première épaisseur et une deuxième zone centrale ayant une deuxième épaisseur inférieure à la première épaisseur et une troisième zone d'extrémité ayant la première épaisseur ou la deuxième épaisseur, la bande
5 métallique présentant, selon sa largeur, une zone centrale plane et deux rebords latéraux pliés sensiblement perpendiculairement à la zone centrale plane, les deux rebords latéraux présentant une faible largeur par rapport à la zone centrale plane.

De préférence, la bande métallique est constituée d'un alliage à
10 base de fer et comprenant en poids :

$$34,5\% \leq \text{Ni} \leq 53,5\%$$

$$0,15\% \leq \text{Mn} \leq 1,5\%$$

$$0 \leq \text{Si} \leq 0,35\%, \text{ de préférence } 0,1\% \leq \text{Si} \leq 0,35\%$$

$$0 \leq \text{C} \leq 0,07\%$$

15 optionnellement :

$$0 \leq \text{Co} \leq 20\%$$

$$0 \leq \text{Ti} \leq 0,5\%$$

$$0,01\% \leq \text{Cr} \leq 0,5\%$$

le reste étant du fer et des impuretés résultant nécessairement de
20 l'élaboration.

Selon un mode de réalisation, la première zone renforcée présente une première taille moyenne de grains et la deuxième zone présente une deuxième taille moyenne de grain, la différence en valeur absolue entre la première taille de grains et la deuxième taille de grains étant inférieure ou
25 égale à 0,5 indice selon la norme ASTM E112-10.

Selon un mode de réalisation, l'alliage à base de fer comprend en poids :

$$34,5 \leq \text{Ni} \leq 42,5\%$$

$$0,15\% \leq \text{Mn} \leq 0,5\%$$

30 $0,1\% \leq \text{Si} \leq 0,35\%$

$$0,010\% \leq \text{C} \leq 0,050\%$$

optionnellement :

$$0 \leq \text{Co} \leq 20\%$$

$$0 \leq \text{Ti} \leq 0,5\%$$

$$0,01\% \leq \text{Cr} \leq 0,5\%$$

le reste étant du fer et des impuretés résultant nécessairement de
5 l'élaboration.

L'invention part du constat que la quantité de matière nécessaire à la fabrication d'une structure porteuse comportant une cuve étanche et thermiquement isolée dépend de la résistance à la fatigue de la cuve. En
10 particulier, la résistance à la fatigue de la cuve dépend de la résistance à la fatigue des soudures présentes sur les barrières étanches formant la cuve.

Ainsi, une idée à la base de l'invention est de proposer une cuve étanche et thermiquement isolée qui comprend une barrière étanche présentant une bonne résistance à la fatigue tout en limitant la quantité de
15 matière nécessaire à la réalisation d'une telle barrière étanche. Selon un aspect de l'invention, la barrière étanche est réalisée à l'aide de virures s'étendant d'un seul tenant entre deux structures d'arrêt, et les virures présentent une épaisseur variable de manière à pouvoir être reliées directement aux structures d'arrêt en leurs extrémités tout en présentant une
20 épaisseur plus faible entre ces extrémités. Selon un autre aspect de l'invention, la barrière étanche est réalisée à l'aide de virures composées de plusieurs bandes soudées bout à bout les unes aux autres au niveau de portions renforcées de ces bandes, afin que la résistance de cet assemblage soudé soit élevée.

25 Certains aspects de l'invention partent de l'idée de relier les virures aux structures d'arrêt à l'aide d'une soudure présentant une bonne résistance à la fatigue.

L'invention sera mieux comprise, et d'autres buts, détails, caractéristiques et avantages de celle-ci apparaîtront plus clairement au
30 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.

Sur ces dessins :

- 5 • La figure 1 est une vue partielle en perspective écorchée d'une paroi de cuve étanche et thermiquement isolant dans laquelle des modes de réalisation de l'invention peuvent être employés.
- 10 • La figure 2 est une vue partielle en perspective de la zone II de la figure 1 représentant la membrane étanche primaire.
- La figure 3 est une vue en coupe d'un détail d'une membrane étanche de la paroi de cuve de la figure 1 selon la ligne III-III.
- 15 • La figure 4 est une représentation schématique écorchée d'une cuve de navire méthanier et d'un terminal de chargement/déchargement de cette cuve.
- La figure 5 est une vue schématique en section longitudinale d'une bande initiale.
- La figure 6 est une vue schématique en section longitudinale d'une bande intermédiaire.
- 20 • La figure 7 est une vue schématique en section longitudinale d'une bande d'épaisseur variable.
- La figure 8 est une représentation schématique d'un flan obtenu à partir de la bande d'épaisseur variable.
- La figure 9 est une représentation schématique en section longitudinale d'un premier assemblage d'un flan avec une deuxième pièce.
- 25 • La figure 10 est une représentation schématique en section longitudinale de deux flancs assemblés bout à bout.
- La figure 11 est une vue de dessus schématique représentant plusieurs modes de réalisation d'une virure à bords latéraux relevés convenant pour réaliser une membrane étanche.
- 30

La figure 1 représente des parois étanches et isolantes d'une cuve intégrée dans une structure porteuse d'un navire.

La structure porteuse de la cuve est ici constituée par la coque interne d'un navire à double coque, dont on a représenté la paroi de fond par le chiffre 1, et par des cloisons transversales 2, qui définissent des compartiments dans la coque interne du navire. Les parois de la structure porteuse sont adjacentes deux à deux au niveau d'arêtes.

Sur chaque paroi de la structure porteuse, une paroi correspondante de la cuve est réalisée par superposition de, successivement, une couche d'isolation secondaire 3, une barrière étanche secondaire 4, une couche d'isolation primaire 5 et une barrière étanche primaire 6. Au niveau de l'angle entre les deux parois 1 et 2, les barrières étanches secondaires 4 des deux parois 1 et 2 et les barrières étanches primaires 6 des deux parois sont reliées par un anneau de raccordement 10 sous la forme d'un tube carré. L'anneau de raccordement 10 forme une structure qui permet de reprendre les efforts de tension résultant de la contraction thermique, notamment des éléments métalliques formant les barrières étanches, de la déformation de la coque à la mer et des mouvements de la cargaison. Une structure possible de l'anneau de raccordement 10 est décrite plus en détails dans FR-A-2549575.

La couche d'isolation primaire et la couche d'isolation secondaire sont constituées d'élément calorifuges et plus particulièrement de caissons calorifuges parallélépipédiques 20 et 21 juxtaposés selon un motif régulier. Chaque caisson calorifuge 20 et 21 comporte un panneau de fond et un panneau de couvercle 23. Des panneaux latéraux 24 et des voiles internes 25 s'étendent entre le panneau de fond et le panneau de couvercle 23. Les panneaux délimitent un espace dans lequel est mise en place une garniture calorifuge qui peut par exemple être constituée de perlite expansée. Chaque caisson 20 et 21 est maintenu sur la structure porteuse par l'intermédiaire d'organes d'ancrage 26. Les caissons 20 et 21 de la couche isolante primaire 5 et de la couche isolante secondaire 3 portent

respectivement la barrière étanche primaire 6 et la barrière étanche secondaire 4.

Les barrières étanches secondaire 4 et primaire 6 sont à chaque fois constituées d'une série de virures en Invar® 8 parallèles à bords relevés, qui
5 sont disposées alternativement avec des supports de soudure allongés 9, également en Invar®. Les virures 8 s'étendent depuis un premier tube carré au niveau d'une première cloison transversale 2 jusqu'à un deuxième tube carré d'une deuxième cloison transversale non représentée située en un côté opposé de la cuve. Les bords relevés 13 des virures sont soudés aux
10 supports de soudure 9 de manière étanche. Les supports de soudure 9 sont retenus à chaque fois à la couche isolante sous-jacente 3 ou 5, par exemple en étant logés dans des rainures 7 en forme de T inversé ménagées dans les panneaux de couvercles 23 des caissons 20 et 21.

Cette structure alternée est réalisée sur toute la surface des parois,
15 ce qui peut impliquer de très grandes longueurs de virures 8. Sur ces grandes longueurs, les soudures étanches entre les bords relevés 13 des virures 8 et les supports de soudure 9 intercalés entre eux peuvent être réalisées sous la forme de cordons de soudure 17 rectilignes et parallèles à la paroi.

Les virures à bords relevés 8 sont raccordées directement à l'anneau
20 de raccordement 10. A cet effet, les virures à bord relevés 8 présentent un bord d'extrémité 11 soudé continûment aux ailettes en Invar® 27, 28 de l'anneau de raccordement 10 pour reprendre les efforts de tension. La barrière étanche primaire 5 et la barrière étanche secondaire 3 sont ainsi soudées respectivement à une ailette primaire 27 et une ailette secondaires
25 28. Des caissons calorifuges primaires 20 sont positionnés entre l'ailette primaire 27 et l'ailette secondaire 28. L'ailette primaire 27 est fixée sur les caissons calorifuges primaires 20 par des vis 30. L'ailette secondaire 28 est fixée de la même manière sur les éléments calorifuges secondaires.

Le tube carré est relié aux parois 1 et 2 par l'intermédiaire de plaques
30 31 qui s'étendent dans la continuité des membranes étanches 4 et 6 et des ailettes 27, 28. Ces plaques 31 sont soudées à des plats soudés perpendiculairement aux parois 1 et 2 de la structure porteuse.

La figure 2 représente plus en détail la zone de raccordement de deux virures 8 de la barrière étanche primaire 6 sur l'ailette de soudure 27. Il est à noter que la zone de raccordement des virures 8 de la barrière
5 étanche secondaire 4 sur l'aile de soudure 28 est réalisée de la même manière.

Les bords relevés 13 de la virure à bords relevés 8 présentent un profil comportant une portion inclinée 14 qui s'élève progressivement depuis le bord 11 en direction des virures 8, puis une portion horizontale 15. Les virures 8
10 sont soudées bords à bords de manière continue et étanche au niveau de leur arête supérieure le long d'une première portion 29 à l'aide d'un procédé automatique CMT.

Le support de soudure 9 intercalé entre deux virures 8 se termine légèrement avant l'ailette 27. Tout au long de la portion centrale de la paroi de cuve, et jusqu'à proximité de la zone du bord d'extrémité 11, la liaison
15 étanche entre les bords relevés 13 des virures 8 et les supports de soudure 9 est réalisée par les cordons de soudures rectilignes 17, qui s'étendent à peu près à mi-hauteur des bords relevés 13 de part et d'autre du support de soudure 9 et parallèlement à la surface de support. Les cordons de soudure
20 17 sont réalisés par une machine de soudage à molettes.

Le cordon de soudure rectiligne 17 s'étend jusqu'à proximité de la première portion 29, le cordon de soudure présente ensuite une courbure vers le haut pour rejoindre la soudure d'arête effectuée bord à bord sur la première portion 29.

25

La figure 3 illustre plus en détail l'agencement de la paroi de cuve au niveau de la soudure entre l'ailette 27 de l'anneau de raccordement 10 et la virure à bords relevés 8 présentée dans la figure 2.

L'ailette 27 est fixée sur les éléments calorifuges 20 par l'intermédiaire de vis 30 traversant l'ailette 27 et vissées dans les panneaux supérieurs 23 des éléments calorifuges 20. La fixation par vis permet notamment la stabilisation de l'ailette 27.

30

La virure 8 s'étend d'un seul tenant entre ses deux bords d'extrémité 11. Entre ces deux bords d'extrémité la virure 8 est, sur une première partie de sa longueur, en appui sur les ailettes 27 et sur une seconde partie de sa longueur, en appui sur la couche isolante primaire 5.

5 La virure 8 présente un segment plié 34, pour assurer l'appui de la virure 8 sur à la fois l'ailette 27 et la couche isolante primaire 5, pour la majeure partie de sa surface inférieure. La section pliée s'étend à proximité du bord de l'ailette 27 parallèlement à l'ailette 27 et permet de compenser l'épaisseur de celle-ci.

10 La virure 8 présente en outre une épaisseur variable le long de sa longueur. Ainsi, la virure 8 présente au niveau de ses bords d'extrémités 11 une portion épaisse 33 fixées aux ailettes 27. Une portion fine 35 s'étend entre les portions épaisses 33 et présente une épaisseur constante. La portion fine 35 est reliée aux portions épaisses 33 par des portions de transition 36
15 dans lesquelles l'épaisseur diminue progressivement depuis chaque portion épaisse 33 jusqu'à la portion fine 35.

Plus particulièrement, selon un mode de réalisation, la portion épaisse 33 présente une épaisseur de 0.9mm et s'étend sur une longueur de 400mm et comprend le segment plié 34. La portion de transition 36 s'étend
20 ensuite sur une distance de 500mm et présente une épaisseur diminuant de 0.9mm jusque 0.7mm. Ainsi, la majeure partie de la paroi de cuve est recouverte par la portion fine 35 de la virure 8 qui présente une épaisseur de 0.7mm.

La portion épaisse 33 est reliée à l'ailette 27 par un cordon de
25 soudure 37 réalisé entre le bord 11 de la virure 8 et la surface supérieure de l'ailette 27, l'ailette 27 présentant une épaisseur de 1,5mm. Ainsi, le cordon de soudure réalisant la jonction entre la virure 8 et l'ailette 27, à savoir la soudure d'une bande épaisse de 0.9mm sur une bande épaisse de 1,5mm, présente une bonne résistance à la fatigue.

30 L'utilisation d'une telle virure 8 à épaisseur variable permet d'éviter ou de limiter l'utilisation, dans la longueur de la virure 8, d'un ensemble de tôles métalliques présentant des épaisseurs différentes, reliées entre elles par

des cordons de soudure qui présenteraient une résistance à la fatigue insuffisante. En effet, une soudure réalisée entre une tôle de 0.9mm et une tôle de 0.7mm présente une moins bonne résistance à la fatigue qu'une soudure entre une tôle de 0.9mm et une tôle de 1,5mm. Or, plus la résistance à la fatigue de la barrière étanche est basse, plus les critères de coque nécessaires pour le navire dans lequel la cuve est intégrée sont contraignants, ce qui nécessite un raidissage de la coque important. Ce raidissage de la coque se traduit notamment par une quantité importante d'acier nécessaire à la réalisation de la coque.

10 L'utilisation d'une virure 8 dont l'épaisseur varie le long de sa longueur permet de réaliser une membrane étanche 6 présentant une bonne résistance à la fatigue, tout en évitant d'utiliser des virures épaisses sur toute leur longueur.

La résistance à la fatigue étant plus importante, les critères de coque sont moins contraignants et permettent notamment une économie d'acier pour la réalisation de la coque. Une cuve telle que décrite ci-dessus peut être notamment intégrée dans un navire adapté à un critère de coque dynamique de 95MPa et un critère de coque statique de 145MPa.

20 L'utilisation d'une virure 8 réalisée d'un seul tenant sur toute la longueur de la paroi permet en outre de réduire le temps de soudage nécessaire pour la réalisation de la barrière étanche primaire 6 et de réduire les temps de contrôle des soudures dans la cuve.

La barrière étanche secondaire 4 présente une configuration similaire à la configuration de la barrière étanche primaire 6.

25 La virure 8 d'épaisseur variable peut être obtenue par un procédé qui va être décrit ci-dessous. Un exemple de procédé de fabrication d'une bande d'épaisseur variable selon sa longueur en alliage principalement à base de fer et de nickel va d'abord être décrit.

30 Dans une première étape de ce procédé, on fournit une bande initiale 101 obtenue par laminage à chaud.

La bande initiale 101 est une bande en alliage de type Invar cryogénique. Cet alliage comprend en poids :

$$34,5\% \leq \text{Ni} \leq 53,5\%$$

$$0,15\% \leq \text{Mn} \leq 1,5\%$$

$$0 \leq \text{Si} \leq 0,35\%, \text{ de préférence } 0,1\% \leq \text{Si} \leq 0,35\%$$

$$0 \leq \text{C} \leq 0,07\%$$

5 optionnellement :

$$0 \leq \text{Co} \leq 20\%$$

$$0 \leq \text{Ti} \leq 0,5\%$$

$$0,01\% \leq \text{Cr} \leq 0,5\%$$

10 le reste étant du fer et des impuretés résultant nécessairement de l'élaboration.

Le silicium a notamment pour fonction de permettre la désoxydation et d'améliorer la résistance à la corrosion de l'alliage.

Un alliage de type Invar cryogénique est un alliage qui présente trois propriétés principales :

15 - Il est stable vis-à-vis de la transformation martensitique jusqu'au-dessous de la température T_L de liquéfaction d'un fluide cryogénique. Ce fluide cryogénique est par exemple du butane, du propane, du méthane, de l'azote ou de l'oxygène liquide. Les teneurs en éléments gammagènes, nickel (Ni), manganèse (Mn) et carbone (C), de l'alliage sont ajustées de
20 façon à ce que la température de début de la transformation martensitique soit strictement inférieure à la température T_L de liquéfaction du fluide cryogénique.

- Il présente un faible coefficient moyen de dilatation thermique entre la température ambiante et la température T_L de liquéfaction du fluide
25 cryogénique.

- Il ne présente pas de transition de résilience « ductile-fragile ».

L'alliage utilisé a de préférence :

- un coefficient moyen de dilatation thermique entre 20°C et 100°C inférieur ou égal à $10,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, en particulier inférieur ou égal à $2,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;
30 - un coefficient moyen de dilatation thermique entre -180°C et 0°C inférieur ou égal à $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, en particulier inférieur ou égal à $2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; et

- une résilience supérieure ou égale à 100 joule/cm², en particulier supérieure ou égale à 150 joule/cm², à une température supérieure ou égale à -196°C.

De préférence, l'alliage utilisé présente la composition suivante, en

5 % en poids :

$$34,5 \leq \text{Ni} \leq 42,5\%$$

$$0,15\% \leq \text{Mn} \leq 0,5\%$$

$$0 \leq \text{Si} \leq 0,35\%, \text{ de préférence } 0,1\% \leq \text{Si} \leq 0,35\%$$

$$0,010\% \leq \text{C} \leq 0,050\%$$

10 optionnellement :

$$0 \leq \text{Co} \leq 20\%$$

$$0 \leq \text{Ti} \leq 0,5\%$$

$$0,01\% \leq \text{Cr} \leq 0,5\%$$

le reste étant du fer et des impuretés résultant nécessairement de

15 l'élaboration.

Dans ce cas, l'alliage utilisé a de préférence :

- un coefficient moyen de dilatation thermique entre 20°C et 100°C inférieur ou égal à $5,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;

20 - un coefficient moyen de dilatation thermique entre -180°C et 0°C inférieur ou égal à $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; et

- une résilience supérieure ou égale à 100 joule/cm², en particulier supérieure ou égale à 150 joule/cm², à une température supérieure ou égale à -196°C.

Encore plus particulièrement,

25 $35\% \leq \text{Ni} \leq 36,5\%$

$$0,2\% \leq \text{Mn} \leq 0,4\%$$

$$0,02 \leq \text{C} \leq 0,04\%$$

$$0,15 \leq \text{Si} \leq 0,25\%$$

optionnellement

30 $0 \leq \text{Co} \leq 20\%$

$$0 \leq \text{Ti} \leq 0,5\%$$

$$0,01\% \leq \text{Cr} \leq 0,5\%$$

le reste étant du fer et des impuretés résultant nécessairement de l'élaboration.

Dans ce cas, l'alliage présente de préférence :

- un coefficient moyen de dilatation thermique entre 20°C et 100°C inférieur ou égal à $1,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;
- un coefficient moyen de dilatation thermique entre -180°C et 0°C inférieur ou égal à $2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;
- une résilience supérieure ou égale à 200 joule/cm² à une température supérieure ou égale à -196°C.

Un tel alliage est un alliage de type Invar® cryogénique. Le nom commercial de cet alliage est Invar®-M93.

De manière classique, les alliages utilisés sont élaborés en four à arc électrique ou en four sous vide à induction.

Après des opérations d'affinage en poche permettant de régler les teneurs en éléments d'alliage résiduels, les alliages sont coulés en demi-produits, lesquels sont transformés à chaud, en particulier par laminage à chaud, afin d'obtenir des bandes.

Ces demi-produits sont par exemple des lingots. En variante, il s'agit de brames coulées en continu au moyen d'une installation de coulée continue de brames.

La bande ainsi obtenue est décapée et polie en procédé continu afin de limiter ses défauts : calamine, pénétration oxydée, paille et inhomogénéité en épaisseur dans le sens de la longueur et de la largeur de la bande.

Le polissage est notamment réalisé au moyen de meules ou de papiers abrasifs. Une fonction du polissage est d'éliminer les résidus du décapage.

A l'issue de cette étape de polissage, on obtient la bande initiale 1 fournie dans la première étape du procédé.

En option, avant l'étape de laminage homogène à froid, on effectue sur la bande un recuit d'homogénéisation de la microstructure. Ce recuit d'homogénéisation de la microstructure est notamment réalisé au

défilé dans un four de traitement thermique, appelé four de recuit d'homogénéisation de la microstructure dans la suite de la description, avec un temps de séjour dans le four de recuit d'homogénéisation de la microstructure compris entre 2 minutes et 25 minutes et une température de la bande lors du recuit d'homogénéisation de la microstructure comprise entre 850°C et 1200°C.

La bande initiale 101 a une épaisseur E_0 constante comprise entre 1,9 mm et 18 mm (voir figure 5).

On lamine ensuite la bande initiale 101 au cours d'une étape de laminage homogène à froid. Le laminage homogène est effectué suivant la longueur de la bande initiale 101.

Par laminage homogène, on entend un laminage transformant une bande d'épaisseur constante en une bande plus fine d'épaisseur également constante.

Plus particulièrement, l'étape de laminage homogène comprend une ou plusieurs passes assurées dans un laminoir où la bande passe dans une fente de laminage délimitée entre des rouleaux de travail. L'épaisseur de cette fente de laminage reste constante au cours de chaque passe de l'étape de laminage homogène.

Cette étape de laminage homogène aboutit à une bande intermédiaire 103 d'épaisseur E_c constante selon la direction de laminage, c'est-à-dire selon la longueur de la bande intermédiaire 103 (voir figure 6).

En option, l'étape de laminage homogène comprend au moins un recuit intermédiaire de recristallisation.

Lorsqu'il est présent, le recuit intermédiaire de recristallisation est effectué entre deux passes de laminage homogène successives. En variante ou en option, il est réalisé avant l'étape de laminage flexible à la fin de l'étape de laminage homogène, c'est-à-dire après toutes les passes de laminage réalisées pendant l'étape de laminage homogène.

Par exemple, le recuit intermédiaire de recristallisation est réalisé au défilé dans un four de recuit intermédiaire avec une température de la bande lors du recuit intermédiaire comprise entre 850°C et 1200°C et un

temps de séjour dans le four de recuit intermédiaire compris entre 30 secondes et 5 minutes.

Le recuit intermédiaire de recristallisation, ou s'il en est effectué plusieurs, le dernier recuit intermédiaire de recristallisation de l'étape de laminage homogène, est effectué lorsque la bande présente une épaisseur E_i comprise entre l'épaisseur E_0 de la bande initiale 101 et l'épaisseur E_c de la bande intermédiaire 103.

Lorsque le recuit intermédiaire de recristallisation est réalisé à la fin de l'étape de laminage homogène, l'épaisseur E_i de la bande lors du recuit intermédiaire de recristallisation est égale à l'épaisseur E_c de la bande intermédiaire 103 au début de l'étape de laminage flexible.

Avantageusement, dans le mode de réalisation dans lequel au moins un recuit intermédiaire de recristallisation est réalisé, on effectue un seul recuit intermédiaire de recristallisation. En particulier, ce recuit intermédiaire de recristallisation unique est effectué entre deux passes de laminage homogène successives lorsque la bande présente une épaisseur E_i strictement supérieure à l'épaisseur E_c de la bande intermédiaire 103.

De manière préférée, l'étape de laminage homogène ne comprend pas de recuit intermédiaire.

La bande intermédiaire 103 d'épaisseur E_c obtenue à l'issue de l'étape de laminage homogène est ensuite soumise à une étape de laminage flexible à froid.

Le laminage flexible est réalisé selon une direction de laminage s'étendant suivant la longueur de la bande intermédiaire 103.

Le laminage flexible permet d'obtenir une bande d'épaisseur variable selon sa longueur.

Pour cela, on fait varier en continu l'épaisseur de la fente de laminage du laminier utilisé. Cette variation est fonction de l'épaisseur souhaitée de la zone de la bande en cours de laminage de manière à obtenir une bande d'épaisseur variable selon sa longueur.

Plus particulièrement, et comme illustré sur la figure 7, on obtient à l'issue de l'étape de laminage flexible une bande 104 d'épaisseur variable

comprenant des premières zones 107 ayant une première épaisseur $e+s$ et des deuxièmes zones 110 ayant une deuxième épaisseur e , inférieure à la première épaisseur $e+s$. La première épaisseur $e+s$ et la deuxième épaisseur e correspondent chacune à une épaisseur de fente de laminage donnée.

5 Les premières zones 107 et les deuxièmes zones 110 ont chacune une épaisseur sensiblement constante, respectivement $e+s$ et e .

Elles sont reliées entre elles par des zones de liaison 111 d'épaisseur non constante selon la longueur de la bande 104 d'épaisseur variable. L'épaisseur des zones de liaison 111 varie entre e et $e+s$. Selon un
10 exemple, elle varie linéairement entre e et $e+s$.

L'étape de laminage homogène et l'étape de laminage flexible engendrent dans les premières zones 107, c'est-à-dire dans les zones les plus épaisses de la bande 104, un taux τ_1 de déformation plastique, après un éventuel recuit intermédiaire de recristallisation, supérieur ou égal à 30%, plus
15 particulièrement compris entre 30% et 98%, encore plus particulièrement compris entre 30% et 80%. Dans les plages précitées, le taux τ_1 de déformation plastique est avantageusement supérieur ou égal à 35%, plus particulièrement supérieur ou égal à 40%, et encore plus particulièrement supérieur ou égal à 50%.

20 Le taux τ_1 de déformation plastique engendré dans les premières zones 107 est défini comme suit :

- Si aucun recuit intermédiaire de recristallisation n'est effectué pendant l'étape de laminage homogène, le taux τ_1 de déformation plastique est le taux de réduction total engendré dans les premières zones
25 107 de la bande 104 par l'étape de laminage homogène et l'étape de laminage flexible, c'est-à-dire résultant de la réduction d'épaisseur depuis l'épaisseur initiale E_0 jusqu'à l'épaisseur $e+s$.

Dans ce cas, le taux τ_1 de déformation plastique, en pourcentage, est donné par la formule suivante : $\tau_1 = \frac{E_0 - (e + s)}{E_0} \times 100$ (1).

Ainsi, dans le cas où aucun recuit intermédiaire de recristallisation n'est effectué, le taux τ_1 de déformation plastique est égal au taux de réduction total engendré dans les premières zones 107 par l'étape de laminage homogène et l'étape de laminage flexible.

- 5 - Si au moins un recuit intermédiaire de recristallisation est effectué pendant l'étape de laminage homogène, le taux τ_1 de déformation plastique est le taux de réduction engendré dans les premières zones 107 du fait de la réduction d'épaisseur de la bande de l'épaisseur E_i qu'elle présente lors du dernier recuit intermédiaire de recristallisation effectué
- 10 pendant l'étape de laminage homogène jusqu'à l'épaisseur $e+s$.

Dans ce cas, le taux τ_1 de déformation plastique, en pourcentage, est donné par la formule suivante : $\tau_1 = \frac{E_i - (e + s)}{E_i} \times 100$ (2).

- Ainsi, dans le cas où un ou plusieurs recuits intermédiaires sont effectués pendant l'étape de laminage homogène, le taux τ_1 de
- 15 déformation plastique est strictement inférieur au taux de réduction total engendré dans les premières zones 107 par l'étape de laminage homogène et l'étape de laminage flexible à froid.

- Le taux τ_2 de déformation plastique, après un éventuel recuit intermédiaire de recristallisation, engendré dans les deuxièmes zones 110, est
- 20 strictement supérieur au taux τ_1 de déformation plastique dans les premières zones 107. Il est calculé de manière analogue, en remplaçant $e+s$ par e dans les formules (1) et (2) ci-dessus.

- La différence $\Delta\tau$ de taux de déformation plastique entre les deuxièmes zones 110 et les premières zones 107 est donnée par la relation
- 25 $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$.

Cette différence $\Delta\tau$ est avantageusement inférieure ou égale à 13% si l'épaisseur E_0 est strictement supérieure à 2 mm. Elle est avantageusement inférieure ou égale à 10% si l'épaisseur E_0 est inférieure ou égale à 2 mm.

Plus particulièrement, la différence $\Delta\tau$ est inférieure ou égale à 10% si E_0 est strictement supérieure à 2mm, et la différence $\Delta\tau$ est inférieure ou égale à 8% si E_0 est inférieure ou égale à 2mm.

Avantageusement, l'épaisseur E_c de la bande intermédiaire 103 avant l'étape de laminage flexible est en particulier égale à l'épaisseur e des deuxièmes zones 110 multipliée par un coefficient de réduction k compris entre 1,05 et 1,5. Avantageusement, k est environ égal à 1,3.

Avantageusement, les épaisseurs $e+s$ et e des premières et deuxièmes zones 107, 110 respectent l'équation :

$$e + s = (n + 1).e$$

où n est un coefficient constant compris entre 0,05 et 0,5.

En d'autres termes, la première épaisseur $e+s$ est égale à la deuxième épaisseur e multipliée par un coefficient de multiplication compris entre 1,05 et 1,5.

Cette équation se réécrit de la manière suivante : $s = n.e$, c'est-à-dire que la surépaisseur s des premières zones 107 par rapport aux deuxièmes zones 110 est égale au coefficient n multiplié par l'épaisseur e des deuxièmes zones 110.

L'épaisseur e des deuxièmes zones 110 est comprise entre 0,05 mm et 10 mm, plus particulièrement entre 0,15 mm et 10 mm, encore plus particulièrement entre 0,25 mm et 8,5 mm. Lorsque l'on réalise des feuillards, l'épaisseur e est inférieure ou égale à 2 mm, avantageusement comprise entre 0,25 mm et 2 mm. Lorsque l'on réalise des tôles, l'épaisseur e est strictement supérieure à 2 mm, en particulier comprise entre 2,1 mm et 10mm, plus particulièrement comprise entre 2,1 mm et 8,5 mm.

On soumet ensuite la bande 104 d'épaisseur variable résultant de l'étape de laminage flexible à un recuit final de recristallisation.

Le recuit final de recristallisation est réalisé au défilé dans un four de recuit final. La température du four de recuit final est constante pendant le recuit final de recristallisation. La température de la bande 104 pendant le recuit final de recristallisation est comprise entre 850°C et 1200°C.

Le temps de séjour dans le four de recuit final est compris entre 20 secondes et 5 minutes, plus particulièrement entre 30 secondes et 3 minutes.

La vitesse de défilement de la bande 104 dans le four de recuit final est constante. Elle est par exemple comprise entre 2m/min et 20m/min pour
5 un four de recuit final de longueur de chauffe égale à 10m.

Avantageusement, la température de la bande 104 pendant le recuit final est de 1025°C. Dans ce cas, le temps de séjour dans le four de recuit final est par exemple compris entre 30 secondes et 60 secondes pour une bande 104 d'épaisseur variable ayant des deuxièmes zones 110
10 d'épaisseur e inférieure ou égale à 2 mm. Le temps de séjour dans le four de recuit final est par exemple compris entre 3 minutes et 5 minutes pour une bande 104 d'épaisseur variable ayant des deuxièmes zones 110 d'épaisseur e strictement supérieure à 2 mm.

Le temps de séjour dans le four de recuit final, ainsi que la
15 température de recuit final sont choisies de manière à obtenir après le recuit de recristallisation final une bande 104 ayant des propriétés mécaniques et des tailles de grains quasiment homogènes entre les premières zones 107 et les deuxièmes zones 110. La suite de la description précise le sens de « quasiment homogène ».

De préférence, le recuit final est réalisé sous atmosphère réductrice,
20 c'est-à-dire par exemple sous hydrogène pur ou sous atmosphère H_2-N_2 . La température de givre est de préférence inférieure à -40°C. Dans le cas d'une atmosphère H_2-N_2 , la teneur en N_2 peut être comprise entre 0% et 95%. L'atmosphère H_2-N_2 comprend par exemple approximativement 70% de H_2
25 et 30% de N_2 .

Selon un mode de réalisation, la bande 104 d'épaisseur variable passe en continu du laminoir de laminage flexible au four de recuit final, c'est-à-dire sans bobinage intermédiaire de la bande d'épaisseur variable 104.

En variante, à l'issue de l'étape de laminage flexible, on bobine la
30 bande d'épaisseur variable 104 pour la transporter jusqu'au four de recuit final, puis on la déroule et on la soumet au recuit final de recristallisation.

Selon cette variante, la bande 104 enroulée a par exemple une longueur comprise entre 100 m et 2500 m, notamment si l'épaisseur e des deuxièmes zones 110 de la bande 104 est approximativement de 0,7 mm.

On obtient, à l'issue du recuit final de recristallisation, une bande 104
5 d'épaisseur variable selon sa longueur ayant les caractéristiques suivantes.

Elle comprend des premières zones 107 d'épaisseur $e+s$ et des deuxièmes zones d'épaisseur e , éventuellement reliées entre elles par des zones de liaison 111 d'épaisseur variant entre e et $e+s$.

De préférence, la différence en valeur absolue entre la taille
10 moyenne des grains des premières zones 107 et la taille moyenne des grains des deuxièmes zones 110 est inférieure ou égale à 0,5 indice selon la norme ASTM E112-10. La taille moyenne de grains en indice ASTM est déterminée en utilisant la méthode de comparaison à des images types décrite dans la norme ASTM E112-10. Conformément à cette méthode, pour déterminer la
15 taille moyenne des grains d'un échantillon, on compare une image de la structure des grains sur écran obtenue au moyen d'un microscope optique à un grossissement donné de l'échantillon ayant subi une attaque colorante (« contrast etch » en anglais) avec des images types illustrant des grains
maclés de différentes tailles ayant subi une attaque colorante
20 (correspondant à la plaque III de la norme). L'indice de la taille moyenne des grains de l'échantillon est déterminé comme étant l'indice correspondant au grossissement utilisé porté sur l'image type ressemblant le plus à l'image vue sur l'écran du microscope.

Si l'image vue sur l'écran du microscope est intermédiaire entre
25 deux images types successives de tailles de grains, l'indice de la taille moyenne des grains de l'image vue au microscope est déterminé comme étant la moyenne arithmétique entre les indices correspondant au grossissement utilisé portés sur chacune des deux images types.

Plus particulièrement, l'indice $G1_{ASTM}$ de la taille moyenne des grains
30 des premières zones 107 est au plus inférieur de 0,5 à l'indice $G2_{ASTM}$ de la taille moyenne des grains des deuxièmes zones 110.

La bande 104 d'épaisseur variable peut présenter des propriétés mécaniques quasiment homogènes.

En particulier :

- la différence en valeur absolue entre la limite d'élasticité à 0,2% des premières zones 107 notée R_{p1} et la limite d'élasticité à 0,2% des deuxièmes zones 110 notée R_{p2} est inférieure ou égale à 6MPa, et

- la différence en valeur absolue entre la charge à la rupture des premières zones 107 notée R_{m1} et la charge à la rupture des deuxièmes zones 110 notée R_{m2} est inférieure ou égale à 6MPa.

Par limite d'élasticité à 0,2% on entend, de manière classique, la valeur de la contrainte à 0,2% de déformation plastique.

De manière classique, la charge à la rupture correspond à la contrainte maximale avant striction de l'échantillon test.

Dans l'exemple illustré, la bande 104 d'épaisseur variable présente un motif répété périodiquement sur toute la longueur de la bande 104. Ce motif comprend successivement une moitié de première zone 107 de longueur $\frac{L_1}{2}$, une zone de liaison 111 de longueur L_3 , une deuxième zone 110 de longueur L_2 , une zone de liaison 111 de longueur L_3 et une moitié de première zone 107 de longueur $\frac{L_1}{2}$.

Avantageusement, la longueur L_2 de la deuxième zone 110 est très nettement supérieure à la longueur L_1 de la première zone 107. A titre d'exemple, la longueur L_2 est comprise entre 20 et 100 fois la longueur L_1 .

Chaque séquence formée d'une première zone 107 encadrée par deux zones de liaison 111 forme une zone de surépaisseur de la bande 104 d'épaisseur variable, c'est-à-dire une zone d'épaisseur supérieure à e . Ainsi, la bande 104 d'épaisseur variable comprend des deuxièmes zones 110 de longueur L_2 d'épaisseur e , séparées entre elles par des zones de surépaisseur.

Après le recuit final de recristallisation, on découpe la bande 104 d'épaisseur variable dans les zones de surépaisseur, de préférence au milieu des zones de surépaisseur.

On obtient ainsi des flans 112 illustrés sur la figure 8 comprenant une deuxième zone de longueur L2 encadrée à chacune de ses extrémités longitudinales par une zone de liaison 111 de longueur L3 et par une moitié de première zone 107 de longueur $\frac{L1}{2}$.

5 A l'issue de l'étape de découpe, les flans 112 sont planés selon un procédé de planage connu.

Les flans 112 sont ensuite enroulés en bobines à l'unité.

Selon une variante du procédé de fabrication décrit ci-dessus, on réalise le planage de la bande 104 d'épaisseur variable après le recuit final
10 de recristallisation et avant la découpe des flans 112.

Selon cette variante, on découpe la bande 104 d'épaisseur variable planée dans les zones de surépaisseur pour former les flans 112. De préférence, on découpe la bande 104 au milieu des zones de surépaisseur.

La découpe est par exemple réalisée sur la planeuse utilisée pour le
15 planage de la bande 104. En variante, la bande planée 104 est enroulée en bobine, puis découpée sur une machine différente de la planeuse.

Les flans 112 sont ensuite enroulés en bobines à l'unité.

On obtient au moyen du procédé de fabrication décrit ci-dessus des flans 112 formés d'une pièce comprenant une zone centrale 113 d'épaisseur
20 e, encadrée par des extrémités 114 renforcées, i.e. d'épaisseur supérieure à l'épaisseur e de la zone centrale 113. Les extrémités 114 correspondent à des zones de surépaisseur de la bande 104 d'épaisseur variable et la zone centrale 113 correspond à une deuxième zone 110 de la bande 104 d'épaisseur variable à partir de laquelle le flan 112 a été découpé.

25 Ces flans 112, qui présentent une épaisseur variable selon leur longueur tout en étant formés d'une pièce, ne présentent pas les faiblesses des assemblages soudés de l'état de la technique. En outre, leurs extrémités renforcées 114 permettent de les assembler par soudage à d'autres pièces en minimisant les faiblesses mécaniques dues à cet assemblage par
30 soudage.

Selon des variantes, les flans 112 peuvent par exemple être obtenus par découpe de la bande 104 à d'autres endroits que dans deux zones de surépaisseurs successives. Par exemple, ils peuvent être obtenus par découpe alternativement dans une zone de surépaisseur et dans une deuxième zone 110. Dans ce cas, on obtient des flans 112 ayant une seule
5 extrémité renforcée 114 d'épaisseur supérieure à e . Un tel flanc permet d'obtenir la virure 108 de la figure 11

Ils peuvent également être obtenus par découpe dans deux deuxièmes zones 110 successives.

10 A titre d'exemple, et comme illustré sur la figure 9, on peut assembler un flan 112 avec une deuxième pièce 116 en soudant l'une des extrémités renforcées 114 du flan 112 à un bord de la deuxième pièce 16. L'épaisseur de la deuxième pièce 116 est de préférence supérieure à l'épaisseur de la zone centrale 113 du flan 112. La soudure réalisée est plus particulièrement
15 une soudure à clin, encore appelée soudure à recouvrement.

La pièce 116 peut être un flan 112 tel que décrit ci-dessus.

Ainsi, sur la figure 10, on a illustré deux flans 112 assemblés bout à bout par soudage. Ces deux flans 112 sont soudés entre eux par leurs extrémités renforcées 114. Les virures 108 et 208 de la figure 11 peuvent être
20 raboutées de la même manière, comme on va le décrire plus bas.

Dans les exemples illustrés sur les figures 9 et 10 :

- la longueur de la zone centrale 113 est par exemple comprise entre 40 m et 60 m ; et
- la longueur de chaque extrémité renforcée 114 est par exemple
25 comprise entre 0,5 m et 2 m.

La deuxième épaisseur e est notamment environ égale à 0,7 mm.

La première épaisseur $e+s$ est environ égale à 0,9 mm.

En variante, on forme une pièce non plane à partir du flan 112.

Le procédé de fabrication d'une bande d'épaisseur variable selon
30 sa longueur décrit ci-dessus est particulièrement avantageux. En effet, il permet d'obtenir une bande en alliage principalement à base de fer et de nickel ayant la composition chimique définie ci-dessus ayant des zones

d'épaisseurs différentes mais des propriétés mécaniques quasi-homogènes. Ces propriétés sont obtenues grâce à l'utilisation d'un taux de déformation plastique après un éventuel recuit intermédiaire de recristallisation engendré par les étapes de laminage homogène et de laminage flexible dans les zones les plus épaisses supérieur ou égal à 30%.

Les exemples expérimentaux suivants illustrent l'importance de la plage de taux de déformation plastique revendiquée pour ce type d'alliage.

Dans une première série d'expériences, on a fabriqué des feuillards d'épaisseur variable, c'est-à-dire des bandes 104 d'épaisseur variable dont l'épaisseur e des deuxièmes zones 10 est inférieure ou égale à 2 mm.

Le tableau 1 ci-après illustre des essais de fabrication de feuillards d'épaisseur variable sans recuit de recristallisation intermédiaire.

Le tableau 2 ci-après contient des caractéristiques des feuillards obtenus par les essais du tableau 1.

Le tableau 3 ci-après illustre des essais de fabrication de feuillards d'épaisseur variable avec un recuit intermédiaire de recristallisation à l'épaisseur E_i .

Le tableau 4 ci-après contient des caractéristiques des feuillards obtenus par les essais du tableau 3.

Dans une deuxième série d'expériences, on a fabriqué des tôles d'épaisseur variable, c'est-à-dire des bandes 104 d'épaisseur variable dont l'épaisseur e des deuxièmes zones 110 est strictement supérieure à 2 mm.

Le tableau 5 illustre des essais de fabrication de tôles d'épaisseur variable avec ou sans recuit intermédiaire.

Le tableau 6 ci-après contient des caractéristiques des tôles obtenues par les essais du tableau 5.

Dans tous les tableaux, on a souligné les essais conformes à un procédé de fabrication d'une bande d'épaisseur variable selon sa longueur, en alliage à base de fer, l'alliage à base de fer comprenant, en poids :

$$34,5\% \leq \text{Ni} \leq 53,5\%$$

$$0,15\% \leq \text{Mn} \leq 1,5\%$$

$0 \leq Si \leq 0,35\%$, de préférence $0,1\% \leq Si \leq 0,35\%$

$0 \leq C \leq 0,07\%$

optionnellement :

$0 \leq Co \leq 20\%$

5 $0 \leq Ti \leq 0,5\%$

$0,01\% \leq Cr \leq 0,5\%$

le reste étant du fer et des impuretés résultant nécessairement de l'élaboration,

le procédé comprenant successivement les étapes suivantes :

10 - fourniture d'une bande initiale (101) d'épaisseur constante (E_0) obtenue par laminage à chaud ;

- laminage homogène à froid de la bande initiale (101) selon sa longueur pour obtenir une bande intermédiaire (103) d'épaisseur constante (E_c) selon la direction de laminage ;

15 - laminage flexible à froid de la bande intermédiaire (103) selon sa longueur pour obtenir une bande (104) d'épaisseur variable selon la direction de laminage, la bande (104) d'épaisseur variable ayant, selon sa longueur, des premières zones (107) ayant une première épaisseur ($e+s$) et des deuxièmes zones (110) ayant une deuxième épaisseur (e), inférieure à la
20 première épaisseur ($e+s$),

- recuit final de recristallisation au défilé de la bande (104) d'épaisseur variable dans un four de recuit final,

dans lequel le taux de déformation plastique engendré, après un éventuel recuit intermédiaire de recristallisation, par les étapes de laminage
25 homogène à froid et de laminage flexible à froid dans les premières zones (107) de la bande (104) d'épaisseur variable est supérieur ou égal à 30%.

On constate que lorsque le taux de déformation plastique τ_1 après un éventuel recuit intermédiaire de recristallisation est supérieur ou égal à 30% (essais 1 à 7 du tableau 1, 1 à 3 du tableau 3 et 1 à 9 du tableau 5), la
30 bande 104 d'épaisseur variable obtenue présente une différence de taille moyenne de grains entre la taille moyenne des grains des premières zones 107 (épaisseur $e+s$) et la taille des grains des deuxièmes zones 110 (épaisseur

e) inférieure ou égale à 0,5 indice ASTM en valeur absolue. Cette faible différence de taille moyenne de grains entre les premières zones 107 et les deuxièmes zones 110 résulte en des propriétés mécaniques quasi-homogènes, à savoir une différence de limite d'élasticité à 0,2% ΔR_p entre les premières zones 107 et les deuxièmes zones 110 inférieure ou égale à 6 MPa en valeur absolue, et une différence entre la charge à la rupture ΔR_m des premières zones 107 et des deuxièmes zones 110 inférieure ou égale à 6 MPa en valeur absolue.

Il est ainsi possible d'obtenir une bande 104 d'épaisseur variable ayant des propriétés mécaniques et des tailles de grains quasiment homogènes à l'issue d'un recuit de recristallisation très simple, puisque réalisé à température et vitesse de défilement constants.

La figure 11 est une vue schématique de dessus de la membrane étanche primaire d'une paroi d'une cuve étanche et isolante construite similairement à la cuve de la figure 1. Les extrémités de la paroi de cuve sont symbolisées par les ailettes de soudure 27 partiellement représentées.

Pour les besoins de l'illustration, les trois virures métalliques 8, 108 et 208 représentées sur la figure 11 sont fabriquées selon trois modes de réalisation différents. En pratique, une membrane étanche peut être construite avec des virures correspondant toutes au même mode de réalisation, ou bien en combinant des virures de plusieurs modes de réalisation selon tout ordre approprié. Les supports de soudure 9 sont également esquissés sur la figure 11, dans une représentation éclatée qui place les supports de soudure 9 à distance des virures 8, 108 et 208 pour faciliter la compréhension.

Les virures des trois modes de réalisation ont pour point commun de s'étendre longitudinalement d'une extrémité à l'autre de la paroi de cuve pour être soudées sur les deux ailettes de soudure 27 et de présenter deux bords latéraux relevés 13. Par exemple, la largeur de la portion centrale plane de la virure est comprise entre 40 et 60 cm et la hauteur du bord relevé 13 est comprise entre 2 et 6 cm.

Les bords relevés 13 de la virure à épaisseur variable 8 peuvent être obtenus à partir du flanc plan 112 à l'aide d'une plieuse comportant trois galets de chaque côté du flanc 112. Les galets exercent une pression sur le flanc afin de déformer le flanc pour générer les bords relevés. Des vérins hydrauliques asservis permettent de modifier la position des galets et la pression exercée par ceux-ci en fonction de la variation de l'épaisseur du flanc.

La virure 8 correspond au mode de réalisation décrit plus haut en référence aux figures 2 et 3 : il s'agit d'une bande métallique s'étendant d'un seul tenant d'un bout à l'autre de la paroi de cuve et comportant les portions renforcées 114 aux deux extrémités de la bande et la portion centrale de plus faible épaisseur 113 entre celles-ci. Pour les besoins de la représentation, les limites entre la portion de plus faible épaisseur 113 et les portions renforcées plus épaisses 114 ont été tracées en trait interrompu fin, mais il est entendu que cette limite peut s'étendre sur une zone de transition relativement étendue.

La virure 8 est posée d'un seul tenant dans la cuve. On découpe la portion inclinée 14 aux deux extrémités des deux bords relevés de la virure 8, avant de procéder aux soudures d'assemblage et d'étanchéité avec les anneaux de raccordement.

La virure 108 ou 208 est en revanche constituée de plusieurs bandes longitudinales successives à bords relevées qui peuvent être posées l'une après l'autre, ce qui rend ces modes de réalisation particulièrement adaptés pour une paroi de cuve de très grande longueur, par exemple environ 30 à 50m par bande longitudinale, soit une longueur totale supérieure à 50m. Chaque bande successive est continue, c'est-à-dire qu'elle est obtenue à partir d'un seul flanc décrit ci-dessus, et non pas en soudant ensemble plusieurs flancs.

Plus précisément, la virure 108 comporte deux bandes métalliques à bords relevés 13 qui sont assemblées bout à bout dans le prolongement l'une de l'autre au niveau d'une zone d'assemblage 40, par exemple par soudure. Chaque bande métallique est continue et présente une portion

d'extrémité renforcée plus épaisse 114 adjacente à la zone d'assemblage 40 et présente une épaisseur uniforme plus faible sur tout le reste de sa longueur 113, jusqu'au bord de la paroi de cuve où elle est assemblée à l'aillette de soudure 27.

- 5 La virure 208 est construite similairement à la virure 108, mais avec des bandes dont les deux extrémités 114 sont renforcées par une épaisseur plus importante. De ce fait, les extrémités renforcées plus épaisse 114 des bandes constituant la virure 208 sont présentes à la fois au niveau de la zone de raccordement 40 entre les bandes et au niveau des bords de la paroi de
- 10 cuve où la virure 208 est assemblée aux ailettes de soudure 27. En variante, la virure 208 peut être construite avec un nombre plus élevé de bandes continues mises bout à bout de la même manière.

- Lorsqu'une paroi de cuve est recouverte d'une membrane étanche fabriquée avec les virures 108 ou 208, la zone d'assemblage 40 de chaque
- 15 virure 108 ou 208 peut être placée au milieu de la paroi de cuve ou à d'autres emplacements. De préférence, ces emplacements sont décalés longitudinalement d'une virure à l'autre, pour ainsi éviter de former une ligne de soudure continue dans la direction transversale de la paroi.

- Bien qu'on ait décrit des éléments calorifuges sous forme de caissons
- 20 comportant de la perlite expansée, d'autres formes d'éléments calorifuges sont possibles. Notamment, les caissons peuvent être réalisés avec d'autres formes de matériaux isolants. Par exemple, les caissons peuvent comporter une couche de mousse isolante.

- 25 Les cuves décrites ci-dessus peuvent être utilisées dans différents types d'installations telles que des installations terrestres ou dans un ouvrage flottant comme un navire méthanier ou autre.

- En référence à la figure 4, une vue écorchée d'un navire méthanier
- 70 montre une cuve étanche et isolée 71 de forme générale prismatique montée dans la double coque 72 du navire. La paroi de la cuve 71
- 30 comporte une barrière étanche primaire destinée à être en contact avec le GNL contenu dans la cuve, une barrière étanche secondaire agencée entre

la barrière étanche primaire et la double coque du navire, et deux barrières thermiquement isolantes agencées respectivement entre la barrière étanche primaire et la barrière étanche secondaire, et entre la barrière étanche secondaire et la double coque 72.

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

10 La figure 4 représente un exemple de terminal maritime comportant un poste de chargement et de déchargement 75, une conduite sous-marine 76 et une installation à terre 77. Le poste de chargement et de déchargement 75 est une installation fixe off-shore comportant un bras mobile 74 et une tour 78 qui supporte le bras mobile 74. Le bras mobile 74
15 porte un faisceau de tuyaux flexibles isolés 79 pouvant se connecter aux canalisations de chargement/déchargement 73. Le bras mobile 74 orientable s'adapte à tous les gabarits de méthaniers. Une conduite de liaison non représentée s'étend à l'intérieur de la tour 78. Le poste de chargement et de déchargement 75 permet le chargement et le
20 déchargement du méthanier 70 depuis ou vers l'installation à terre 77. Celle-ci comporte des cuves de stockage de gaz liquéfié 80 et des conduites de liaison 81 reliées par la conduite sous-marine 76 au poste de chargement ou de déchargement 75. La conduite sous-marine 76 permet le transfert du gaz liquéfié entre le poste de chargement ou de déchargement 75 et
25 l'installation à terre 77 sur une grande distance, par exemple 5 km, ce qui permet de garder le navire méthanier 70 à grande distance de la côte pendant les opérations de chargement et de déchargement.

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

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.

5 L'usage du verbe «comporter», «comprendre» ou «inclure» et de ses formes conjuguées n'exclut pas la présence d'autres éléments ou d'autres étapes que ceux énoncés dans une revendication. L'usage de l'article indéfini « un » ou «une» pour un élément ou une étape n'exclut pas, sauf mention contraire, la présence d'une pluralité de tels éléments ou étapes.

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

Essai	Longueur d'onde (m)	E_0 (mm)	k	E_c (mm)	e (mm)	$n=s/e$	e+s (mm)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	τ_1 (%)	τ_2 (%)	$\tau_2-\tau_1$ (%)	Recuit final T°C ; durée
1	50	4,2	1,3	2,0	1,5	0,25	1,88	1,50	1,90	44,7	55	64	9	1025°C ; 60s
2	50	4,2	1,15	1,7	1,5	0,15	1,73	1,50	1,90	44,7	59	64	5	1025°C ; 60s
3	50	3,2	1,15	1,2	1,0	0,15	1,15	1,00	1,50	46,0	64	69	5	1025°C ; 60s
4	50	2,6	1,3	0,9	0,7	0,25	0,88	1,00	1,50	46,0	66	73	7	1025°C ; 40s
5	50	2,6	1,15	0,8	0,7	0,15	0,81	1,00	1,50	46,0	69	73	4	1025°C ; 40s
6	60	2,6	1,3	0,9	0,7	0,15	0,81	1,00	1,50	56,0	69	73	4	1025°C ; 40s
7	50	2,1	1,3	0,7	0,5	0,15	0,58	1,20	1,50	45,8	73	76	4	1025°C ; 30s
8	50	2,3	1,3	2,3	1,8	0,25	2,25	1,20	1,50	45,8	2	22	20	1025°C ; 60s
9	50	2,1	1,3	2,3	1,8	0,15	2,07	1,20	1,50	45,8	1	14	13	1025°C ; 60s
10	60	2,1	1,3	2,3	1,8	0,15	2,07	1,20	1,50	55,8	1	14	13	1025°C ; 60s

Tableau 1

Essai	Propriétés à l'épaisseur e+s			Propriétés à l'épaisseur e			Delta Rp (MPa)	Delta Rm (MPa)	Delta G _{ASTM}
	G _{1ASTM}	Rp (MPa)	Rm (MPa)	G _{2ASTM}	Rp (MPa)	Rm (MPa)			
1	8	288	487	8,5	292	491	-4	-4	0,5
2	8,5	293	492	9	296	495	-3	-3	0,5
3	8,5	293	492	9	295	495	-2	-3	0,5
4	8,5	293	490	9	296	496	-3	-6	0,5
5	9	297	496	9	296	496	1	0	0
6	9	297	495	9	296	496	1	-1	0
7	9,5	300	501	9,5	300	501	0	0	0
8	7,5	284	482	8,5	292	490	-8	-8	1
9	7,5	286	481	8,5	293	491	-7	-10	1
10	7,5	285	483	9	296	496	-11	-13	1,5

Tableau 2

Essai	Longueur d'onde (m)	E_0 (mm)	k	E_f (mm)	Recuit à E_f T°C ; durée	E_c (mm)	e (mm)	n=s/e	e+s (mm)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	τ_1 (%)	τ_2 (%)	$\tau_2 - \tau_1$ (%)	Recuit final T°C ; durée
1	50	2,6	1,3	1,5	1025°C ; 50s	0,8	0,6	0,25	0,75	1,20	1,50	45,8	50	60	10	1025°C ; 40s
2	50	2,6	1,3	1,5	1025°C ; 50s	0,8	0,6	0,15	0,69	1,20	1,50	45,8	54	60	6	1025°C ; 40s
3	60	2,6	1,3	1,5	1025°C ; 50s	0,7	0,5	0,15	0,58	1,20	1,50	55,8	62	67	5	1025°C ; 30s
4	50	4,2	1,30	2,00	1025°C ; 80s	1,95	1,5	0,25	1,88	1,50	1,90	44,7	6	25	19	1025°C ; 60s
5	50	4,2	1,15	2,00	1025°C ; 80s	1,73	1,5	0,15	1,73	1,50	1,90	44,7	14	25	11	1025°C ; 60s
6	50	3,2	1,30	1,30	1025°C ; 50s	1,30	1,0	0,25	1,25	1,50	1,90	44,7	4	23	19	1025°C ; 60s
7	50	3,2	1,15	1,50	1025°C ; 60s	1,15	1,0	0,15	1,15	1,00	1,50	46,0	23	33	10	1025°C ; 60s
8	50	2,6	1,30	0,90	1000°C ; 40s	0,91	0,7	0,25	0,88	1,00	1,50	46,0	3	22	19	1025°C ; 40s
9	60	2,6	1,15	1,00	1000°C ; 40s	0,81	0,7	0,15	0,81	1,00	1,50	56,0	20	30	11	1025°C ; 40s

Tableau 3

Essai	Propriétés à l'épaisseur e+s			Propriétés à l'épaisseur e			Delta Rp (MPa)	Delta Rm (MPa)	DeltaG _{ASTM}
	G1 _{ASTM}	Rp (MPa)	Rm (MPa)	G2 _{ASTM}	Rp (MPa)	Rm (MPa)			
1	8,5	292	491	8,5	293	491	-1	0	0
2	8,5	293	492	8,5	291	492	2	0	0
3	8,5	293	490	9	296	496	-3	-6	0,5
4	7	281	478	8	290	487	-9	-9	1
5	7	281	477	8	288	487	-7	-10	1
6	6,5	277	473	8	288	487	-11	-14	1,5
7	7	282	477	8	289	487	-7	-10	1
8	6,5	277	474	7,5	285	482	-8	-8	1
9	7	282	479	8	289	487	-7	-8	1

Tableau 4

Essai	Longueur d'onde (m)	E ₀ (mm)	k	E _i (mm)	Recuit à E _i T°C ; durée	E _c (mm)	e (mm)	n=s/e	e+s (mm)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	τ1 (%)	τ2 (%)	τ2-τ1 (%)	Recuit final T°C ; durée
1	12	16	1,30		Néant	10,7	8,2	0,25	10,25	1,00	1,50	8,0	36	49	13	1025°C ; 5min
2	6	16	1,15		Néant	9,4	8,2	0,15	9,43	0,50	0,75	4,0	41	49	8	1025°C ; 5min
3	12	8,2	1,30		Néant	5,5	4,2	0,25	5,25	0,50	0,75	10,0	36	49	13	1025°C ; 3min
4	12	8,2	1,15		Néant	4,8	4,2	0,15	4,83	1,50	2,25	6,0	41	49	8	1025°C ; 3min
5	6	8,2	1,30		Néant	4,2	3,2	0,25	4,00	0,80	1,20	2,8	51	61	10	1025°C ; 3min
6	9	8,2	1,15		Néant	3,7	3,2	0,15	3,68	1,00	1,50	5,0	55	61	6	1025°C ; 3min
7	12	16	1,30	8,2	1050°C ; 5 min	4,2	3,2	0,25	4,00	1,00	1,50	8,0	51	61	10	1025°C ; 3min
8	12	16	1,15	8,2	1050°C ; 5 min	4,8	4,2	0,15	4,83	0,50	0,75	10,0	41	49	8	1025°C ; 3min
9	6	16	1,15	8,2	1050°C ; 5 min	3,7	3,2	0,15	3,68	0,50	0,75	4,0	55	61	6	1025°C ; 3min

Tableau 5

Essai	Propriétés à l'épaisseur e+s			Propriétés à l'épaisseur e			Delta		Delta G _{ASTM}
	G1 _{ASTM}	Rp (MPa)	Rm (MPa)	G2 _{ASTM}	Rp (MPa)	Rm (MPa)	Delta Rp (MPa)	Delta Rm (MPa)	
1	7	280	479	7,5	285	483	-5	-4	0,5
2	7	281	477	7,5	285	483	-4	-6	0,5
3	7,5	285	482	8	288	487	-3	-5	0,5
4	8	288	487	8	288	487	0	0	0
5	8,5	293	492	8,5	292	492	1	0	0
6	8,5	292	491	9	297	496	-5	-5	0,5
7	8,5	291	490	8,5	293	490	-2	0	0
8	8	289	487	8,5	292	491	-3	-4	0,5
9	8,5	292	491	8,5	292	490	0	1	0

Tableau 6

REVENDEICATIONS

1. Cuve étanche et thermiquement isolante intégrée dans une structure porteuse, la structure porteuse comportant une pluralité de parois porteuses (1, 2), la cuve comportant
- 5 une pluralité de parois de cuve fixées à chaque fois sur une paroi porteuse respective (1, 2), une paroi de cuve comportant :
- une barrière d'isolation thermique retenue (3, 5) sur la paroi porteuse, la barrière d'isolation thermique présentant une surface de support plane
- 10 parallèle à la paroi porteuse respective,
- une barrière d'étanchéité (4, 6) supportée par la barrière d'isolation et comportant une structure répétée comportant alternativement une virure métallique allongée (8, 108, 208) et une aile de soudure allongée (9) liée à la surface de support et saillante par rapport à celle-ci, l'aile de soudure (9)
- 15 s'étendant parallèlement à la virure métallique (8) sur au moins une partie de la longueur de la virure métallique, la virure métallique comportant dans le sens de la largeur une portion centrale plane posée sur la surface de support et des bords latéraux (13) relevés par rapport à la surface de support qui sont disposés contre les ailes de soudure adjacentes et soudés de manière
- 20 étanche aux ailes de soudure (9),
- dans laquelle la virure métallique s'étend entre deux bords opposés de la paroi de cuve et présente deux portions d'extrémité qui sont chacune assemblées de manière étanche à une structure d'arrêt (10, 27, 28) respective au niveau desdits bords opposés de la paroi de cuve,
- 25 caractérisée en ce que la virure métallique (8, 108, 208) est constituée d'au moins une bande métallique continue présentant plusieurs portions longitudinales ayant des épaisseurs différentes, les portions longitudinales comportant une portion intermédiaire (113, 35) et au moins une portion d'extrémité (114, 33) dont l'épaisseur est supérieure à l'épaisseur de la
- 30 portion intermédiaire de la bande, la portion d'extrémité plus épaisse (114, 33) formant une zone d'assemblage de la bande avec la structure d'arrêt (10) ou avec une autre bande métallique continue assemblée bout à bout

avec la première bande métallique continue pour constituer la virure métallique.

2. Cuve selon la revendication 1, dans laquelle la virure métallique (8) est constituée d'une seule bande métallique s'étendant d'un seul tenant entre les deux bords opposés de la paroi de cuve, et dans laquelle les deux portions d'extrémité (33) de la bande sont plus épaisses que la portion intermédiaire (35, 36) et sont chacune assemblées à la structure d'arrêt respective (10, 27, 28) au niveau des bords opposés de la paroi de cuve.

3. Cuve selon la revendication 1, dans laquelle la virure métallique (108, 208) comporte une deuxième bande métallique continue assemblée bout à bout avec la première bande métallique continue dans le prolongement de la première bande métallique continue, dans laquelle chacune des deux bandes métalliques continues présente, au niveau de la zone d'assemblage (40) des deux bandes métalliques, une portion d'extrémité (114) plus épaisse que la portion intermédiaire (113) de la bande.

4. Cuve selon la revendication 3, dans laquelle au moins une des deux bandes métalliques continues présente, au niveau de l'extrémité opposée à la zone d'assemblage (40) des deux bandes métalliques, une deuxième portion d'extrémité (114) plus épaisse que la portion intermédiaire (113) de la bande, la deuxième portion d'extrémité (114) étant assemblées à la structure d'arrêt (10, 27, 28) au niveau d'un bord de la paroi de cuve.

5. Cuve selon la revendication 3 ou 4, dans laquelle au moins une des deux bandes métalliques continues présente, au niveau de l'extrémité opposée à la zone d'assemblage (40) des deux bandes métalliques, une deuxième portion d'extrémité (114) de même épaisseur que la portion intermédiaire (113) de la bande, la deuxième portion d'extrémité (114) étant assemblée à la structure d'arrêt (10, 27, 28) au niveau d'un bord de la paroi de cuve.

- 6.** Cuve selon l'une des revendications 1 à 5, dans laquelle chaque portion d'extrémité de la virure métallique (8, 108, 208) est soudée de manière étanche à la structure d'arrêt (10) respective.
- 7.** Cuve selon la revendication 6, dans laquelle la virure (8) est
5 soudée sur la structure d'arrêt par un procédé de transfert de métal à froid CMT ou par soudure TIG avec métal d'apport ou par soudure à froid.
- 8.** Cuve selon l'une des revendications 1 à 7, dans laquelle la structure d'arrêt (10) comporte une plaque (27, 28) positionnée au-dessus de la barrière d'isolation et la portion d'extrémité de la virure métallique (8, 108,
10 208) comporte un premier segment en appui sur la plaque de la structure d'arrêt et un second segment en appui sur la barrière d'isolation thermique, le premier segment et le second segment étant reliés par un segment plié (34) formant un décrochement dans la direction d'épaisseur de la virure métallique.
- 9.** Cuve selon l'une des revendications 1 à 8, dans laquelle les
15 ailes de soudure (9) s'interrompent avant l'extrémité de la virure métallique (8, 108, 208), les bords relevés de deux virures métalliques adjacentes étant soudés l'une à l'autre par une soudure d'arête disposée sur une partie de leur longueur jusqu'à l'extrémité de la virure métallique.
- 10.** Cuve selon la revendication 9, dans laquelle la soudure
20 d'arête des bords relevés (13) est réalisée à l'aide d'un procédé de transfert de métal à froid.
- 11.** Cuve selon l'une des revendications 1 à 10, dans laquelle la portion d'extrémité plus épaisse (114, 33) de la bande métallique présente
25 une épaisseur supérieure ou égale à 0.9mm.
- 12.** Cuve selon l'une des revendications 1 à 11, dans laquelle la portion intermédiaire (35) de la bande métallique présente une épaisseur inférieure à 0.9mm et de préférence une épaisseur de 0.7mm.
- 13.** Cuve selon l'une des revendications 1 à 12, dans laquelle la
30 structure d'arrêt (10) est soudée à une paroi porteuse.

14. Cuve selon l'une des revendications 1 à 13, dans laquelle ladite virure métallique et la structure d'arrêt sont réalisées en alliage d'acier au nickel à faible coefficient de dilatation.

15. Cuve selon l'une des revendications 1 à 14, dans laquelle la
5 bande métallique est en alliage à base de fer et comprend en poids:

$$34,5\% \leq \text{Ni} \leq 53,5\%$$

$$0,15\% \leq \text{Mn} \leq 1,5\%$$

$$0 \leq \text{Si} \leq 0,35\%, \text{ de préférence } 0,1\% \leq \text{Si} \leq 0,35\%$$

$$0 \leq \text{C} \leq 0,07\%$$

10 optionnellement :

$$0 \leq \text{Co} \leq 20\%$$

$$0 \leq \text{Ti} \leq 0,5\%$$

$$0,01\% \leq \text{Cr} \leq 0,5\%$$

le reste étant du fer et des impuretés résultant nécessairement de
15 l'élaboration.

16. Cuve selon l'une des revendications 1 à 15 dans laquelle la paroi de cuve comporte en outre :

une barrière d'isolation thermique secondaire (3), la barrière d'isolation thermique présentant une surface de support plane parallèle à la paroi
20 porteuse respective, et

une barrière d'étanchéité secondaire (4) supportée par la barrière d'isolation secondaire et portant la barrière d'isolation primaire (5),

la barrière d'étanchéité secondaire comportant une structure répétée comportant alternativement une virure métallique allongée (8, 108, 208) et

25 une aile de soudure allongée (9) liée à la surface de support et saillante par rapport à celle-ci, l'aile de soudure (9) s'étendant parallèlement à la virure métallique (8) sur au moins une partie de la longueur de la virure métallique,

la virure métallique comportant dans le sens de la largeur une portion centrale plane posée sur la surface de support et des bords latéraux (13)

30 relevés par rapport à la surface de support qui sont disposés contre les ailes de soudure adjacentes et soudés de manière étanche aux ailes de soudure (9),

dans laquelle la virure métallique s'étend entre deux bords opposés de la paroi de cuve et présente deux portions d'extrémité qui sont chacune assemblées de manière étanche à une structure d'arrêt (10, 28) respective au niveau desdits bords opposés de la paroi de cuve,

5 caractérisée en ce que la virure métallique (8, 108, 208) est constituée d'au moins une bande métallique continue présentant plusieurs portions longitudinales ayant des épaisseurs différentes, les portions longitudinales comportant une portion intermédiaire (113, 35) et au moins une portion d'extrémité (114, 33) dont l'épaisseur est supérieure à l'épaisseur de la
10 portion intermédiaire de la bande, la portion d'extrémité plus épaisse (114, 33) formant une zone d'assemblage de la bande avec la structure d'arrêt (10) ou avec une autre bande métallique continue assemblée bout à bout avec la première bande métallique continue pour constituer la virure métallique.

15 **17.** Navire (70) pour le transport d'un produit liquide froid, le navire comportant une double coque (72) et une cuve (71) selon l'une des revendications 1 à 16 disposée dans la double coque.

18. Utilisation d'un navire (70) selon la revendication 17 pour le chargement ou déchargement d'un produit liquide froid, dans laquelle on
20 achemine un produit liquide froid à travers des canalisations isolées (73, 79, 76, 81) depuis ou vers une installation de stockage flottante ou terrestre (77) vers ou depuis la cuve du navire (71).

19. Système de transfert pour un produit liquide froid, le système comportant un navire (70) selon la revendication 17, des canalisations
25 isolées (73, 79, 76, 81) agencées de manière à relier la cuve (71) installée dans la coque du navire à une installation de stockage flottante ou terrestre (77) et une pompe pour entraîner un flux de produit liquide froid à travers les canalisations isolées depuis ou vers l'installation de stockage flottante ou terrestre vers ou depuis la cuve du navire.

30 **20.** Bande métallique continue à bords latéraux relevés convenant pour la réalisation d'une cuve selon la revendication 1, la bande métallique étant obtenue à partir d'un flan (112) ayant, selon sa longueur,

une première zone d'extrémité renforcée (114) ayant une première épaisseur (e+s) et une deuxième zone (113) centrale ayant une deuxième épaisseur (e) inférieure à la première épaisseur (e+s) et une troisième zone d'extrémité ayant la première épaisseur (e+s) ou la deuxième épaisseur (e),
5 la bande métallique présentant, selon sa largeur, une zone centrale plane et deux rebords latéraux pliés sensiblement perpendiculairement à la zone centrale plane, les deux rebords latéraux présentant une faible largeur par rapport à la zone centrale plane.

21. Bande métallique selon la revendication 20, la bande
10 métallique étant constituée d'un alliage à base de fer et comprenant en poids :

$$34,5\% \leq \text{Ni} \leq 53,5\%$$

$$0,15\% \leq \text{Mn} \leq 1,5\%$$

$$0 \leq \text{Si} \leq 0,35\%, \text{ de préférence } 0,1\% \leq \text{Si} \leq 0,35\%$$

15 $0 \leq \text{C} \leq 0,07\%$

optionnellement :

$$0 \leq \text{Co} \leq 20\%$$

$$0 \leq \text{Ti} \leq 0,5\%$$

$$0,01\% \leq \text{Cr} \leq 0,5\%$$

20 le reste étant du fer et des impuretés résultant nécessairement de l'élaboration.