

ALLIAGE A BASE DE NICKEL POUR LA FABRICATION DE TUBES DE PIPELINE

La présente invention concerne un alliage à base de nickel destiné à être utilisé notamment dans le domaine de la pétrochimie et de l'extraction de produits pétroliers, et plus particulièrement dans le cadre de la fabrication de tubes de pipeline pour le transport de gaz ou de pétrole.

L'exploitation du gaz et du pétrole nécessite la pose de pipelines en mer. Pour des raisons de productivité et de rentabilité économique, on souhaite poser ces pipelines à une vitesse de pose d'environ 2 km/jour. Il existe actuellement trois technologies permettant de respecter ces contraintes de productivité:

- Technologie S-Lay : les tronçons de tube, de longueur typiquement égale à 9 m ou 12 m, sont fabriqués à terre au sein d'unités appelées « spoolbase », puis transportés en mer sur des navires pour être soudés bout-à-bout à l'horizontale sur une barge. La pose est dite en 'S' pour rappeler la forme prise par le tube avant de toucher le fond marin. Cette technologie est adaptée aux fonds inférieurs à 2000 m.

- Technologie J-Lay : Cette technologie est plus récente et adaptée aux eaux profondes (2000 m à 4000 m). Les tronçons de tube sont soudés entre eux en mer sur une barge à la verticale (avec un léger angle) et présentent une forme en 'J' avant de toucher le fond marin.

- Technologie R-Lay : La plus récente, elle est dédiée aux tubes de faible diamètre et aux eaux peu profondes. La ligne de tubes est intégralement soudée à terre, puis enroulée sur une roue pour être transportée en mer avant d'y être déroulée au moyen de barges spécifiques. Cette technologie est la plus performante.

Ces techniques de pose imposent des contraintes mécaniques sur les tubes, et en particulier sur les soudures orbitales entre tronçons de tube, en particulier sous l'effet de la flexion du tube durant la pose et sous l'effet de son poids propre avant de toucher le fond marin. Les tubes, et en particulier les soudures, doivent donc être conçus de sorte à résister à ces contraintes pour éviter la déformation des tubes pendant les phases de pose.

Aux contraintes en termes de vitesse de pose, s'ajoute également une nécessaire augmentation des profondeurs de pose afin d'aller chercher les gisements encore disponibles, ces profondeurs de pose pouvant aller jusqu'à environ 2500 m à 3000 m de profondeur. Cette augmentation de la profondeur de pose augmente les contraintes mécaniques exercées sur les tubes, et impose donc l'utilisation d'aciers au carbone présentant des propriétés mécaniques de plus en plus élevées.

Les tronçons de tube utilisés sont typiquement fabriqués en atelier par roulage de tôles en acier puis soudage longitudinal des bords de ces tôles au moyen du procédé

MIG/MAG avec un fil d'apport en acier, dont la composition est choisie en fonction du grade des tôles. L'épaisseur de paroi de ces tronçons de tube est typiquement de l'ordre de 25 mm et leur diamètre est compris entre 25 cm et 130 cm.

En variante, et en fonction de l'application, les tronçons de tube sont fabriqués par extrusion de billettes. Les tronçons de tube, ainsi que les tubes obtenus par soudage orbital de ces tronçons de tube, sont dans ce cas dépourvus de soudure longitudinale (« seamless tube » en anglais).

La résistance mécanique des tronçons de tube spécifiée en fonction du grade de l'acier est rappelée ci-dessous, selon l'API Specification 5L, pour les nuances d'acier X56, X60, X65, X70 ou X80 susceptibles d'être utilisées pour la fabrication de ces tronçons de tube. Le grade de l'acier correspond à la limite élastique des tôles, en unité ksi.

Nuance	Limite élastique minimum		Résistance à la traction minimum	
	ksi	MPa	ksi	MPa
X56	56,0	386	71,0	489
X60	60,0	413	75,0	517
X65	65,0	448	77,0	530
X70	70,0	482	82,0	565
X80	80,0	551	90,0	620

Les nuances d'acier X56, X60, X65, X70 ou X80 sont définies dans le document « API Specification 5L » de l'American Petroleum Institute, 45^{ème} édition de décembre 2012.

Dans le cas où les tronçons de tube comprennent une soudure longitudinale, on cherche, lors de la fabrication des tronçons de tube, à obtenir des soudures dont les propriétés mécaniques sont supérieures ou égales à celles de l'acier de la tôle de base (« overmatching ») de façon à pouvoir dimensionner les tronçons de tube, et par exemple définir l'épaisseur des tronçons de tube et le grade de l'acier utilisé, en fonction des conditions de pose (S, J, R) et du type d'exploitation de la ligne uniquement sans être contraint de tenir compte des soudures.

Dans le cas où les tronçons de tube sont fabriqués sans soudure longitudinale, par exemple par extrusion de billettes (technologie « seamless »), il est possible de s'affranchir des spécifications demandées aux soudures longitudinales (« overmatching »).

Après fabrication des tronçons de tube, la surface intérieure des tronçons de tube, y compris les soudures longitudinales éventuelles, est revêtue d'une couche de revêtement par rechargement par soudage au moyen d'un fil d'apport. Cette opération de

revêtement a pour but d'assurer la tenue à la corrosion du tube pendant le transport des produits pétroliers plus ou moins corrosifs. Le revêtement intérieur est typiquement réalisé en alliage Inconel ® 625. L'alliage Inconel ® 625 présente la composition suivante, en poids :

5	Cr : 20,0-23,0%
	Fe $\leq$ 5,0%
	Mo : 8,0-10,0%
	Nb+Ta : 3,15-4,15%
	C $\leq$ 0,10%
10	Mn $\leq$ 0,50%
	Si $\leq$ 0,50%
	P $\leq$ 0,002%
	S $\leq$ 0,015%
	Al $\leq$ 0,40%
15	Ti $\leq$ 0,40%
	Autres éléments $\leq$ 0,5%, le reste étant du nickel et des impuretés inévitables résultant de l'élaboration, avec Ni $\geq$ 58%.

L'alliage Inconel ® 625 est défini au Tableau 1 de la norme AWS A5.14/A5.14M :
20 2018 (Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods),
intitulé « Chemical composition requirements for Nickel and Nickel-Alloy Electrodes and
Rods » sous la référence dans la classification AWS ERNiCrMo-3 (numéro UNS N06625).

Une fois fabriqués, les tronçons de tube sont transportés sur une barge et soudés
en bout-à-bout par soudage orbital au fur et à mesure de la pose par l'une des techniques
25 mentionnées ci-dessus.

Quelle que soit la technique de pose utilisée, les soudures bout-à-bout (orbitales)
réalisées entre les tronçons de tube doivent supporter les contraintes de flexion de la
ligne durant la pose et son poids propre avant de toucher le fond marin. La résistance
mécanique des soudures orbitales est donc de première importance de façon à éviter la
30 déformation des soudures durant les phases de pose.

D'une manière générale, on recherche les propriétés suivantes pour les soudures
orbitales entre tronçons de tube :

- Overmatching : on cherche à obtenir des soudures orbitales présentant une
résistance mécanique supérieure ou égale à celle du métal de base, c'est-à-dire de l'acier
35 du tronçon de tube. Comme évoqué ci-dessus par rapport aux soudures longitudinales
des tronçons de tube, cet overmatching permet de dimensionner les tubes, et en

particulier de définir l'épaisseur du tube et le grade de l'acier utilisé, en fonction des conditions de pose (S, J, R) et du type d'exploitation de la ligne sans être contraint de tenir compte des soudures.

- 5 - Une tenue à la corrosion localisée supérieure ou égale à celle du revêtement du tronçon de tube, côté intérieur, afin de pouvoir dimensionner les tubes par rapport aux contraintes en termes de tenue à la corrosion localisée sans tenir compte de l'existence des soudures orbitales.

Dans l'ensemble de la description, on entend par corrosion localisée une corrosion susceptible de développer des mécanismes de piquûre.

- 10 Dans le but de répondre à l'ensemble des contraintes mentionnées ci-dessus, on a proposé de réaliser des soudures orbitales dans lesquelles la passe de racine, au niveau du revêtement, est réalisée au moyen d'un fil d'apport en alliage Inconel ® 625, et de terminer la soudure par des passes de remplissage en acier d'un grade équivalent au métal de base. Cette technique de soudage garantit de bonnes propriétés mécaniques
15 car elle assure une certaine continuité des matériaux utilisés. En revanche, elle pose d'importants problèmes de fissuration à chaud, et donc de soudabilité, liés à la dilution de l'alliage Inconel ® 625. Une telle solution n'est donc pas entièrement satisfaisante. En particulier, les fissures apparaissant pendant le soudage doivent être réparées, ce qui engendre un surcoût important. En outre, si elles ne sont pas réparées, ces fissures
20 risquent de générer la rupture des tubes en fonctionnement.

- On a également proposé de réaliser l'intégralité de la soudure au moyen d'un seul fil en alliage Inconel ® 625. Cette solution de soudage est de fait économique. En outre, elle ne génère aucun problème de fissuration à chaud, et conduit à des tenues à la corrosion comparables à celles du revêtement. Aussi, elle est largement utilisée pour
25 souder les tubes jusqu'au grade X56 voire X60. Cependant celle-ci ne convient plus pour les grades d'acier supérieurs (X65, X70 et X80). Or, les contraintes mentionnées ci-dessus, en particulier en termes de vitesse et de profondeur de pose, imposent de plus en plus l'utilisation d'aciers de grades supérieurs au grade X60, et notamment d'acier de grade X65, voire X70.

- 30 Un but de l'invention est donc de surmonter les inconvénients ci-dessus et de fournir un alliage susceptible d'être utilisé en tant que matériau d'apport pour la fabrication de tubes de pipeline destinés au transport de pétrole ou de gaz et adaptés pour la pose en haute mer à des profondeurs élevées, et en particulier jusqu'à environ 3000 m de profondeur, à des cadences élevées, en particulier de l'ordre de 2 km/jour.

- 35 La pose des tubes à des profondeurs pouvant aller jusqu'à environ 3000 m de profondeur, ainsi que les cadences élevées de pose, imposent l'utilisation d'un acier

présentant des propriétés mécaniques élevées. De préférence, en ce qui concerne les propriétés mécaniques des assemblages soudés, on cherche à obtenir, au minimum : une limite d'élasticité $R_{p0,2}$ supérieure ou égale à 500 MPa et une résilience KCV supérieure ou égale à 100 J/cm², et avantageusement une limite d'élasticité $R_{p0,2}$ supérieure ou égale à 550 MPa et/ou une résilience KCV supérieure ou égale à 120 J/cm².

Par ailleurs, l'utilisation des tubes en tant que pipelines pour le transport de pétrole ou de gaz impose une bonne tenue à la corrosion du matériau d'apport, ainsi qu'une bonne soudabilité. En particulier, on recherche une tenue à la corrosion localisée et une soudabilité supérieures ou égales à celles de l'alliage Inconel ® 625.

A cet effet, l'invention a pour objet un alliage présentant la composition suivante, en poids :

$$16,5\% \leq Cr \leq 25,0\%$$

$$11,0\% \leq Mo \leq 18,0\%$$

$$2,0\% \leq W \leq 7,0\%$$

$$Fe \leq 1,0\%$$

$$Mo+W \leq -0,5 \times (Cr+Fe) + 30\%$$

$$Mo+W \geq -0,5 \times (Cr+Fe) + 25\%$$

$$Ti+Ta \leq 0,80\%$$

$$0,01\% \leq Si \leq 0,75\%$$

$$0,01\% \leq Al \leq 0,35\%$$

$$0,01\% \leq Mn \leq 0,35\%$$

$$Ca \leq 0,005\%$$

$$Mg \leq 0,005\%$$

$$Nb \leq 0,01\%$$

$$0,001\% \leq C \leq 0,05\%$$

$$0,001\% \leq N \leq 0,05\%$$

$$S \leq 0,003\%$$

$$P \leq 0,005\%$$

optionnellement, $0,0010\% \leq \text{terres rares} \leq 0,015\%$, la teneur en silicium étant inférieure ou égale à 0,25% en présence de terres rares à une teneur comprise entre 0,0010% et 0,015%,

le reste étant du nickel et des impuretés inévitables résultant de l'élaboration, la teneur en nickel étant supérieure ou égale à 54%.

L'alliage selon l'invention peut également comprendre l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prises isolément ou selon toute(s) combinaison(s) techniquement possible :

- la teneur en fer est inférieure ou égale à 0,5% ;
- les terres rares sont choisies parmi l'yttrium, le cérium et le lanthane et les mélanges de ces éléments ; et
- les terres rares sont choisies parmi l'yttrium ou un mélange de cérium et de lanthane.

L'invention concerne également une pièce revêtue comprenant un substrat réalisé dans un matériau de base et un revêtement, réalisé dans un alliage selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, le matériau de base étant un matériau métallique, de préférence un acier au carbone, et par exemple un acier X56, X60, X65, X70.

Selon un exemple particulier la pièce revêtue est un tronçon de tube.

L'invention concerne également un fil d'apport réalisé dans un alliage tel que décrit ci-dessus.

L'invention concerne également un procédé de fabrication du fil d'apport décrit ci-dessus, comprenant les étapes suivantes :

- fourniture d'un demi-produit réalisé dans un alliage tel que décrit ci-dessus ;
- transformation à chaud de ce demi-produit pour former un fil intermédiaire ; et
- transformation du fil intermédiaire en fil d'apport, de diamètre inférieur à celui du fil intermédiaire, ladite transformation comprenant une étape de tréfilage.

L'invention concerne également un assemblage soudé comprenant au moins deux parties de pièces, réalisées chacune dans un matériau de base, les parties de pièces étant liées entre elles par un cordon de soudure obtenu à partir du fil d'apport tel que décrit ci-dessus, le matériau de base étant choisi parmi un alliage fer-nickel de type Fe-9Ni, un alliage à base de nickel de type C-276, C-4 ou 22 et un acier au carbone, par exemple un acier X56, X60, X65 ou X70.

L'assemblage soudé selon l'invention peut également comprendre l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prises isolément ou selon toute(s) combinaison(s) techniquement possible :

- l'assemblage soudé forme un tronçon de tube comprenant une tôle repliée en forme de tube, dont les bords longitudinaux constituent les parties de pièce liées entre elles par le cordon de soudure ;
- le tronçon de tube est muni d'un revêtement réalisé dans l'alliage tel que décrit ci-dessus, sur au moins une partie, et de préférence l'intégralité, de sa surface intérieure ; et
- l'assemblage soudé forme un tube comprenant au moins deux tronçons de tube, les tronçons de tube constituant les parties de pièce, et le cordon de soudure

s'étendant le long de la circonférence du tube, les tronçons de tube étant de préférence des tronçons de tube tel que décrit ci-dessus.

L'invention concerne également un procédé de fabrication d'un assemblage soudé comprenant le soudage entre elles des deux parties de pièces au moyen du fil d'apport tel que décrit ci-dessus, le soudage étant en particulier un soudage à l'arc.

Le procédé de fabrication de l'assemblage soudé peut également comprendre l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prises isolément ou selon toute(s) combinaison(s) techniquement possible :

- l'étape de soudage est une étape de soudage entre eux des bords longitudinaux de la tôle, la soudure étant de préférence une soudure longitudinale bout à bout ; et
- le procédé comprend en outre, avant l'étape de soudage, les étapes successives suivantes :

- fourniture d'un premier tronçon de tube et d'un deuxième tronçon de tube s'étendant chacun suivant un axe longitudinal, et réalisés dans le matériau de base ;

- positionnement des premier et deuxième tronçons de tube de telle sorte qu'une extrémité longitudinale du premier tronçon de tube soit disposée en regard d'une extrémité longitudinale du deuxième tronçon de tube selon l'axe longitudinal des premier et deuxième tronçons de tube ; et

l'étape de soudage étant une étape de soudage entre elles de deux extrémités longitudinales en regard des premier et deuxième tronçons de tube, le soudage étant de préférence un soudage bout à bout orbital.

L'invention concerne également une pièce ou partie de pièce réalisée dans un alliage tel que décrit ci-dessus, ladite pièce ou partie de pièce étant obtenue par fabrication additive.

Ce procédé de fabrication additive utilise, en particulier, en tant que matériau d'apport, un fil d'apport réalisé dans l'alliage tel que décrit ci-dessus et/ou une poudre réalisée dans l'alliage tel que décrit ci-dessus.

Le procédé de fabrication additive est par exemple un procédé de fabrication additive utilisant un arc électrique, un faisceau laser et/ou un faisceau d'électrons comme source d'énergie pour réaliser la fusion du matériau d'apport.

A titre d'exemple, le procédé de fabrication additive est un procédé arc-fil, Laser-fil, faisceau d'électrons-fil ou un procédé de fabrication additive hybride combinant les technologies arc-fil et Laser-poudre ou arc-fil et Laser-fil.

L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une pièce ou partie de pièce comprenant une étape de fabrication de ladite pièce ou partie de pièce par un procédé de fabrication additive métallique utilisant, en tant que matériau d'apport, un fil d'apport réalisé dans l'alliage tel que décrit ci-dessus et/ou une poudre réalisée dans l'alliage tel que décrit ci-dessus.

Le procédé de fabrication additive est par exemple un procédé de fabrication additive utilisant un arc électrique, un faisceau laser et/ou un faisceau d'électrons comme source d'énergie pour réaliser la fusion du matériau d'apport.

A titre d'exemple, le procédé de fabrication additive est un procédé arc-fil, Laser-fil, faisceau d'électrons-fil ou un procédé de fabrication additive hybride combinant les technologies arc-fil et Laser-poudre ou arc-fil et Laser-fil.

L'invention concerne également une utilisation du fil d'apport tel que décrit ci-dessus :

- comme fil d'apport de soudage pour souder entre elles deux parties de pièces réalisées dans un matériau de base, le matériau de base étant un alliage fer-nickel de type Fe-9Ni, un alliage à base de nickel de type C-276, C-4 ou 22, ou un acier au carbone, et en particulier un acier X56, X60, X65 ou X70 ; et/ou

- comme fil de rechargement pour réaliser un revêtement sur des pièces ou parties de pièces réalisées dans un matériau de base métallique, le matériau de base étant de préférence un acier au carbone, et par exemple un acier X56, X60, X65 ou X70 ; et/ou

- comme fil d'apport dans le cadre d'un procédé de fabrication additive métallique.

L'invention concerne également une poudre métallique réalisée dans un alliage tel que décrit ci-dessus.

L'invention concerne également un procédé de fabrication de la poudre métallique réalisée dans un alliage tel que décrit ci-dessus.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple, et faite en référence aux dessins annexés, parmi lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique en section d'un assemblage soudé selon l'invention ;

- la figure 2 est une vue schématique en perspective d'un tronçon de tube selon l'invention ;

- la figure 3 est une vue schématique de dessus d'une tôle utilisée lors de la mise en œuvre du procédé de fabrication d'un tronçon de tube ;

- la figure 4 est une vue schématique en perspective d'un tube selon l'invention ;

5 - la figure 5 est une vue schématique en perspective d'une pièce revêtue selon l'invention ; et

- la figure 6 est une vue schématique en perspective d'une pièce obtenue par fabrication additive selon l'invention.

Dans la suite de la description, toutes les teneurs sont exprimées en pourcentage en poids.

10 L'alliage selon l'invention présente la composition suivante, en poids :

$$16,5\% \leq \text{Cr} \leq 25,0\%$$

$$11,0\% \leq \text{Mo} \leq 18,0\%$$

$$2,0\% \leq \text{W} \leq 7,0\%$$

$$\text{Fe} \leq 1,0\%$$

15 $\text{Mo} + \text{W} \leq -0,5 \times (\text{Cr} + \text{Fe}) + 30\%$

$$\text{Mo} + \text{W} \geq -0,5 \times (\text{Cr} + \text{Fe}) + 25\%$$

$$\text{Ti} + \text{Ta} \leq 0,80\%$$

$$0,01\% \leq \text{Si} \leq 0,75\%$$

$$0,01\% \leq \text{Al} \leq 0,35\%$$

20 $0,01\% \leq \text{Mn} \leq 0,35\%$

$$\text{Ca} \leq 0,005\%$$

$$\text{Mg} \leq 0,005\%$$

$$\text{Nb} \leq 0,01\%$$

$$0,001\% \leq \text{C} \leq 0,05\%$$

25 $0,001\% \leq \text{N} \leq 0,05\%$

$$\text{S} \leq 0,003\%$$

$$\text{P} \leq 0,005\%$$

optionnellement, $0,0010\% \leq \text{terres rares} \leq 0,015\%$, la teneur en

silicium étant inférieure ou égale à 0,25% en présence de terres rares

30 à une teneur comprise entre 0,0010% et 0,015%,

le reste étant du nickel et des impuretés inévitables résultant de l'élaboration, la teneur en nickel étant supérieure ou égale à 54%.

Par impuretés inévitables résultant de l'élaboration, on entend des éléments qui sont présents dans les matières premières utilisées pour élaborer l'alliage ou qui
35 proviennent des appareils utilisés pour son élaboration, et par exemple des réfractaires des fours. Ces éléments résiduels n'ont pas d'effet métallurgique sur l'alliage.

Dans cet alliage, la teneur en nickel supérieure ou égale à 54% en poids assure une bonne ductilité de la matrice et une bonne tenue à la corrosion sous contrainte.

A une teneur comprise entre 16,5% et 25,0% en poids, le chrome assure une bonne tenue à la corrosion généralisée et améliore les propriétés mécaniques de l'alliage.

5 En particulier, les inventeurs ont constaté que la tenue à la corrosion généralisée est insuffisante lorsque la teneur en chrome est inférieure à 16,5% en poids. Par ailleurs, une teneur en chrome supérieure à 25,0% en poids résulte en une précipitation de la phase σ , associée à une perte de ductilité et une sensibilité accrue à la fissuration à chaud, et résulte ainsi en des propriétés mécaniques dégradées de l'alliage.

10 De préférence, la teneur en chrome est supérieure ou égale à 17,0% et inférieure ou égale à 23,0%.

Présent à des teneurs comprises entre 11,0% et 18,0% en poids, le molybdène améliore la résistance à la corrosion localisée.

15 Par ailleurs, le molybdène améliore considérablement les propriétés mécaniques. Les inventeurs ont constaté que, pour des teneurs en molybdène inférieures à 11,0% en poids, la tenue à la corrosion localisée et les propriétés mécaniques sont insuffisantes, tandis qu'une teneur en molybdène supérieure à 18% résulte en une précipitation des phases indésirables, résultant en une perte de ductilité et en une sensibilité accrue à la fissuration à chaud.

20 De préférence, la teneur en molybdène est supérieure ou égale à 11,5% et inférieure ou égale à 16,5%.

La teneur en tungstène est comprise entre 2,0% et 7,0% en poids. Présent à ces teneurs, le tungstène améliore également la tenue à la corrosion localisée. En outre, il améliore les propriétés mécaniques. Les inventeurs ont constaté que, pour des teneurs
25 en tungstène inférieures à 2,0%, la tenue à la corrosion localisée est insuffisante. Par ailleurs, une teneur en tungstène supérieure à 7,0% résulte en une précipitation des phases indésirables, résultant en une perte de ductilité et en une sensibilité accrue à la fissuration à chaud.

La teneur en fer est inférieure ou égale à 1,0% en poids. L'ajout de fer dégrade la
30 tenue à la corrosion généralisée. Une teneur en fer inférieure ou égale à 1,0% en poids permet l'élaboration de l'alliage au moyen de chutes de matières contenant une teneur résiduelle en fer, ce qui permet de réduire le coût d'élaboration. A une teneur supérieure à 1,0% en poids, il favorise également la précipitation de phases indésirables, résultant en une perte de ductilité et en une sensibilité accrue à la fissuration à chaud.

35 De préférence, la teneur en fer dans l'alliage est inférieure ou égale à 0,5% en poids.

La somme des teneurs en titane et en tantale est inférieure ou égale à 0,80% en poids. Présents aux teneurs revendiquées, le titane et le tantale améliorent considérablement les propriétés mécaniques, mais leur faible solubilité dans les alliages Ni-Cr génère des précipitations de phases indésirables. Aussi, leurs teneurs doivent être limitées à de faibles concentrations. Cependant, ils contribuent à la désoxydation de l'alliage durant l'élaboration. Les inventeurs ont constaté que, lorsque $Ti + Ta$ supérieur à 0,80% en poids, on observe la précipitation de phases indésirables, résultant en une perte de ductilité et en une sensibilité accrue à la fissuration à chaud.

Conformément à l'invention, $Mo + W \leq - 0,5 \times (Cr+Fe) + 30\%$ en poids. Les inventeurs ont constaté que le respect de cette relation permet d'obtenir une ductilité satisfaisante, se traduisant en particulier par une énergie de rupture $KCV \geq 100J/cm^2$, ainsi qu'une bonne soudabilité, se traduisant par une longueur totale de fissures inférieure ou égale à 20 mm.

L'énergie de rupture KCV est exprimée en J/cm^2 . Elle traduit la résilience de la pièce. Elle est par exemple déterminée par des essais de résilience réalisés conformément à la norme NF EN ISO 148-1 (Janvier 2011) à température ambiante.

La longueur de fissures est en particulier déterminée par des essais Varestraint suivant la norme européenne FD CEN ISO/TR 17641-3 (Novembre 2005) sous 3,2% de déformation plastique.

En outre, $Mo + W \geq - 0,5 \times (Cr+Fe) + 25\%$ en poids. Les inventeurs ont constaté que le respect de cette relation permet d'obtenir une résistance mécanique satisfaisante, et en particulier une limite d'élasticité $Rp_{0,2}$ supérieure ou égale à 500 MPa.

Aux teneurs mentionnées ci-dessus, le silicium et l'aluminium favorisent la désoxydation et le manganèse favorise la désulfuration pendant l'élaboration de l'alliage.

Les teneurs en calcium et en magnésium dans l'alliage sont limitées chacune à 0,005% en poids afin de ne pas dégrader la soudabilité. En particulier, les teneurs en calcium et en magnésium sont limitées afin de ne pas dégrader la qualité des cordons de soudure et notamment la formation de laitiers en surface produisant des instabilités d'arc et du bain liquide.

La teneur en niobium est inférieure ou égale à 0,01% en poids. La teneur en niobium dans l'alliage est limitée afin de ne pas dégrader la tenue à la fissuration à chaud. En particulier, le niobium ségrège fortement dans les espaces interdendritiques et favorise la précipitation des phases indésirables.

L'alliage contient en outre du carbone et de l'azote à des teneurs comprises entre 0,001 et 0,05% en poids. Le carbone est contrôlé afin de faciliter la désoxydation durant l'élaboration de l'alliage. En outre le carbone et l'azote assurent également l'affinement

des microstructures par la précipitation de carbonitrides de type Ti-(C, N) s'ils sont associés à l'ajout de titane.

Pour améliorer la tenue à la fissuration à chaud, les teneurs en S et P sont limitées autant que possible. Elles sont respectivement inférieures ou égales à 0,003% en poids et à 0,005% en poids dans l'alliage décrit ci-dessus.

Optionnellement, l'alliage comprend des terres rares à une teneur comprise entre 0,0010 et 0,015% en poids. Les terres rares piègent le soufre et l'oxygène résiduel. Elles améliorent la tenue à la fissuration à chaud lors du soudage d'un métal de base contenant des teneurs résiduelles en S+O plus élevées que celles du fil soudure. Cependant, à une teneur supérieure à 0,015%, elles favorisent la précipitation de phases eutectiques à bas point de fusion, notamment en présence de silicium, ce qui résulte en une perte de ductilité et en une sensibilité accrue à la fissuration à chaud.

Les terres rares sont de préférence choisies parmi l'yttrium, le cérium et le lanthane, ou parmi les mélanges de ces éléments.

Selon un exemple, les terres rares consistent en de l'yttrium. Dans ce cas, l'alliage comprend entre 0,0010 et 0,015% en poids d'yttrium.

Selon une variante, les terres rares consistent en un mélange de cérium et de lanthane. Dans ce cas, la teneur en Ce + La dans l'alliage est comprise entre 0,0010 et 0,015% en poids.

En présence de terres rares à une teneur comprise entre 0,0010 et 0,015% en poids, la teneur en silicium est limitée à 0,25% en poids, et de préférence à 0,20% en poids. Dans ce cas, la teneur en silicium est donc comprise entre 0,01 et 0,25% en poids, et de préférence entre 0,01 et 0,20% en poids. En effet, le silicium favorise la formation de phases contenant des terres rares, ce qui réduit la disponibilité des terres rares pour piéger le soufre et l'oxygène résiduel.

L'alliage selon l'invention présente une limite d'élasticité $R_{p0,2}$ comprise entre 500 MPa et 600 MPa et une résilience KCV supérieure ou égale à 100 J/cm², ce qui permet d'obtenir des soudures ductiles présentant un overmatching des propriétés mécaniques par rapport à un matériau de base réalisé en acier X56, X60, X65 ou X70.

Comme précisé ci-dessus, les nuances d'acier X56, X60, X65, X70 ou X80 sont définies dans le document « API Specification 5L » de l'American Petroleum Institute, 45^{ème} édition de décembre 2012.

Par ailleurs, l'alliage selon l'invention présente :

- une bonne tenue à la corrosion, et en particulier une tenue à la corrosion localisée supérieure ou égale à celle de l'alliage Inconel ® 625 comparatif ;
- une soudabilité supérieure ou égale à celle de l'alliage Inconel ® 625 comparatif.

Ainsi, les caractéristiques des soudures longitudinales et/ou orbitales peuvent être ignorées pour le dimensionnement d'assemblages soudés prévus pour présenter une limite d'élasticité $R_{p0,2}$ supérieure ou égale à 500 MPa et une résilience KCV supérieure ou égale à 100 J/cm², et comprenant notamment les aciers X56, X60, X65 et X70 en tant que matériaux de base.

Compte tenu de ses propriétés, l'alliage selon l'invention est donc particulièrement adapté pour être utilisé en tant que matériau d'apport pour la fabrication de tubes de pipeline destinés au transport de pétrole ou de gaz et adaptés pour la pose en haute mer à des profondeurs élevées, et en particulier jusqu'à environ 3000 m de profondeur, à des cadences élevées, en particulier de l'ordre de 2 km/jour.

Cet alliage peut donc être utilisé de manière avantageuse en tant que matériau d'apport pour réaliser les soudures longitudinales et/ou orbitales de tubes de pipelines réalisés en acier X56, X60, X65 ou X70, et destinés à être posés à des profondeurs importantes, allant par exemple jusqu'à 3000 m de profondeur et pour des cadences de pose élevées.

Compte tenu de ses bonnes propriétés de résistance à la corrosion, il peut également être utilisé pour réaliser le revêtement intérieur prévu pour améliorer la résistance à la corrosion de tels tubes.

L'alliage selon l'invention peut être élaboré par toute méthode adaptée connue de l'homme du métier.

A titre d'exemple, dans une première étape, on enfourne des matières de départ dans un four électrique à arc. Ces matières de départ sont choisies de sorte à obtenir un alliage contenant moins de 1,0% en poids de fer. Il s'agit en particulier de matières neuves. Ensuite, on soumet ces matières de départ à une fusion dans le four électrique à arc, puis on réalise un affinage en poche (VOD) par des méthodes habituelles, afin d'obtenir :

- une décarburation par soufflage d'oxygène et pompage sous vide (de l'ordre de quelques mbar) ;
- une désoxydation et désulfuration sous laitier à base de chaux ; et
- un réglage des éléments réducteurs tels que Ti et Al.

L'invention concerne également un fil d'apport réalisé dans un alliage présentant une composition telle que décrite ci-dessus.

Un tel fil d'apport est notamment adapté pour être utilisé dans le cadre de procédés de soudage TIG ou Plasma avec fil d'apport ou du procédé de soudage MIG/MAG.

Il est par exemple destiné à être utilisé :

- 5 - comme fil d'apport de soudage pour souder entre elles deux parties de pièces réalisées dans un matériau de base, le matériau de base étant en particulier un alliage fer-nickel de type Fe-9Ni, c'est-à-dire contenant du nickel à une teneur comprise entre 5% et 10% en poids, ou un alliage à base de nickel de type C-276, C-4 ou 22, ou un acier au carbone, et en particulier un acier X56, X60, X65 ou X70 ; et/ou
- 10 - comme fil de rechargement, pour réaliser un revêtement, en particulier sur des pièces ou parties de pièces réalisées dans un matériau de base, le matériau de base étant un acier au carbone, et en particulier un acier X56, X60, X65 ou X70.

L'alliage C-276 est défini au Tableau 1 de la norme AWS A5.14/A5.14M : 2018 (Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods), intitulé «
15 Chemical composition requirements for Nickel and Nickel-Alloy Electrodes and Rods » sous la référence dans la classification AWS ERNiCrMo-4 (numéro UNS N10276).

L'alliage C-4 est défini au Tableau 1 de la norme AWS A5.14/A5.14M :2018 (Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods), intitulé «
20 Chemical composition requirements for Nickel and Nickel-Alloy Electrodes and Rods » sous la référence dans la classification AWS ERNiCrMo-7 (numéro UNS N06455).

L'alliage 22 est défini au Tableau 1 de la norme AWS A5.14/A5.14M : 2018 (Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods), intitulé «
25 Chemical composition requirements for Nickel and Nickel-Alloy Electrodes and Rods » sous la référence dans la classification AWS ERNiCrMo-10 (numéro UNS N06022).

Les pièces ou parties de pièces sont notamment des tronçons de tube, des tubes et/ou des tôles ou parties de tôles réalisées dans le matériau de base.

Le fil d'apport est par exemple également destiné à être utilisé comme fil d'apport dans le cadre d'un procédé de fabrication additive métallique.

Le procédé de fabrication additive est par exemple un procédé de fabrication
30 additive utilisant un arc électrique, un faisceau laser et/ou un faisceau d'électrons en tant que source d'énergie pour réaliser la fusion du fil d'apport.

Le procédé de fabrication additive est en particulier un procédé de fabrication additive par dépôt sous énergie dirigée (« Directed Energy Deposition » en anglais). Au cours de ce procédé, le matériau d'apport est déposé, notamment par une buse, et
35 immédiatement fusionné par une énergie thermique concentrée, en particulier un faisceau laser, un faisceau d'électrons et/ou un arc électrique.

A titre d'exemple, le procédé de fabrication additive est un procédé arc-fil (« WAAM » ou « Wire arc additive manufacturing » en anglais), Laser-fil, faisceau d'électrons-fil (« Electron Beam Free Form Fabrication » ou « Electron beam additive manufacturing » en anglais) ou un procédé de fabrication additive hybride combinant les technologies arc-fil et Laser-poudre ou arc-fil et Laser-fil.

Dans le cas d'un procédé hybride arc-fil et Laser-poudre, la poudre utilisée présente la même composition que le fil.

Une telle poudre, dont la granulométrie après tamisage est comprise entre 20µm et 150µm, est par exemple obtenue à partir du fil d'apport selon l'invention, au moyen d'une technologie d'atomisation plasma. De préférence, le fil d'apport utilisé pour fabriquer la poudre présente un diamètre d'environ 3 mm.

La granulométrie des poudres est en particulier déterminée par la méthode de mesure suivante. Les lots de poudres sont séparés en plusieurs distributions de tailles de poudres au moyen de tamis en acier inoxydable à vibration ultrasonique. L'analyse de la distribution des tailles de poudres issues des tamisages est réalisée selon la norme ASTM B214-07. Le tamisage permet d'obtenir 5 classes de tailles : < 20µm - 20µm à 45µm - 45µm à 75µm - 75µm à 105µm - >105µm.

La technologie d'atomisation plasma pour fabriquer une poudre à partir d'un fil est connue en soi, et n'est donc pas décrite plus en détail.

Les pièces ou parties de pièces sont destinées notamment au marché de l'aéronautique, du transport ou de l'énergie. Elles constituent, par exemple, des carters, des cadres, des tubes à formes complexes, des vannes, des pattes de fixation, ou des parties de pièces présentant des fonctions particulières. A titre d'exemple, une telle partie de pièce constitue un élément échangeur de chaleur comprenant par exemple des canaux de circulation d'un fluide formé par fabrication additive sur une pièce de support, la pièce de support étant par exemple réalisée dans un matériau différent de celui de l'élément échangeur de chaleur.

L'invention concerne également un procédé de fabrication d'un fil d'apport réalisé dans l'alliage tel que décrit ci-dessus.

Ce procédé comprend, dans une première étape, la fourniture d'un demi-produit réalisé dans cet alliage. A cet effet, l'alliage est soit coulé en lingots, soit coulé directement sous forme de billettes, notamment au moyen d'une coulée continue, en particulier rotative. Les demi-produits obtenus à l'issue de cette étape sont donc avantageusement des lingots ou des billettes, et présentent par exemple un diamètre compris entre 130 et 230 mm, et plus particulièrement égal à environ 150 mm.

Ensuite, on transforme les demi-produits par transformation à chaud pour former un fil intermédiaire.

En particulier, au cours de cette étape de transformation à chaud, les demi-produits, c'est-à-dire notamment les lingots ou billettes, sont réchauffés, en particulier en
5 four à gaz, jusqu'à une température comprise entre 1180°C et 1220°C.

Ils sont ensuite soumis à un ébauchage à chaud de façon à réduire leur section, en leur conférant, par exemple, une section carrée, d'environ 100 mm à 200 mm de côté. On obtient ainsi un demi-produit de section réduite. La longueur de ce demi-produit de section réduite est notamment comprise entre 10 mètres et 20 mètres.

10 Les demi-produits de section réduite sont ensuite à nouveau transformés à chaud, à une température comprise entre 1050 et 1150°C, pour obtenir le fil intermédiaire. Le fil intermédiaire peut être en particulier un fil machine. Il présente par exemple un diamètre compris entre 5 mm et 21 mm, et en particulier environ égal à 5,5 mm. Avantagusement, au cours de cette étape, le fil intermédiaire est produit par laminage à chaud sur un train à
15 fil.

Optionnellement, le fil intermédiaire est ensuite soumis à une hypertrempe en piscine, après un traitement thermique dans un four à gaz, à une température comprise entre 1150°C et 1220°C pendant une durée comprise entre 60 minutes et 120 minutes.

Le fil intermédiaire est ensuite décapé, puis enroulé sous forme de bobine.

20 Optionnellement, le fil intermédiaire ainsi obtenu est tréfilé au moyen d'une installation de tréfilage de type connu pour obtenir le fil d'apport. Ce fil d'apport présente un diamètre inférieur à celui du fil de départ. Son diamètre est notamment compris entre 0,5 mm et 3,5 mm. Il est avantagusement compris entre 0,8 mm et 2,4 mm.

L'étape de tréfilage comprend, en fonction du diamètre final à atteindre, une ou
25 plusieurs passes de tréfilage, avec, de préférence, un recuit entre deux passes de tréfilage successives. Ce recuit est par exemple réalisé au défilé sous atmosphère réductrice à une température de l'ordre de 1150°C.

L'étape de tréfilage est, de préférence, suivie d'un nettoyage de la surface du fil tréfilé, puis d'un bobinage du fil.

30 Les passes de tréfilage sont réalisées à froid.

Toutes autres méthodes d'élaboration de l'alliage selon l'invention et de fabrication de produits finis réalisés en cet alliage connues de l'homme du métier peuvent être utilisées à cet effet.

35 L'invention concerne également un assemblage soudé 1 comprenant au moins deux parties de pièces 3, réalisées dans un métal de base, liées entre elles par un cordon

de soudure 5 obtenu à partir du fil d'apport tel que décrit précédemment. Un tel assemblage soudé est représenté schématiquement sur la figure 1.

Le taux de dilution du fil lors du soudage est par exemple compris entre 1% et 10%, et notamment environ égal à 5%.

5 Il doit être entendu que dans tout le texte par « parties de pièces » soudées entre elles, on comprend aussi bien le cas où ces parties soudées entre elles appartiennent à deux pièces initialement séparées que le cas où ces parties sont deux parties d'une même pièce repliée sur elle-même, par exemple les deux bords longitudinaux d'une tôle que l'on soude pour constituer un tube.

10 Le métal de base est notamment un acier au carbone, tel qu'un acier X56, X60, X65 ou X70 ou un alliage fer-nickel de type Fe-9%Ni, c'est-à-dire comprenant une teneur en nickel comprise entre 5 et 10% en poids, ou un alliage à base de nickel de type C-276, C-4 ou 22.

15 L'invention a également pour objet un procédé de soudage pour souder entre elles au moins deux parties de pièces 3 réalisées dans le métal de base défini précédemment de manière à réaliser un assemblage soudé 5 tel qu'illustré sur la figure 1.

Dans un premier temps, on fournit un fil d'apport tel qu'il a été décrit précédemment. On fournit également des parties de pièces 12 réalisées dans le métal de base que l'on souhaite souder entre elles au moyen du procédé de soudage.

20 On soude ensuite entre elles les parties de pièces 12 en utilisant le fil d'apport comme fil d'apport de soudage. Au cours de cette étape, on réalise de préférence une soudure bout à bout.

L'étape de soudage peut comprendre une ou plusieurs passes de soudure. Classiquement, elle comprend une première passe de soudure appelée passe de fond, 25 suivie d'une ou plusieurs passes de soudure additionnelles, appelées passes de remplissage. Toutes les passes de soudure sont réalisées en utilisant comme fil d'apport le fil d'apport selon l'invention, tel qu'il a été décrit précédemment. On limite ainsi la dilution de ce fil d'apport à la dilution par le métal de base fondu résultant du soudage.

30 Le taux de dilution du fil lors du soudage est par exemple compris entre 1% et 10%, et notamment environ égal à 5%.

Le soudage est par exemple réalisé par soudage à l'arc, par exemple par soudage plasma avec fil d'apport, par soudage MIG (« Metal Inert Gas » en anglais) ou par soudage MIG/MAG (« Metal active gas » en anglais).

35 Selon un mode de réalisation, représenté sur la figure 2, l'assemblage soudé 1 est un tronçon de tube 7 comprenant une tôle 9 repliée en forme de tube, dont les bords longitudinaux 12 sont liés entre eux par un cordon de soudure 15 obtenu à partir du fil

d'apport tel que défini précédemment. Dans ce cas, les parties de pièces 3 comprennent les bords longitudinaux 12 de la tôle 9.

La paroi du tronçon de tube 5 présente par exemple une épaisseur comprise entre 3 mm et 60 mm.

5 Le tronçon de tube 5 est notamment destiné au transport de produits corrosifs, en particulier de gaz ou de pétrole. Il est en particulier prévu pour former une partie d'un pipeline, notamment installé sur les fonds marins, et en particulier à une profondeur pouvant aller jusqu'à 3000 m.

10 L'invention a également pour objet un procédé de fabrication d'un tel tronçon de tube 5.

Le procédé comprend la fourniture d'une tôle 9 réalisée dans le métal de base. Une telle tôle 9 est représentée sur la figure 3. Elle s'étend selon une direction longitudinale L et présente des bords longitudinaux 12 sensiblement parallèles à la direction longitudinale L. Elle présente par exemple une épaisseur comprise entre 3 mm et 60 mm.

15 Le procédé comprend en outre une étape consistant à replier cette tôle 9 de manière à amener les deux bords longitudinaux 12 en regard, suivie d'une étape consistant à souder entre eux les deux bords longitudinaux 12 en regard en utilisant le procédé de soudage défini précédemment. Dans ce cas, les parties de pièces 3 décrites dans le cadre du procédé de soudage comprennent les bords longitudinaux 12 de la tôle 9.

La soudure réalisée au cours de cette étape est une soudure longitudinale. De préférence, il s'agit d'une soudure bout à bout.

25 A l'issue de ce procédé, on obtient un tronçon de tube 7, tel qu'illustré sur la figure 2, dans lequel la tôle 9 est repliée en forme de tube, et les bords longitudinaux 12 de la tôle 9 sont liés entre eux par un cordon de soudure 15 obtenu à partir du fil d'apport tel que défini précédemment.

30 Selon un autre mode de réalisation, représenté sur la figure 4, l'assemblage soudé est un tube 20 et les parties de pièces 3 sont des tronçons de tube 7 liés entre eux par un cordon de soudure 22 obtenu à partir du fil d'apport tel que défini précédemment. Dans ce mode de réalisation, le cordon de soudure 22 s'étend le long de la circonférence du tube 20 de sorte à relier entre eux les tronçons de tube 7.

35 La soudure est en particulier une soudure bout à bout, de préférence une soudure orbitale. Par soudure orbitale, on entend une soudure réalisée en faisant tourner l'outil de

soudage, à savoir en particulier les torches de soudage, par rapport aux tronçons de tube 7 à souder.

La paroi du tube 20 présente par exemple une épaisseur comprise entre 3 mm et 60 mm.

5 Selon un mode de réalisation, les tronçons de tube 7 sont des tronçons de tube tels que décrits précédemment.

 Selon une variante, les parties de pièces 3 sont des tronçons de tube ne comprenant pas de soudure longitudinale, et obtenus par exemple par extrusion de billettes.

10 Le tube 20 est notamment destiné au transport de produits corrosifs, en particulier de gaz ou de pétrole. Il est en particulier prévu pour former une partie d'un pipeline, notamment installé sur les fonds marins, et en particulier à une profondeur pouvant aller jusqu'à 3000 m.

 Ainsi, l'invention a également pour objet un procédé de fabrication d'un tube 20 tel que décrit ci-dessus.

 Au cours de ce procédé, on fournit au moins deux tronçons de tube 7. Chaque tronçon de tube 5 est sensiblement cylindrique d'axe M, et présente deux extrémités longitudinales 24, espacées entre elles selon la direction de l'axe M.

 On positionne alors les deux tronçons de tube 7 de manière à ce que leurs extrémités longitudinales 24 soient disposées en regard selon la direction de l'axe M de ces tronçons de tube, puis on soude entre elles les extrémités longitudinales 24 en regard des deux tronçons de tube 7 au moyen du procédé de soudage tel que défini précédemment. Dans ce cas, les parties de pièces 3 définies dans le cadre du procédé de soudage comprennent les extrémités longitudinales 24 des tronçons de tube 7.

25 Avantageusement, on réalise lors de cette étape une soudure bout à bout entre les extrémités longitudinales 24 en regard des tronçons de tube 7. La soudure est de préférence une soudure orbitale.

 De préférence, l'étape de soudage comprend, préalablement à la solidarisation entre eux des tronçons de tube 7, une étape d'usinage de chanfreins aux extrémités 24 des tronçons de tube 7 à souder entre elles.

 L'étape de soudage est réalisée un nombre de fois égal au nombre de tronçons de tube 7 à souder pour former le tube 20 diminué de un.

 Selon un mode de réalisation, les tronçons de tube 7 sont des tronçons de tube 7 tels que décrits précédemment.

35 En variante, ce procédé peut être réalisé avec tout type de tronçon de tube dont les extrémités longitudinales sont réalisées dans le métal de base, quel que soit le

20

procédé d'obtention du tronçon de tube. En particulier, ce procédé est mis en œuvre sur des tronçons de tube ne comprenant pas de soudure longitudinale, et obtenus en particulier par extrusion de billettes.

5 Ce procédé est en particulier mis en œuvre sur une barge, cette barge étant par exemple localisée sur le lieu de mise en place du tube 20.

A l'issue de cette ou de ces étapes de soudage, on obtient le tube 20. Ce tube 20 comprend au moins deux tronçons de tube 7 successifs assemblés entre eux par un cordon de soudure 22 obtenu à partir du fil d'apport tel que défini précédemment.

10 L'invention concerne également une pièce revêtue 26 telle que représentée sur la figure 5 comprenant un substrat 28 réalisé dans un matériau de base revêtu d'un revêtement 30 réalisé dans un alliage tel que décrit ci-dessus. Le matériau de base est un matériau métallique.

15 Le matériau de base est notamment un acier au carbone. De préférence, le matériau de base est un acier X56, X60 ou X65 ou X70.

Le revêtement 30 est en particulier appliqué sur le substrat 28 par un procédé de rechargement par soudage au moyen d'un fil d'apport présentant la composition décrite ci-dessus.

20 Le revêtement 30 présente en particulier une épaisseur comprise entre 2 mm et 20 mm.

Un tel revêtement 30 améliore la tenue à la corrosion de la pièce revêtue 26, en particulier en présence de produits corrosifs, tels que des produits pétroliers.

25 La pièce revêtue 26 est en particulier un tronçon de tube 7 revêtu, le revêtement 30 étant formé sur la paroi intérieure de ce tronçon de tube 7, et recouvrant en particulier la paroi intérieure du tronçon de tube 7 sur toute sa surface, y compris le cordon de soudure 12 lorsqu'il existe.

30 L'invention a également pour objet un procédé de fabrication d'une pièce revêtue 26 telle que décrite ci-dessus, comprenant la fourniture d'un substrat 28 réalisé dans le matériau de base, suivie de l'application d'un revêtement 30 sur une surface de ce substrat par un procédé de rechargement par soudage au moyen d'un fil d'apport présentant la composition décrite ci-dessus.

35 Dans le cas où la pièce revêtue 26 est un tronçon de tube 7 revêtu, le procédé de fabrication comprend en particulier une étape de fabrication d'un tronçon de tube 7 par mise en œuvre du procédé décrit ci-dessus, suivie d'une étape d'application d'un revêtement 30 sur une surface intérieure de ce tronçon de tube 7 par un procédé de

rechargement par soudage au moyen d'un fil d'apport présentant la composition décrite ci-dessus.

Le revêtement 30 améliore la tenue à la corrosion du tronçon de tube 7, par exemple pendant le transport de produits pétroliers plus ou moins corrosifs.

5 Selon un mode de réalisation particulier, le tube 20 décrit ci-dessus comprend deux tronçons de tube 7 revêtus d'un revêtement 30 tel que décrit ci-dessus, liés entre eux par un cordon de soudure 22.

10 L'invention concerne également un procédé de fabrication d'une pièce 40 telle que représentée schématiquement sur la figure 6, réalisée dans un alliage tel que décrit ci-dessus, comprenant :

- la fourniture d'un fil d'apport réalisé dans cet alliage ; et
- la fabrication de la pièce 40 par un procédé de fabrication additive métallique utilisant, en tant que matériau d'apport, un fil d'apport réalisé dans l'alliage tel que décrit ci-dessus et/ou une poudre réalisée dans l'alliage tel que décrit ci-dessus.

15 Le procédé de fabrication additive est par exemple un procédé de fabrication additive utilisant un arc électrique, un faisceau laser et/ou un faisceau d'électrons en tant que source d'énergie pour réaliser la fusion du matériau d'apport.

20 Le procédé de fabrication additive est en particulier un procédé de fabrication additive par dépôt sous énergie dirigée (« Directed Energy Deposition » en anglais). Au cours de ce procédé, le matériau d'apport est déposé, notamment par une buse, et immédiatement fusionné par une énergie thermique concentrée, en particulier un faisceau laser, un faisceau d'électrons et/ou un arc électrique.

25 A titre d'exemple, le procédé de fabrication additive est un procédé arc-fil, Laser-fil, faisceau d'électrons-fil (« Electron Beam Free Form Fabrication » ou « Electron beam additive manufacturing » en anglais) ou un procédé de fabrication additive hybride combinant les technologies arc-fil et Laser-poudre ou arc-fil et Laser-fil.

Dans le cas où un procédé de fabrication additive hybride combinant les technologies arc-fil et Laser-poudre ou arc-fil et Laser-fil est utilisé, la poudre et le fil d'apport sont réalisés dans l'alliage tel que décrit ci-dessus.

30 Les procédés de fabrication additive mentionnés ci-dessus sont connus en soi, et ne sont donc pas décrits en détail.

35 Dans le cas où le matériau d'apport comprend une poudre, en particulier dans le cadre du procédé hybride arc-fil et Laser-poudre, le procédé comprend également, préalablement à la fabrication de la pièce 40, une étape de fourniture d'une poudre réalisée dans l'alliage tel que décrit ci-dessus. Cette poudre, dont la granulométrie après tamisage est comprise entre 20µm et 150µm, est par exemple fabriquée par atomisation

plasma à partir d'un fil réalisé dans un alliage tel que décrit ci-dessus, le fil présentant en particulier un diamètre d'environ 3 mm.

Le procédé d'atomisation plasma est connu en soi, et n'est donc pas décrit en détail.

5 L'invention concerne également une pièce 40 ou une partie de pièce réalisée dans un alliage tel que décrit ci-dessus obtenue par fabrication additive métallique.

Ce procédé de fabrication additive métallique utilise en particulier, en tant que matériau d'apport, un fil d'apport réalisé dans l'alliage tel que décrit ci-dessus et/ou une poudre réalisée dans l'alliage tel que décrit ci-dessus.

10 Le procédé de fabrication additive est par exemple un procédé de fabrication additive utilisant un arc électrique, un faisceau laser et/ou un faisceau d'électrons en tant que source d'énergie pour réaliser la fusion du matériau d'apport.

Le procédé de fabrication additive est en particulier un procédé de fabrication additive par dépôt sous énergie dirigée (« Directed Energy Deposition » en anglais). Au
15 cours de ce procédé, le matériau d'apport est déposé, notamment par une buse, et immédiatement fusionné par une énergie thermique concentrée, en particulier un faisceau laser, un faisceau d'électrons et/ou un arc électrique.

A titre d'exemple, le procédé de fabrication additive est un procédé arc-fil, Laser-fil, faisceau d'électrons-fil (« Electron Beam Free Form Fabrication » ou « Electron beam
20 additive manufacturing » en anglais) ou un procédé de fabrication additive hybride combinant les technologies arc-fil et Laser-poudre ou arc-fil et Laser-fil.

Dans le cas où un procédé de fabrication additive hybride combinant les technologies arc-fil et Laser-poudre ou arc-fil et Laser-fil est utilisé, la poudre et le fil d'apport sont réalisés dans l'alliage tel que décrit ci-dessus.

25 Une pièce ou partie de pièce obtenue par un procédé de fabrication additive métallique, telle que la pièce 40, est brute de solidification. Elle présente donc une microstructure de solidification typique de l'alliage de nickel considéré, une telle microstructure comprenant typiquement des dendrites colonnaires qui croissent par épitaxie les unes sur les autres et dont l'orientation dépend de la largeur et de la hauteur
30 du mur métallique fabriqué. Par ailleurs, une pièce obtenue par un procédé de fabrication additive présente, du fait de son procédé de fabrication additif, une succession de strates de solidification superposées. Chaque strate, obtenue par solidification de gouttes de métal en fusion déposées, refond la peau de la strate précédente afin de générer une continuité métallurgique, et par suite réchauffe le reste des strates inférieures. La
35 température de réchauffage est d'autant plus faible que la strate en question est éloignée de la zone en cours de fusion et solidification. Cette microstructure particulière est

observable par observation métallographique sur des coupes métallographiques des pièces.

Une pièce 40 ou partie de pièce obtenue par un procédé de fabrication additive métallique peut ainsi être distinguée de pièces obtenues par d'autres procédés, et notamment d'une pièce obtenue par métallurgie conventionnelle qui produit une structure recristallisée à grains homogènes.

Les pièces 40 ou parties de pièces sont destinées notamment au marché de l'aéronautique, du transport ou de l'énergie. Elles constituent, par exemple, des carters, des cadres, des tubes à formes complexes, des vannes, des pattes de fixation, ou des parties de pièces présentant des fonctions particulières. A titre d'exemple, une telle partie de pièce constitue un élément échangeur de chaleur comprenant par exemple des canaux de circulation d'un fluide formé par fabrication additive sur une pièce de support, la pièce de support étant par exemple réalisée dans un matériau différent de celui de l'élément échangeur de chaleur.

Essais

Dans une première série d'essais, les inventeurs ont réalisé des coulées de laboratoire pour obtenir des lingots d'alliages présentant des compositions telles que définies ci-dessus, ainsi que d'alliages comparatifs, présentant des compositions différentes de la composition décrite ci-dessus.

Ces alliages ont été élaborés sous vide, et les lingots ainsi obtenus ont été transformés à chaud par laminage pour obtenir des largets de dimensions 10x50x300 mm.

Les compositions d'alliage de chacun des largets testés sont exposées dans le Tableau 1 ci-après.

Les inventeurs ont ensuite réalisé les essais suivants sur les largets ainsi obtenus.

Sur certains de ces largets, ils ont réalisé des lignes de fusion jointives, recto et verso, au moyen d'une torche TIG afin de développer des structures de solidification dans l'épaisseur du larget comparables à celles obtenues par soudage TIG ou MIG, en condition hors dilution, et prélevé, dans les zones fondues, des éprouvettes de traction et de résilience.

Ils ont ensuite réalisé :

- des essais mécaniques par traction plane à température ambiante (20°C) pour mesurer la limite élastique à 0,2% d'allongement $R_{p0,2}$ à 20°C sur les éprouvettes de traction décrites ci-dessus, conformément à la norme NF EN ISO 6892-1 (Décembre

2019). Les résultats de ces essais sont résumés dans la colonne intitulée « Rp_{0,2} » du Tableau 2 ci-après.

- des essais de résilience à température ambiante (20°C) sur les éprouvettes de résilience décrites ci-dessus avec mesure de l'énergie de rupture par choc (notée KCV), conformément à la norme NF EN ISO 148-1 (Janvier 2011). L'énergie de rupture est exprimée en J/cm². Elle traduit la résilience de la pièce. Les résultats de ces tests sont résumés dans la colonne intitulée « KCV » du Tableau 2 ci-après.

Ils ont également mesuré, dans les zones fondues des largets, la fraction surfacique de phases précipitées durant la solidification du métal fondu sous le passage de la torche TIG. La fraction surfacique de phases précipitées est déterminée par analyse d'image sur des images des largets obtenues au microscope électronique à balayage (MEB). En effet, les phases précipitées correspondent aux zones blanches sur ces images, et sont détectées par un logiciel de traitement d'image, qui détecte les zones blanches au moyen d'une analyse par niveaux de gris et détermine ensuite la fraction surfacique occupée par ces zones blanches. Les résultats de ces mesures sont résumés dans la colonne intitulée « Fs » du Tableau 2 ci-après.

Les inventeurs ont également réalisé, sur les largets non soumis à des lignes de fusion jointives, des essais Varesstraint suivant la norme européenne FD CEN ISO/TR 17641-3 (Novembre 2005) sous 3,2% de déformation plastique afin d'évaluer leur tenue à la fissuration à chaud avec mesure de la longueur totale de fissures développées durant l'essai. Les résultats de ces tests sont résumés dans la colonne intitulée « L_{Totale} Fissures » du Tableau 2 ci-après.

Enfin, les inventeurs ont réalisé des essais potentiométriques pour tester la tenue à la corrosion localisée des alliages. A cet effet, ils ont mesuré le potentiel de piqûre V en milieu LiCl à 11,9 mol.l⁻¹ à un pH de 5,4 et à une température de 30°C et comparé ce potentiel de piqûre avec celui de l'Inconel ® 625 (V_{Inconel 625/SCE} < 120 mV), où SCE est un potentiel de référence par rapport à l'électrode au calomel saturée.

Dans les Tableaux 1 et 2 ci-dessous, les essais qui ne sont pas selon l'invention sont soulignés.

Essai	Cr (%pds)	Mo (%pds)	W (%pds)	Ti+Ta (%pds)	Fe (%pds)	Si (%pds)	Mn (%pds)	C (%pds)	S (%pds)
<u>1</u>	16,8	11,6	3,5	0,78	0,30	0,41	0,024	0,012	0,0005
<u>2</u>	16,7	12,5	5,9	0,76	0,30	0,39	0,025	0,012	0,0006
<u>3</u>	17,0	13,7	3,5	0,72	0,30	0,41	0,025	0,011	0,0007
<u>4</u>	17,3	17,0	3,5	0,76	0,30	0,40	0,024	0,011	0,0007

25

<u>5</u>	17,0	<u>18,6</u>	3,6	0,78	0,30	0,40	0,025	0,013	0,0006
<u>6</u>	16,8	<u>16,8</u>	3,5	0,78	<u>3,53</u>	0,40	0,025	0,012	0,0006
<u>7</u>	17,6	10,6	3,9	0,55	0,33	0,37	0,028	0,011	0,0007
8	18,2	12,4	3,9	0,57	0,32	0,37	0,028	0,010	0,0007
9	18,2	12,3	6,0	0,54	0,34	0,40	0,027	0,010	0,0005
10	17,8	16,3	3,0	0,54	0,33	0,38	0,029	0,011	0,0005
11	17,8	17,3	3,0	0,55	0,32	0,39	0,028	0,010	0,0006
<u>12</u>	17,9	<u>19,3</u>	3,0	0,57	0,33	0,39	0,027	0,013	0,0007
<u>13</u>	17,8	17,8	3,0	0,56	<u>3,00</u>	0,37	0,029	0,010	0,0007
14	19,7	12,3	3,0	0,30	0,35	0,43	0,031	0,008	0,0005
15	19,6	13,1	5,1	0,29	0,35	0,46	0,031	0,009	0,0006
16	19,7	16,3	3,0	0,29	0,34	0,44	0,029	0,010	0,0005
<u>17</u>	20,3	16,8	3,0	0,30	<u>1,47</u>	0,43	0,030	0,008	0,0005
<u>18</u>	22,4	<u>8,6</u>	3,9	0,49	0,25	0,52	0,022	0,014	0,0005
19	22,3	12,4	3,0	0,48	0,25	0,48	0,021	0,014	0,0006
20	22,1	12,5	4,1	0,48	0,25	0,52	0,022	0,015	0,0005
21	22,4	15,2	3,0	0,50	0,25	0,51	0,023	0,016	0,0006
<u>22</u>	22,3	17,4	3,0	0,52	0,25	0,49	0,021	0,015	0,0007
<u>23</u>	22,1	15,0	3,0	0,49	<u>2,95</u>	0,48	0,023	0,015	0,0007
<u>24</u>	24,2	<u>8,1</u>	2,5	0,65	0,40	0,48	0,023	0,010	0,0006
25	24,0	11,0	2,5	0,67	0,41	0,49	0,023	0,010	0,0005
26	23,8	14,5	2,5	0,63	0,40	0,48	0,023	0,011	0,0005
<u>27</u>	23,7	16,3	2,5	0,67	0,39	0,47	0,024	0,011	0,0006
<u>28</u>	23,9	14,6	2,5	0,65	<u>2,53</u>	0,51	0,023	0,010	0,0006

Tableau 1 : Composition des alliages de la première série d'essais

Dans les alliages du Tableau 1, la teneur en Al est comprise entre 0,01 et 0,35%, la teneur en N est comprise entre 0,001 et 0,05%, les teneurs en Mg et Ca sont inférieures ou égales à 0,005% et la teneur en P est inférieure ou égale à 0,005%. Par ailleurs, l'alliage ne contient pas de niobium.

Pour tous les alliages du Tableau 1, le reste est du nickel, ainsi que des impuretés résultant de l'élaboration.

Par ailleurs, toutes les compositions sont indiquées en pourcentage en poids.

Essai	Mo+W $\geq$ -0,5(Cr+Fe)+25?	Mo+W $\leq$ -0,5(Cr+Fe)+30?	Rp0,2% (Mpa)	KCV (J/cm ²)	L _{Totale} Fissures (mm)	Fs (%)
A1	<u>Non</u>	Oui	497	217	15	1,1
A2	Oui	Oui	502	142	18	1,5
A3	Oui	Oui	550	179	17	1,4
A4	Oui	Oui	553	104	19	1,5
<u>A5</u>	Oui	<u>Non</u>	611	<u>64</u>	<u>22</u>	<u>1,9</u>
<u>A6</u>	Oui	<u>Non</u>	588	<u>83</u>	<u>22</u>	<u>1,7</u>

A7	Non	Oui	493	226	13	0,9
A8	Oui	Oui	513	182	15	1,3
A9	Oui	Oui	536	130	17	1,4
A10	Oui	Oui	545	120	17	1,5
A11	Oui	Oui	570	100	19	1,5
A12	Oui	Non	602	55	22	1,8
A13	Oui	Non	562	75	22	1,7
A14	Oui	Oui	503	172	14	1,1
A15	Oui	Oui	520	125	16	1,3
A16	Oui	Oui	569	100	18	1,5
A17	Oui	Non	571	93	21	1,6
A18	Non	Oui	474	219	14	1,0
A19	Oui	Oui	538	159	16	1,4
A20	Oui	Oui	527	148	17	1,5
A21	Oui	Oui	599	116	18	1,5
A22	Oui	Non	623	62	22	1,8
A23	Oui	Non	587	89	22	1,6
A24	Non	Oui	483	257	14	1,1
A25	Oui	Oui	516	190	17	1,3
A26	Oui	Oui	590	115	19	1,5
A27	Oui	Non	609	78	21	1,9
A28	Oui	Non	601	95	21	1,8

Tableau 2 : Résultats des essais effectués sur les larges réalisés dans les alliages du

Tableau 1

Par ailleurs, au cours des essais potentiométriques, les alliages A1 à A28 du
 5 Tableau 1 ont développé un potentiel de piqure V par rapport au potentiel de référence par rapport à l'électrode au calomel saturée supérieur ou égal à 150 mV. Ces alliages présentent donc une meilleure tenue à la corrosion localisée que l'alliage Inconel ® 625.

Comme cela a été indiqué ci-dessus, on recherche de préférence les propriétés
 suivantes, en combinaison :

- 10
- une limite d'élasticité $R_{p0,2}$ supérieure ou égale à 500 MPa ;
 - une résilience KCV supérieure ou égale à 100 J/cm² ;
 - une longueur totale de fissures inférieure ou égale à 20 mm ;
 - une fraction surfacique de phases précipitées F_s inférieure ou égale à 1,5% ;
 - une tenue à la corrosion localisée supérieure ou égale à celle de l'alliage Inconel ® 625.

15 Parmi ces paramètres, la longueur totale de fissures est représentative de la soudabilité de l'alliage. La longueur totale de fissures pour l'alliage Inconel ® 625 étant égale à 20 mm, une longueur totale de fissures inférieure ou égale à 20 mm correspond à

une soudabilité supérieure ou égale à la soudabilité de l'alliage Inconel ® 625, et est donc satisfaisante pour les applications considérées.

Ces propriétés sont obtenues dans le cas des exemples A2 à A4, A8 à A11, A14 à A16, A19 à A21, A25 et A26, qui correspondent à des alliages présentant la composition telle que décrite ci-dessus.

Au contraire, la limite d'élasticité $R_{p0,2}$ est inférieure ou égale à 500 MPa dans le cas des exemples comparatifs A1, A7, A18, A24, tandis que la résilience KCV est insuffisante et/ou la longueur de fissures est trop élevée dans le cas des exemples comparatifs A5, A6, A12, A13, A17, A22, A23, A27, A28. On note que, dans le cadre de ces contre-exemples, la relation $-0,5 \times (Cr+Fe) + 25\% \leq Mo+W \leq -0,5 \times (Cr+Fe) + 30\%$ n'est pas respectée.

Par ailleurs, comme le montrent les exemples comparatifs A6, A13, A17, A23 et A28, les alliages comprenant du fer à une teneur supérieure à 1,0% présentent une ductilité dégradée, ainsi qu'une sensibilité accrue à la fissuration à chaud.

D'une manière générale, les inventeurs ont constaté qu'une fraction surfacique de phases précipitées Fs supérieure à 1,5% se traduit par une résilience KCV inférieure à 100 J/cm² et/ou une longueur de fissures supérieure à 20 mm.

Les inventeurs ont également réalisé une deuxième série d'essais, dans les mêmes conditions qu'évoquées en regard de la première série d'essais, mais avec des largets réalisés dans des alliages présentant les compositions résumées au Tableau 3. Par ailleurs, les résultats des essais réalisés sur ces largets sont indiqués au Tableau 4.

Essai	Cr (%pds)	Mo (%pds)	W (%pds)	Ti+Ta (%pds)	Fe (%pds)	Si (%pds)	Mn (%pds)	C (%pds)	S (%pds)	Y (%pds)	Ce+La (%pds)
B1	16,8	11,7	3,5	0,73	0,30	0,17	0,025	0,012	0,0004	0,0015	-
B2	17,2	12,5	6,0	0,76	0,30	0,16	0,026	0,013	0,0005	0,0013	-
B3	16,9	13,5	3,5	0,77	0,29	0,17	0,025	0,012	0,0004	0,0013	-
B4	16,9	17,0	3,5	0,75	0,30	0,16	0,024	0,012	0,0004	0,0015	-
B5	17,0	19,0	3,6	0,75	0,29	0,17	0,024	0,012	0,0004	0,0016	-
B6	16,8	17,1	3,6	0,75	3,47	0,15	0,026	0,012	0,0004	0,0015	-
B7	17,8	10,4	4,1	0,56	0,33	0,14	0,029	0,010	0,0005	-	0,0020
B8	18,0	12,5	4,1	0,57	0,33	0,12	0,027	0,010	0,0005	-	0,0020
B9	17,7	12,6	6,0	0,55	0,34	0,13	0,027	0,010	0,0004	-	0,0023
B10	17,8	16,3	3,0	0,53	0,33	0,11	0,028	0,010	0,0004	-	0,0023
B11	17,8	17,7	3,0	0,58	0,33	0,14	0,028	0,010	0,0006	-	0,0025
B12	18,3	19,5	3,0	0,55	0,33	0,13	0,029	0,010	0,0005	-	0,0025
B13	17,9	17,7	3,0	0,57	2,97	0,12	0,027	0,010	0,0005	-	0,0025

B14	19,9	12,6	3,0	0,30	0,35	0,18	0,030	0,008	0,0010	0,0015	0,0014
B15	20,3	13,1	5,0	0,29	0,36	0,22	0,031	0,008	0,0011	0,0015	0,0015
B16	19,8	16,2	3,0	0,31	0,35	0,20	0,029	0,008	0,0010	0,0013	0,0014
B17	19,7	16,4	3,5	0,31	1,48	0,20	0,030	0,008	0,0010	0,0012	0,0015
B18	22,1	8,6	4,0	0,51	0,25	0,13	0,023	0,015	0,0018	-	0,0070
B19	21,8	12,7	3,0	0,52	0,25	0,16	0,022	0,015	0,0017	-	0,0070
B20	21,9	12,5	4,0	0,49	0,25	0,15	0,022	0,014	0,0017	-	0,0075
B21	22,1	15,1	3,0	0,52	0,25	0,14	0,023	0,015	0,0019	-	0,0073
B22	22,1	17,3	2,9	0,48	0,25	0,14	0,023	0,015	0,0017	-	0,0074
B23	22,3	14,8	3,0	0,51	3,01	0,15	0,022	0,015	0,0017	-	0,0074
B24	24,1	7,8	2,5	0,66	0,39	0,15	0,024	0,010	0,0014	0,0053	-
B25	23,9	10,9	2,5	0,65	0,40	0,15	0,024	0,010	0,0015	0,0053	-
B26	24,0	14,6	2,5	0,62	0,40	0,14	0,025	0,011	0,0015	0,0055	-
B27	24,2	16,3	2,9	0,68	0,40	0,14	0,024	0,011	0,0014	0,0050	-
B28	23,6	14,5	3,0	0,62	2,53	0,14	0,025	0,010	0,0015	0,0050	-

Tableau 3 : Composition des alliages de la deuxième série d'essais

Dans les alliages du Tableau 3, la teneur en Al est comprise entre 0,01 et 0,35%, la teneur en N est comprise entre 0,001 et 0,05%, les teneurs en Mg et Ca sont inférieures ou égales à 0,005% et la teneur en P est inférieure ou égale à 0,005%. Par ailleurs, l'alliage ne contient pas de niobium.

Pour tous les alliages du Tableau 3, le reste est du nickel, ainsi que des impuretés résultant de l'élaboration.

Par ailleurs, toutes les compositions sont indiquées en pourcentage en poids.

Essai	Mo+W $\geq$ -0,5(Cr+Fe)+25?	Mo+W $\leq$ -0,5(Cr+Fe)+30?	Rp0,2% (Mpa)	KCV (J/cm ²)	L _{Totale} Fissures (mm)	Fs (%)
B1	Non	Oui	495	210	12	1,0
B2	Oui	Oui	517	144	15	1,4
B3	Oui	Oui	545	179	15	1,4
B4	Oui	Oui	607	101	16	1,5
B5	Oui	Non	610	65	21	1,7
B6	Oui	Non	595	75	21	1,8
B7	Non	Oui	491	216	13	0,9
B8	Oui	Oui	519	170	12	1,3
B9	Oui	Oui	500	139	16	1,3
B10	Oui	Oui	555	112	16	1,5
B11	Oui	Oui	590	105	18	1,5
B12	Oui	Non	624	58	21	1,6
B13	Oui	Non	590	75	21	1,8

B14	Oui	Oui	531	177	12	1,2
B15	Oui	Oui	518	126	13	1,2
B16	Oui	Oui	587	100	13	1,5
B17	Oui	Non	553	88	21	1,9
B18	Non	Oui	478	232	13	1,1
B19	Oui	Oui	536	164	15	1,4
B20	Oui	Oui	515	148	16	1,4
B21	Oui	Oui	563	110	15	1,5
B22	Oui	Non	591	67	21	1,7
B23	Oui	Non	563	96	21	1,8
B24	Non	Oui	490	251	13	1,0
B25	Oui	Oui	543	190	14	1,3
B26	Oui	Oui	565	113	16	1,3
B27	Oui	Non	635	74	21	1,6
B28	Oui	Non	583	95	21	1,9

Tableau 4 : Résultats des essais effectués sur les largets réalisés dans les alliages du

Tableau 3

Par ailleurs, au cours des essais potentiométriques, les alliages B1 à B28 du
 5 Tableau 3 ont développé un potentiel de piqure V par rapport au potentiel de référence
 par rapport à l'électrode au calomel saturée supérieur ou égal à 150 mV. Ces alliages
 présentent donc une meilleure tenue à la corrosion localisée que l'alliage Inconel ® 625.

On constate donc que les propriétés recherchées en termes de limite d'élasticité,
 résilience, soudabilité, fraction surfacique de phases précipitées et tenue à la corrosion
 10 localisée sont obtenues dans le cas des exemples B2 à B4, B8 à B11, B14 à B16, B19 à
 B21, B25 et B26, qui correspondent à des alliages présentant la composition telle que
 décrite ci-dessus.

Les autres résultats confirment les conclusions tirées du Tableau 2.

En particulier, la limite d'élasticité $R_{p0,2}$ est inférieure ou égale à 500 MPa dans le
 15 cas des exemples comparatifs B1, B7, B18, B24, tandis que la résilience KCV est
 insuffisante dans le cas des exemples comparatifs B5, B6, B12, B13, B17, B22, B23, B27,
 B28. On note que, dans le cadre de ces contre-exemples, la relation $-0,5 \times (Cr+Fe) + 25\% \leq Mo+W \leq -0,5 \times (Cr+Fe) + 30\%$ n'est pas respectée.

Par ailleurs, la soudabilité et la résilience sont dégradées dans le cas où l'alliage
 20 contient du fer à une teneur supérieure à 1,0%.

En outre, en comparant les résultats des Tableaux 2 et 4, on constate que l'ajout
 de terres rares améliore donc la tenue à la fissuration à chaud de l'alliage.

L'ajout de terres rares est particulièrement avantageux lorsque le métal de base à
 souder présente des teneurs en soufre et/ou en oxygène plus élevées que le fil d'apport.

En effet, les inventeurs ont constaté que les terres rares contribuent à la désoxydation et/ou à la désulfuration du bain liquide durant l'opération de soudage, et ainsi à l'amélioration de la tenue à la fissuration à chaud.

5 L'alliage selon l'invention présente une limite d'élasticité $R_{p0,2}$ supérieure ou égale à 500 MPa et une résilience KCV supérieure ou égale à 100 J/cm², ce qui permet d'obtenir un overmatching des propriétés mécaniques par rapport à un métal de base présentant une limite d'élasticité $R_{p0,2}$ inférieure à 500 MPa tels que les alliages X56, X
10 60, X65 et X70. Ainsi, les caractéristiques des soudures peuvent être ignorées pour le dimensionnement des assemblages soudés réalisés dans de tels alliages en tant que matériaux de base.

Par ailleurs, il présente :

- une tenue à la corrosion supérieure ou égale à celle de l'alliage Inconel ® 625 comparatif ;
- 15 - une soudabilité supérieure ou égale à celle de l'alliage Inconel ® 625 comparatif.

Compte tenu de ses propriétés, l'alliage selon l'invention est donc particulièrement adapté pour être utilisé en tant que matériau d'apport pour la fabrication de tubes de pipeline destinés au transport de pétrole ou de gaz et adaptés pour la pose en haute mer à des profondeurs élevées, et en particulier jusqu'à environ 3000 m de profondeur, à des
20 cadences élevées, en particulier de l'ordre de 2 km/jour.

Compte tenu de ses bonnes propriétés, l'alliage selon l'invention peut également être utilisé de manière avantageuse dans le cadre de pièces telles que décrites ci-dessus.

REVENDICATIONS

1. Alliage présentant la composition suivante, en poids :
- 5 $16,5\% \leq \text{Cr} \leq 25,0\%$
 $11,0\% \leq \text{Mo} \leq 18,0\%$
 $2,0\% \leq \text{W} \leq 7,0\%$
 $\text{Fe} \leq 1,0\%$
 $\text{Mo} + \text{W} \leq -0,5 \times (\text{Cr} + \text{Fe}) + 30\%$
 $\text{Mo} + \text{W} \geq -0,5 \times (\text{Cr} + \text{Fe}) + 25\%$
- 10 $\text{Ti} + \text{Ta} \leq 0,80\%$
 $0,01\% \leq \text{Si} \leq 0,75\%$
 $0,01\% \leq \text{Al} \leq 0,35\%$
 $0,01\% \leq \text{Mn} \leq 0,35\%$
 $\text{Ca} \leq 0,005\%$
- 15 $\text{Mg} \leq 0,005\%$
 $\text{Nb} \leq 0,01\%$
 $0,001\% \leq \text{C} \leq 0,05\%$
 $0,001\% \leq \text{N} \leq 0,05\%$
 $\text{S} \leq 0,003\%$
- 20 $\text{P} \leq 0,005\%$
 optionnellement, $0,0010\% \leq \text{terres rares} \leq 0,015\%$, la teneur en
 silicium étant inférieure ou égale à 0,25% en présence de terres rares
 à une teneur comprise entre 0,0010% et 0,015%,
 le reste étant du nickel et des impuretés inévitables résultant de
- 25 l'élaboration, la teneur en nickel étant supérieure ou égale à 54%.
2. Alliage selon la revendication 1, dans lequel la teneur en fer est inférieure
 ou égale à 0,5%.
- 30 3. Alliage selon la revendication 1 ou 2, dans lequel les terres rares sont
 choisies parmi l'yttrium, le cérium et le lanthane et les mélanges de ces
 éléments.
- 35 4. Alliage selon la revendication 3, dans lequel les terres rares sont choisies
 parmi l'yttrium ou un mélange de cérium et de lanthane.

5. Pièce revêtue (26) comprenant un substrat (28) réalisé dans un matériau de base et un revêtement (30), réalisé dans un alliage selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, le matériau de base étant un matériau métallique, de préférence un acier au carbone, et par exemple un acier X56, X60, X65, X70.
6. Pièce revêtue selon la revendication 5, la pièce revêtue (26) étant un tronçon de tube (7).
7. Fil d'apport réalisé dans un alliage présentant une composition selon l'une quelconque des revendications 1 à 4.
8. Procédé de fabrication d'un fil d'apport selon la revendication 7, le procédé comprenant les étapes suivantes :
- fourniture d'un demi-produit réalisé dans un alliage selon l'une quelconque des revendications 1 à 4 ;
 - transformation à chaud de ce demi-produit pour former un fil intermédiaire ; et
 - transformation du fil intermédiaire en fil d'apport, de diamètre inférieur à celui du fil intermédiaire, ladite transformation comprenant une étape de tréfilage.
9. Assemblage soudé (1 ; 7 ; 20) comprenant au moins deux parties de pièces (3 ; 12 ; 7), réalisées chacune dans un matériau de base, les parties de pièces (3 ; 12 ; 7) étant liées entre elles par un cordon de soudure (5 ; 15 ; 22) obtenu à partir du fil d'apport selon la revendication 7, le matériau de base étant choisi parmi un alliage fer-nickel de type Fe-9Ni, un alliage à base de nickel de type C-276, C-4 ou 22 et un acier au carbone, par exemple un acier X56, X60, X65 ou X70.
10. Assemblage soudé selon la revendication 9, ledit assemblage soudé formant un tronçon de tube (7) comprenant une tôle repliée en forme de tube, dont les bords longitudinaux (12) constituent les parties de pièces (3) liées entre elles par le cordon de soudure (15).

- 5
11. Assemblage soudé selon la revendication 10, le tronçon de tube (7) étant muni d'un revêtement (30) réalisé dans l'alliage selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, sur au moins une partie, et de préférence l'intégralité, de sa surface intérieure.
- 10
12. Assemblage soudé selon la revendication 9, ledit assemblage soudé formant un tube (20) comprenant au moins deux tronçons de tube (7), les tronçons de tube (7) constituant les parties de pièces (3), et le cordon de soudure (22) s'étendant le long de la circonférence du tube (20), les tronçons de tube (7) étant de préférence des tronçons de tube (7) selon l'une des revendications 10 ou 11.
- 15
13. Procédé de fabrication d'un assemblage soudé (1 ; 7 ; 20) selon l'une quelconque des revendications 9 à 12, comprenant le soudage entre elles des deux parties de pièces (3 ; 12, 7) au moyen du fil d'apport selon la revendication 7, le soudage étant en particulier un soudage à l'arc.
- 20
14. Procédé de fabrication d'un assemblage soudé (7) selon la revendication 10 ou 11, dans lequel l'étape de soudage est une étape de soudage entre eux des bords longitudinaux (12) de la tôle (9), la soudure étant de préférence une soudure longitudinale bout à bout.
- 25
15. Procédé de fabrication d'un assemblage soudé (20) selon la revendication 12, comprenant, avant l'étape de soudage, les étapes successives suivantes :
- 30
- fourniture d'un premier tronçon de tube (7) et d'un deuxième tronçon de tube (7) s'étendant chacun suivant un axe longitudinal (M), et réalisés dans le matériau de base ;
 - positionnement des premier et deuxième tronçons de tube (7) de telle sorte qu'une extrémité longitudinale (24) du premier tronçon de tube (7) soit disposée en regard d'une extrémité longitudinale (24) du deuxième tronçon de tube (7) selon l'axe longitudinal (M) des premier et deuxième tronçons de tube (7) ; et
- 35
- dans lequel l'étape de soudage est une étape de soudage entre elles de deux extrémités longitudinales (24) en regard des premier et deuxième

tronçons de tube (7), le soudage étant de préférence un soudage bout à bout orbital.

- 5 **16.** Pièce ou partie de pièce réalisée dans un alliage selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, ladite pièce ou partie de pièce étant obtenue par fabrication additive métallique.
- 10 **17.** Procédé de fabrication d'une pièce ou d'une partie de pièce, comprenant une étape de fabrication de ladite pièce ou partie de pièce par un procédé de fabrication additive métallique utilisant, en tant que matériau d'apport, un fil d'apport réalisé dans l'alliage selon l'une quelconque des revendications 1 à 4 et/ou une poudre réalisée dans l'alliage selon l'une quelconque des revendications 1 à 4.
- 15 **18.** Utilisation du fil d'apport selon la revendication 7 :
- comme fil d'apport de soudage pour souder entre elles deux parties de pièces réalisées dans un matériau de base, le matériau de base étant un alliage fer-nickel de type Fe-9Ni, un alliage à base de nickel de type C-276, C-4 ou 22, ou un acier au carbone, et par exemple un acier X56, X60, X65 ou X70 ; et/ou
20 - comme fil de rechargement pour réaliser un revêtement sur des pièces ou parties de pièces réalisées dans un matériau de base, le matériau de base étant un matériau métallique, de préférence un acier au carbone, et par exemple un acier X56, X60, X65 ou X70 ; et/ou
25 - comme fil d'apport dans le cadre d'un procédé de fabrication additive métallique.
- 30 **19.** Poudre métallique réalisée dans un alliage selon l'une quelconque des revendications 1 à 4.
- 35 **20.** Procédé de fabrication d'une poudre métallique selon la revendication 19, ledit procédé comprenant une étape de fourniture d'un fil d'apport selon la revendication 7, ainsi qu'une étape d'atomisation plasma de ce fil d'apport pour obtenir la poudre métallique.