

DESCRIPTION
TITRE : JOINT FILETE AVEC PORTEE D'ETANCHEITE REALISEE PAR
FABRICATION ADDITIVE

5

L'invention concerne les composants filetés tubulaires en acier et plus particulièrement un joint fileté tubulaire comprenant une portée d'étanchéité réalisée par fabrication additive, pour le forage, l'exploitation des puits d'hydrocarbures ou pour le transport de pétrole et de gaz.

- 10 On entend ici par "composant" tout élément ou accessoire utilisé pour forer ou exploiter un puit et comprenant au moins une connexion ou connecteur ou encore extrémité filetée, et destiné à être assemblé par un filetage à un autre composant pour constituer avec cet autre composant un joint fileté tubulaire. Le composant peut être par exemple un élément tubulaire de relativement grande longueur (notamment d'environ une dizaine de mètres de longueur),
- 15 par exemple un tube, ou bien un manchon tubulaire de quelques dizaines de centimètres de longueur, ou encore un accessoire de ces éléments tubulaires (dispositif de suspension ou « hanger », pièce de changement de section ou « cross-over », vanne de sécurité, connecteur pour tige de forage ou « tool joint », « sub », et analogues).

- Les joints tubulaires sont dotés d'extrémités filetées. Ces extrémités filetées sont
- 20 complémentaires permettant le raccordement de deux éléments tubulaires mâle (« Pin ») et femelle (« Box ») entre eux. Il y a donc une extrémité filetée male et une extrémité filetée femelle. Les extrémités filetées dites premium ou semi-premium comportent généralement au moins une surface de butée. Une première butée peut être formée par deux surfaces de deux extrémités filetées, orientées de façon sensiblement radiale, configurées de façon à être
- 25 en contact l'une avec l'autre à l'issue du vissage des extrémités filetées entre elles ou lors de sollicitations de compression. Les butées ont généralement des angles négatifs par rapport à l'axe principal des connexions. On connaît également des butées intermédiaires sur des joints comportant au moins deux étages de filetage.

- De manière générale, pour des raisons techniques et d'usinage, les différentes parties d'un
- 30 même composant, qu'il s'agisse de l'élément tubulaire ou encore des extrémités filetées, sont conçus selon un seul et même type de matériau (alliage ou non).

Les connexions premium comportent des surfaces d'étanchéité appelées portées d'étanchéité, au moins une sur le pin, et au moins une correspondante sur le box, destinées à être mises en contact interférant lorsque connexion pin et box sont assemblées l'une avec l'autre, de manière à former une étanchéité aux liquides et/ou aux gaz. Les portées
5 d'étanchéité doivent maintenir une étanchéité empêchant le passage de liquides et/ou de gaz lorsque les connexions sont assemblées et lors de l'utilisation des tubes comportant ces connexions assemblées dans une colonne de puits de pétrole, c'est-à-dire que la fonction d'étanchéité doit être maintenue dans le plus large spectre d'utilisation possible, y compris lorsque la connexion est soumise à une pression interne ou à une pression externe, à des
10 sollicitations de compression ou des sollicitations de traction, à température ambiante ou à température élevée, ce spectre correspondant à un domaine de fonctionnement de la connexion.

Les portées d'étanchéités mâles et femelles correspondantes présentent alors une interférence radiale génératrice d'une pression de contact et les flancs de filet dits "porteurs"
15 situés sur le filet du côté opposé à l'extrémité libre de l'élément fileté sont en contact sous pression de contact, mettant ainsi sous compression axiale la lèvre.

Les portées d'étanchéités interférentes peuvent poser des problèmes de grippage au cours du vissage si leur géométrie est inadaptée. Elles peuvent aussi poser des risques de fuite en
20 service si la pression de contact et notamment la pression de contact intégrée sur la largeur active des portées d'étanchéité est insuffisante.

Pour éviter le risque de fuite il est nécessaire que la pression de contact intégrée sur la longueur de contact reste supérieure à une certaine valeur exprimée en N/mm ; cette pression
25 de contact intégrée est fonction d'une géométrie donnée du positionnement relatif des éléments en fin de vissage et des sollicitations en service.

L'interférence est le résultat de la différence de diamètre entre portée mâle (D_m) et femelle (D_f) dans la zone de pression d'étanchéité. La différence $D_m - D_f$ étant positive le diamètre mâle est supérieur au diamètre femelle, Ainsi, à l'interface 11 (voir figures 1 et 2) des pressions
30 de contact sont générées

On entend par frusto-conique la forme d'un tronc de cône c'est-à-dire la partie basale d'un cône solide ou d'une pyramide formée en coupant le sommet par un plan parallèle à la base, et par torique la forme d'un tore.

En général, les portées d'étanchéité sont conçues pour travailler dans le domaine élastique du matériau qui les constitue de façon à maintenir la qualité d'étanchéité sous diverses sollicitations successives.

Cependant, pour assurer une bonne étanchéité, les portées d'étanchéité doivent être assemblées de manière à créer de grandes pressions de contact. Il peut arriver, notamment en cours d'assemblage, lorsque l'on recherche des performances élevées, que des pressions de contact trop fortes soient atteintes, avec des risques de plastification, ou encore des risques de grippage. On entend par grippage des cas où de la matière est arrachée : En cas de grippage, la fonction d'étanchéité est fortement compromise.

En général dans l'état de l'art, soit pour réduire le pic de pression de contact on augmente le rayon de contact, mais ceci a pour conséquence que le contact bouge beaucoup et devient instable. Soit on réduit l'interférence ce qui a pour effet de réduire l'aire sous la courbe de pression de contact en fonction de la distance à l'axe de symétrie (Fig. 4) et donc la performance d'étanchéité.

C'est pourquoi il y a un besoin pour améliorer les portées d'étanchéité de manière à diminuer les risques de grippage, à répartir les pressions de contact, ou à résister à des pressions de contact transitoires élevées pendant l'assemblage de deux connexions. En effet, une diminution de la dureté du matériau implique une répartition des pressions de contact, ce qui permet d'éviter lors d'un vissage d'aller jusqu'à la limite élastique du matériau, et par conséquent d'éviter également une déformation plastique du matériau.

Les surfaces d'étanchéités dans une connexion sont donc le résultat de nombreux compromis de conception. De manière générale, le paradigme de ces compromis repose sur les axes suivants : une épaisseur de matière élevée de manière à pouvoir résister à la pression, mais une épaisseur élevée génère des risques de grippage dus à une pression de contact trop élevée.

On connaît dans l'état de l'art la solution d'élargir la surface de contact, par US3870351, avec des géométries de surface d'étanchéité de type torique. Cette solution permet d'améliorer la

répétabilité de la répartition d'efforts de contact entre des surfaces d'étanchéité lors de l'assemblage de deux connexions. Cependant, cette géométrie connaît des limitations dans le compromis exposé ci-dessus.

On connaît dans l'art antérieur la solution proposée par le document US2005248153
5 concernant des portées d'étanchéité aménagées sur des lèvres allongées de manière à donner de la flexibilité de mouvement à la portée d'étanchéité durant l'assemblage. Il en ressort de ce document l'utilisation uniforme d'un même type de matériau pour l'ensemble du tube, par exemple répondant aux standards API de type P110.

On connaît de l'art antérieur la solution proposée par le brevet US 2010/0301603 A1
10 concernant une invention dans le domaine des joints filetés tubulaires supérieurs utilisés pour connecter les tubes en acier, tels que des tubes de forage, par exemple intérieur ou extérieur. Il est divulgué notamment que l'étanchéité aux fluides (liquides ou gaz) sous forte pression résulte d'un serrage radial mutuel des portées d'étanchéité. L'intensité du serrage radial est fonction du positionnement axial relatif des éléments filetés mâle et femelle et est donc
15 définie par la mise en butée de ces éléments par des butées de vissage. Ce document a pour but d'améliorer l'étanchéité du joint fileté tubulaire, et notamment du joint fileté tubulaire dans sa structure prête à l'emploi.

La présente invention a pour but de résoudre les problèmes de l'état de l'art cité, en réalisant une partie ajoutée par fabrication additive.

20

L'invention consiste en un joint fileté tubulaire pour le forage, l'exploitation des puits d'hydrocarbures ou le transport de pétrole et de gaz comprenant un élément tubulaire fileté mâle et un élément tubulaire fileté femelle, l'élément tubulaire fileté femelle comprenant une partie filetée intérieure femelle et une partie non filetée femelle, l'élément tubulaire fileté
25 mâle comprenant une partie filetée extérieure mâle et une partie non filetée mâle, caractérisé en ce que au moins l'un des éléments tubulaires mâle ou femelle comprend un corps et une partie ajoutée par fabrication additive qui comprend au moins une première surface d'étanchéité.

Selon un mode de réalisation, le joint fileté tubulaire est caractérisé en ce que la partie ajoutée
30 est réalisée par fabrication additive par rechargement, par fusion par faisceau d'électrons, par fusion laser sur lit de poudre métallique ou « selective laser melting », par frittage sélectif par

laser, par dépôt métallique direct ou « Direct Energy Deposition », par Dépôt par Projection de Liant ou Dépôt par Projection Laser, par dépôt par fabrication additive arc-fil.

Selon un mode de réalisation, le joint fileté tubulaire comprenant une deuxième surface d'étanchéité sur l'autre des éléments mâle ou femelle correspondante à la première surface d'étanchéité est caractérisé en ce que l'une ou l'autre de la première ou deuxième surface d'étanchéité est frusto-conique et l'autre torique.

Selon un mode de réalisation le joint fileté tubulaire est caractérisé en ce que la partie ajoutée présente une dureté inférieure à la dureté du corps sur au moins 0.6 mm de profondeur.

Selon un mode de réalisation, le joint fileté tubulaire est caractérisé en ce que la partie ajoutée a une longueur L supérieure ou égale à une longueur minimale Lmin telle que :

$$L_{min} = 12,8 \times \sqrt{\frac{160 \times e \times \text{intf} \times R \times (1 - v^2)}{\pi \times D_s^2}} + 2$$

Où :

e valeur de l'épaisseur d'une lèvre supportant la surface d'étanchéité torique;

intf valeur de l'interférence ;

R valeur du rayon de courbure de la surface d'étanchéité torique ;

v valeur du coefficient de Poisson du matériau de la surface d'étanchéité torique;

Ds valeur du diamètre d'étanchéité.

Selon un mode de réalisation le joint fileté tubulaire est caractérisé en ce que la partie ajoutée a une longueur L inférieure ou égale à une longueur maximale Lmax telle que :

$$L_{max} = 1,5 \times L_{min}$$

Selon un mode de réalisation le joint fileté tubulaire est caractérisé en ce que la partie ajoutée a une longueur L supérieure ou égale à 4 mm.

Selon un mode de réalisation le joint fileté tubulaire est caractérisé en ce que la partie ajoutée a une épaisseur Ep supérieure ou égale à une épaisseur minimale Epmín telle que :

$$E_{pmin} = 5,031 \times \sqrt{\frac{160 \times e \times intf \times R \times (1 - \nu^2)}{\pi \times Ds^2}}$$

Où :

- e valeur de l'épaisseur d'une lèvre supportant la surface d'étanchéité torique;
- 5 intf valeur de l'interférence ;
- R valeur du rayon de courbure de la surface d'étanchéité torique ;
- v valeur du coefficient de Poisson du matériau de la surface d'étanchéité torique;
- Ds valeur du diamètre d'étanchéité.

10

Selon un mode de réalisation, le joint fileté tubulaire est caractérisé en ce que la partie ajoutée a une épaisseur E_p inférieure ou égale à une épaisseur maximale E_{pmax} telle que :

$$E_{pmax} = 1,5 \times E_{pmin}$$

15

Selon un mode de réalisation, le joint fileté tubulaire est caractérisé en ce que la partie ajoutée a une épaisseur E_p supérieure ou égale à 0.6 mm.

Selon un mode de réalisation, le joint fileté tubulaire est caractérisé en ce que la partie ajoutée présente un coefficient de frottement supérieur au coefficient de frottement du corps.

20

Selon un mode de réalisation, le joint fileté tubulaire est caractérisé en ce que la partie ajoutée comprend un métal choisi parmi les aciers alliés, fortement alliés, alliage cupro-nickel, alliage de titane, cuivre, cupronickel, vitrocéramique.

Selon un mode de réalisation, le joint fileté tubulaire est caractérisé en ce que la partie ajoutée comprends un matériau de module de Young entre 110 GPa et 210 GPa, de préférence entre 110 GPa et 160 GPa.

25

L'invention comprend également un procédé de réalisation de la partie ajoutée par fabrication additive selon la description suivante :

Un procédé pour obtenir un joint fileté tubulaire en ce que la partie ajoutée est réalisée par un procédé choisi parmi les procédés de rechargement, les procédés de fusion par faisceau

d'électrons, les procédés de fusion laser sur lit de poudre métallique ou « selective laser melting », les procédés de frittage sélectif par laser, les procédés de dépôt métallique direct ou « Direct Energy Deposition », les procédés de Dépôt par Projection de Liant ou Dépôt par Projection Laser, les procédés de dépôt par fabrication additive arc-fil.

- 5 Par exemple des essais ont été réalisés avec des matériaux de type, alliages titane, Fero 55 et stellite avec un procédé de dépôt métallique direct ou par dépôt par fabrication additive arc-fil.

Alternativement on peut réaliser la partie ajoutée avec des matériaux de type céramiques et vitrocéramiques par procédé de fusion laser sur lit de poudre métallique ou « selective laser
10 melting ».

Alternativement on peut réaliser la partie ajoutée avec des matériaux de type alliage cupro-nickel ou acier micro-allié en utilisant par exemple une technique additive « Arc-fil ».

Alternativement on peut réaliser une partie ajoutée (9) par fabrication additive à la fois sur l'élément tubulaire mâle (2) et sur l'élément tubulaire femelle (3).

15

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaitront à l'examen de la description détaillée ci-après, et des dessins annexés.

[Fig 1] décrit de façon schématique, dans une vue de coupe longitudinale selon un axe X du tube, un joint fileté tubulaire selon un premier mode de réalisation dans lequel la partie
20 ajoutée de l'élément tubulaire mâle est réalisée par fabrication additive.

[Fig 2] décrit de façon schématique, dans une vue de coupe longitudinale selon un axe X du tube, un joint fileté tubulaire selon une variation du premier mode de réalisation dans lequel la partie ajoutée de l'élément tubulaire femelle est réalisée par fabrication additive.

[Fig 3] décrit la courbe de pression de contact d'une connexion selon l'état de l'art en
25 comparaison avec la courbe de pression correspondant à une surface d'étanchéité selon l'invention.

[Fig 4] décrit un graphique représentant la courbe de pression de contact en fonction de la distance à l'axe de symétrie selon l'état de l'art.

[Fig 5] décrit un graphique représentant la courbe de pression de contact en fonction de la distance à l'axe de symétrie selon une variante de l'invention.

[Fig 6] décrit un graphique représentant la répartition des contraintes en fonction de la profondeur selon l'état de l'art.

- 5 [Fig 7] décrit un graphique représentant la répartition des contraintes en fonction de la profondeur selon une connexion comprenant une partie ajoutée réalisée par fabrication additive.

Les dessins annexés pourront non seulement servir à compléter l'invention, mais aussi contribuer à sa définition, le cas échéant. Ils ne sont pas limitatifs quant à la portée de
10 l'invention.

La figure 1 décrit un joint fileté tubulaire (1) avec une partie ajoutée (9) sur un élément tubulaire mâle (2). Cette partie ajoutée (9) est réalisée par fabrication additive et comprends une surface d'étanchéité mâle (10) établissant une étanchéité métal-métal (15). Cette étanchéité métal-métal (15) assure une étanchéité à l'état monté du joint et pendant
15 l'utilisation du joint dans un large spectre de contraintes exercées sur le joint, telles que pression intérieure, pression extérieure, efforts de compression, efforts de traction.

Le joint fileté tubulaire (1) est représenté selon une vue axiale ou longitudinale.

Selon une variante de l'invention, la partie ajoutée (9) est réalisée par fabrication additive de telle manière à ce que la dureté est inférieure à celle de la partie non ajoutée, c'est-à-dire le
20 corps (4) mâle ou femelle sur au moins 0.6 mm de profondeur.

Selon une autre variante de l'invention, la partie ajoutée (9) est réalisée par fabrication additive de telle manière à ce que le coefficient de frottement est supérieur à celui du le corps (4) mâle ou femelle.

L'invention permet également d'augmenter significativement le coefficient de frottement
25 entre la partie ajoutée par fabrication additive et le matériau du corps de l'élément tubulaire correspondant, en comparaison avec le coefficient de frottement des corps de l'élément tubulaire mâle et femelle entre eux.

Une augmentation du coefficient de frottement s'accompagne par une augmentation la valeur de couple de vissage applicable lors d'une connexion de deux éléments tubulaires filetés.

La dureté dépend notamment du type de matériau utilisé, mais les matériaux peuvent être
5 sélectionnés de telle manière à ce que la dureté est inférieure dans la partie ajoutée (9) par rapport au corps (4) mâle ou femelle.

Selon un aspect de l'invention, la partie ajoutée (9) comprend un métal choisi parmi les aciers alliés, fortement alliés, alliages cupro-nickel, alliages de titane, céramiques, vitrocéramiques, ou cuivre, cupronickel, stellite, fero 55.

10 Avantageusement la fabrication additive permet d'obtenir un élément tubulaire sous forme d'un bi composant, (voire davantage de composants) avec par exemple d'un côté un type de composant ou matériau pour le corps et de l'autre côté un ou plusieurs autres composants différents pour la partie ajoutée. Contrairement aux éléments tubulaires de l'état de l'art qui sont conçus selon un monocomposant sur l'ensemble de l'élément.

15 Avantageusement l'invention permet de diminuer des opérations d'usinage coûteuses.

Avantageusement l'invention permet d'augmenter et d'améliorer la complexité géométrique de l'élément obtenu à travers un mode de construction couche par couche.

Avantageusement plusieurs parties différentes, par exemple avec une dimension, une complexité, un ou des matériaux différents, peuvent être construites ensemble et en même
20 temps, ou alors ajoutées pendant la construction.

Avantageusement plusieurs fonctionnalités peuvent être ajoutées en regard d'un haut niveau de personnalisation.

Selon un aspect de l'invention, la longueur L est supérieure ou égale à une longueur minimale
25 Lmin de la partie ajoutée (9) par fabrication additive et comprenant la surface d'étanchéité. La longueur L s'étend selon l'axe X du tube. Cette équation est applicable à une surface d'étanchéité torique ou de type torque-Cône, c'est-à-dire présentant un rayon de courbure R et le cône étant soit sur l'élément tubulaire mâle (2) soit sur l'élément tubulaire femelle (3). Respectivement, le tore étant soit sur l'élément tubulaire femelle (3) soit sur l'élément
30 tubulaire mâle (2).

Cette longueur minimale dépend par ailleurs du diamètre d'étanchéité D_s , de l'interférence $intf$, de l'épaisseur de la lèvre supportant la surface d'étanchéité e , le rayon de la portion torique R ainsi que du coefficient de Poisson du matériau ν . Le coefficient multiplicateur 12,8 est appliqué. Ce coefficient prend en compte le mouvement relatif entre l'élément mâle lors de sollicitations de type traction/compression. En effet, à titre d'exemple, sous tension, la partie non fileté femelle (6) c'est-à-dire la longueur de l'élément tubulaire femelle entre le filetage et la butée, s'allonge et donc le contact va se décaler. Ainsi le coefficient de 12.8 prend en compte ces variations afin que l'on s'assure que lorsque l'on applique une traction/compression ou toute autre forme de pression, la surface d'étanchéité de la partie réalisée par fabrication additive reste bien en contact sur la surface correspondante. On ajoute +2 à titre de marge de sécurité.

L_{min} est telle que :

$$L_{min} = 12,8 \times \sqrt{\frac{160 \times e \times intf \times R \times (1 - \nu^2)}{\pi \times D_s^2}} + 2$$

Où :

- e valeur de l'épaisseur d'une lèvre supportant la surface d'étanchéité torique;
- $intf$ valeur de l'interférence ;
- R valeur du rayon de courbure de la surface d'étanchéité torique ;
- ν valeur du coefficient de Poisson du matériau de la surface d'étanchéité torique;
- D_s valeur du diamètre d'étanchéité.

Selon une variante de l'invention la partie ajoutée (9) a une longueur L supérieure ou égale à 4mm.

Selon un autre aspect, la partie ajoutée (9) par fabrication additive et comprenant la surface d'étanchéité a une épaisseur E_p supérieure ou égale à une épaisseur minimale E_{pmin} . Cette équation est applicable à une surface d'étanchéité torique ou de type torque-Cône, c'est-à-dire présentant un rayon de courbure R .

Cette épaisseur (ou hauteur) minimale E_{pmin} dépend du diamètre d'étanchéité D_s , de l'interférence $intf$, de l'épaisseur de la lèvre supportant la surface d'étanchéité e , le rayon de

la portion torique R ainsi que du coefficient de Poisson du matériau ν . Le coefficient multiplicateur 5,031 est appliqué. Ce coefficient correspond à la demi-longueur de contact qui multiplié par 0.7861 qui permet de calculer la profondeur pour laquelle la contrainte de cisaillement est maximale c'est-à-dire $(12.8/2) \times 0.7861 \approx 5.031$. « 0.7861 » correspond au

5 coefficient de la théorie d'hertz dans le cadre d'un contact linéique.

E_{pmin} est telle que :

$$E_{pmin} = 5,031 \times \sqrt{\frac{160 \times e \times \text{intf} \times R \times (1 - \nu^2)}{\pi \times D_s^2}}$$

Où :

- 10 e valeur de l'épaisseur d'une lèvres supportant la surface d'étanchéité torique;
 intf valeur de l'interférence ;
 R valeur du rayon de courbure de la surface d'étanchéité torique ;
 ν valeur du coefficient de Poisson du matériau de la surface d'étanchéité torique;
 D_s valeur du diamètre d'étanchéité.

15

Selon une variante de l'invention la partie ajoutée (9) a une épaisseur E_p supérieure ou égale à 0.6 mm.

Il a été constaté que la longueur maximale L_{max} pouvait être fixée à 1,5 fois la longueur minimale, ce qui permet d'assurer le fonctionnement de la partie ajoutée par fabrication

20 additive sans devoir réaliser une trop grande portion en fabrication additive, et d'éviter ainsi des coûts supplémentaires inutiles.

De la même manière, l'épaisseur maximale E_{pmax} de la partie ajoutée par fabrication additive peut être fixée à 1, 5 fois l'épaisseur minimale de la partie ajoutée par fabrication additive.

La figure et le dimensionnement pour la partie ajoutée (9) du joint fileté tubulaire (1) ont été

25 sélectionnés à titre de représentation schématique.

La figure 2 décrit, selon une autre variation de l'invention, un joint fileté tubulaire (1) avec une partie ajoutée (9) sur un élément tubulaire femelle (3). Cette partie ajoutée (9) est réalisée

par fabrication additive et comprends une surface d'étanchéité femelle (11) établissant une étanchéité métal-métal (15). Selon une variante de l'invention, la partie ajoutée (9) est réalisée par fabrication additive de telle manière à ce que la dureté est inférieure à celle de la partie non ajoutée, c'est-à-dire le corps (4) mâle ou femelle sur au moins 0.6 mm de profondeur.

Selon une autre variante de l'invention, la partie ajoutée (9) est réalisée par fabrication additive de telle manière à ce que le coefficient de frottement est supérieur à celui du le corps (4) mâle ou femelle.

Selon un aspect de l'invention, la longueur L est supérieure ou égale à une longueur minimale L_{min} de la partie ajoutée (9) par fabrication additive et comprenant la surface d'étanchéité. Cette équation est applicable à une surface d'étanchéité torique ou de type torque-Cône, c'est-à-dire présentant un rayon de courbure R et le cône étant soit sur l'élément tubulaire mâle (2) soit sur l'élément tubulaire femelle (3). Respectivement, le tore étant soit sur l'élément tubulaire femelle (3) soit sur l'élément tubulaire mâle (2).

Cette longueur minimale dépend par ailleurs du diamètre d'étanchéité D_s, de l'interférence int_f, de l'épaisseur de la lèvre supportant la surface d'étanchéité e, le rayon de la portion torique R ainsi que du coefficient de Poisson du matériau ν. Le coefficient multiplicateur 12,8 est appliqué. Ce coefficient prend en compte le mouvement relatif entre l'élément mâle lors de sollicitations de type traction/compression. En effet, à titre d'exemple, sous tension, la partie non fileté femelle (6) c'est-à-dire la longueur de l'élément tubulaire femelle entre le filetage et la butée, s'allonge et donc le contact va se décaler. Ainsi le coefficient de 12.8 prend en compte ces variations afin que l'on s'assure que lorsque l'on applique une traction/compression ou toute autre forme de pression, la surface d'étanchéité de la partie réalisée par fabrication additive reste bien en contact sur la surface correspondante. On ajoute +2 à titre de marge de sécurité.

L_{min} est telle que :

$$L_{min} = 12,8 \times \sqrt{\frac{160 \times e \times \text{intf} \times R \times (1 - \nu^2)}{\pi \times D_s^2}} + 2$$

Où :

- e valeur de l'épaisseur d'une lèvre supportant la surface d'étanchéité torique;
 intf valeur de l'interférence ;
 R valeur du rayon de courbure de la surface d'étanchéité torique ;
 v valeur du coefficient de Poisson du matériau de la surface d'étanchéité torique;
 5 Ds valeur du diamètre d'étanchéité.

Selon une variante de l'invention la partie ajoutée (9) a une longueur L supérieure ou égale à 4mm.

- Selon un autre aspect, la partie ajoutée (9) par fabrication additive et comprenant la surface
 10 d'étanchéité a une épaisseur E_p supérieure ou égale à une épaisseur minimale E_{pmin} . Cette équation est applicable à une surface d'étanchéité torique ou de type torque-Cône, c'est-à-dire présentant un rayon de courbure R.

- Cette épaisseur (ou hauteur) minimale E_{pmin} dépend du diamètre d'étanchéité D_s , de l'interférence $intf$, de l'épaisseur de la lèvre supportant la surface d'étanchéité e , le rayon de
 15 la portion torique R ainsi que du coefficient de Poisson du matériau v . Le coefficient multiplicateur 5,031 est appliqué. Ce coefficient correspond à la demi-longueur de contact qui multiplié par 0.7861 qui permet de calculer la profondeur pour laquelle la contrainte de cisaillement est maximale c'est-à-dire $(12.8/2) \times 0.7861 \approx 5.031$. « 0.7861 » correspond au coefficient de la théorie d'hertz dans le cadre d'un contact linéique.

- 20 E_{pmin} est telle que :

$$E_{pmin} = 5,031 \times \sqrt{\frac{160 \times e \times intf \times R \times (1 - v^2)}{\pi \times D_s^2}}$$

Où :

- e valeur de l'épaisseur d'une lèvre supportant la surface d'étanchéité torique;
 intf valeur de l'interférence ;
 25 R valeur du rayon de courbure de la surface d'étanchéité torique ;
 v valeur du coefficient de Poisson du matériau de la surface d'étanchéité torique;
 Ds valeur du diamètre d'étanchéité.

Selon une variante de l'invention la partie ajoutée (9) a une épaisseur E_p supérieure ou égale à 0.6 mm.

Il a été constaté que la longueur maximale L_{max} pouvait être fixée à 1,5 fois la longueur minimale, ce qui permet d'assurer le fonctionnement de la partie ajoutée par fabrication additive sans devoir réaliser une trop grande portion en fabrication additive, et d'éviter ainsi des coûts supplémentaires inutiles.

De la même manière, l'épaisseur maximale E_{pmax} de la partie ajoutée par fabrication additive peut être fixée à 1, 5 fois l'épaisseur minimale de la partie ajoutée par fabrication additive.

La figure et le dimensionnement pour la partie ajoutée (9) du joint fileté tubulaire (1) a été sélectionné à titre de représentation schématique.

La figure 3 représente une courbe de pression de contact d'une connexion selon l'état de l'art et une autre courbe correspondant à une surface d'étanchéité selon l'invention. L'abscisse correspond à la position longitudinale le long d'une surface d'étanchéité. L'ordonnée correspond à la pression de contact.

La courbe 21 correspond à une représentation de la pression de contact en fonction de la position longitudinale le long d'une surface d'étanchéité d'une connexion selon l'état de l'art. La courbe 22 correspond à une représentation de la pression de contact en fonction de la position longitudinale le long d'une surface d'étanchéité d'une connexion selon l'invention, c'est-à-dire une connexion comprenant une portion réalisée par fabrication additive, cette portion comprenant la surface d'étanchéité, et le matériau étant de dureté moins élevée que le matériau de base de la connexion.

La courbe 21 montrant la répartition de la pression de contact est généralement une parabole, présentant un pic. Ce pic dépasse le seuil P_g correspondant à une pression à partir de laquelle le risque de grippage est élevé.

La courbe 22 montre que la pression de contact d'une connexion selon l'invention est répartie sur une largeur plus grande, et diminue le niveau de la pointe de répartition de pression de contact, de sorte que le seuil P_g n'est pas atteint. On remarque aussi que la surface de la courbe 22 est plus importante que la surface de la courbe 21. C'est-à-dire que la force de

contact entre les surfaces d'étanchéité est plus grande sur une connexion selon l'invention que sur une connexion de l'état de l'art. Avec une connexion selon l'invention, il est donc possible d'augmenter la pression de contact entre des surfaces d'étanchéité tout en diminuant le risque de grippage des surfaces d'étanchéité.

5

La figure 4 représente la pression de contact en fonction de la distance à l'axe de symétrie selon l'état de l'art entre deux surfaces d'étanchéité. La connexion est entièrement réalisée en acier de module d'élasticité $E1$ d'une valeur de 210 000 Mpa. La surface d'étanchéité est soumise à une force de contact de 70 000 N et le rayon de courbure de la surface d'étanchéité torique est de 100mm. Il n'y a pas de partie ajoutée par fabrication additive selon l'invention.

La figure 5 représente la pression de contact en fonction de la distance à l'axe de symétrie selon l'invention entre deux surfaces d'étanchéité. La connexion est réalisée d'un côté avec le corps (4) en acier de module d'élasticité $E1$ d'une valeur de 210 000 Mpa et de l'autre côté avec la partie ajoutée (9) comprenant une surface d'étanchéité torique, réalisée avec un acier de module d'élasticité $E2 = 140\,000$ Mpa. La surface d'étanchéité est soumise à une force de contact de 70 000 N et le rayon de courbure de la surface d'étanchéité torique est de 100mm.

En comparant la figure 4 et 5, seule la présence d'une partie ajoutée (9) par fabrication additive d'un matériau différent et de module de Young moindre et comprenant la surface d'étanchéité torique distingue les deux connexions.

La comparaison montre ainsi clairement que l'ajout d'une partie ajoutée (9) selon l'invention présente par rapport à l'état de l'art, un pic de pression de contact diminué passant d'environ 710 Mpa sur la figure 4 à 640 Mpa sur la figure 5. D'un autre côté, la distance à l'axe de symétrie augmente en passant de 1.25 mm à 1.45 mm. Ainsi on constate que la largeur de pression de contact est augmentée, passant de 2.5 mm à 2.9 mm alors que la valeur du pic de pression de contact passe en même temps d'environ 710 Mpa à 640 Mpa. Par ailleurs en prenant en considération les paramètres de la figure 4 on a une demi-aire de surface de 596 soit une aire sous la courbe égale à 1192. En prenant en considération les paramètres de la figure 5, on a une demi-aire de surface de 618 soit une aire sous la courbe de 1236. Une augmentation de l'aire sous la courbe se traduit par une amélioration des performances d'étanchéités.

30

L'invention permet donc par rapport à l'état de l'art non seulement de diminuer le pic de pression de contact, d'augmenter la répartition de la de pression de contact tout en augmentant l'aire sous la courbe, c'est-à-dire tout en augmentant les performances d'étanchéité.

- 5 La figure 6 représente la répartition des contraintes en fonction de la profondeur selon l'état de l'art. Les différentes contraintes sont représentées selon les courbes $\sigma_y(z)$, $\sigma_x(z)$, $\sigma_z(z)$ et $\tau_{xz}(z)$. On constate qu'au fur et à mesure que z augmente, c'est-à-dire plus on s'éloigne de la surface et plus on va en profondeur plus les contraintes diminuent.

- 10 La figure 7 représente la répartition des contraintes en fonction de la profondeur selon une connexion comprenant une partie ajoutée (9) réalisée par fabrication additive. Les différentes contraintes sont représentées selon les courbes $\sigma_y(z)$, $\sigma_x(z)$, $\sigma_z(z)$ et $\tau_{xz}(z)$. On constate qu'au fur et à mesure que z augmente, c'est-à-dire plus on s'éloigne de la surface et plus on va en profondeur plus les contraintes diminuent.

- 15 En comparant le résultat des figures 6 et 7, les contraintes selon l'invention sont nettement plus réduites par rapport aux contraintes selon l'état de l'art que ce soit en surface ($z = 0$), ou en profondeur ($z=4$ par exemple).

Cela montre qu'avec une connexion selon l'invention, il est possible d'augmenter l'interférence sans augmenter les risques de grippage.