

[Cliquer sur le sommaire pour parcourir plus vite ce document.](#)

<u>Les métaux non ferreux - Alliage cuivre-béryllium et titane</u>	81
<u>1 – Introduction</u>	81
<u>2 – Le cuivre-béryllium</u>	81
<u>2 – 1. Propriétés physiques et chimiques</u>	82
<u>2 – 2. Un peu de chimie</u>	83
<u>2 – 3. Assemblage de Cu-Be</u>	84
<u>2 – 4. Usinage</u>	85
<u>2 – 5. Conditionnement</u>	85
<u>3 – Le titane</u>	85
<u>3 – 1. Propriétés physiques et chimiques</u>	86
<u>3 – 2. Un peu de chimie</u>	87
<u>3 – 3. Usinage</u>	87
<u>3 – 4. Assemblage du titane</u>	88
<u>4 – Bibliographie</u>	88

Liens : <https://doi.org/10.5281/zenodo.400484>

<http://www.sudoc.fr/155436619>

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01472125>

<https://hal.archives-ouvertes.fr/INTEGRATIONS/page/materiaux-et-joints-etancheite-pour-les-hautes-pressions>

<https://zenodo.org/communities/integrations>

Référence au format BibTeX :

```
@inbook{7materiaux18_2011,
location = {Meudon},
edition = {{3e éd.}},
title = {Les métaux non ferreux – Alliage cuivre-béryllium et titane},
isbn = {978-2-918701-04-0},
url = {http://www.sudoc.fr/155436619},
series = {Intégrations [des savoirs et des savoir-faire]},
abstract = {Préface / Dominique Leguillon P. 17. Introduction générale / Patrick Boissinot, Patrick Langlois, Agilio A.H. Pádua P. 21. Introduction au dimensionnement / Agilio A.H. Pádua 1 — Définition du problème 2 — Dimensionnement 3 — Obturateurs 4 — Conclusion P. 31. Fretage et autofretage / Patrick Langlois 1 — Considérations préliminaires au fretage 2 — Fretage d'une enceinte bloc 3 — Fretage d'une enceinte multibloc 4 — Formulation de l'autofretage 5 — Modes de réalisation de l'autofretage 6 — Conclusion P. 55. Méthodes d'éléments finis en calcul de structures élastiques / Joël Frelat 1 — Introduction 2 — Rappel de la formule théorique 3 — Formulation variationnelle 4 — Formulation numérique 5 — Etapes d'une mise en œuvre pratique 6 — Conclusion — Extension aux problèmes non linéaires P. 65. Les matériaux sidérurgiques et les hautes pressions / Jean-Paul Dichtel 1 — Caractérisation mécanique des aciers 2 — Métallurgie des aciers et superalliages 3 — Commentaires : la Directive Européenne Appareils à Pression P. 77. Les métaux non ferreux – Alliage cuivre-béryllium et titane / Jean-Pierre Petitet 1 — Introduction 2 — Le cuivre-béryllium 3 — Le titane P. 85. Les Carbures cémentés (WC)-Co / Emmanuel Pauty 1 — Les procédés de fabrication 2 — Les propriétés des carbures cémentés 3 — Conclusions P. 99. Choix et usinage des carbures de tungstène / Jacques Calzas 1 — Choix des carbures de tungstène 2 — Usinage du carbure de tungstène P. 111. Céramiques et matériaux pour l'optique / Jean-Claude Chervin 1 — Céramiques 2 — Matériaux pour l'optique P. 141. Types de joints et de montage / Roger Argoud et Jacques Roux 1 — Introduction 2 — Généralités 3 — Joints à basse pression 4 — Joints cône sur cône 5 — Joints Bridgman Champignon 6 — Joints annulaires auto-serrés 7 — Joints coniques d'Amagat 8 — Autres joints 9 — Conclusion P. 161. Joints hautes pressions pour la compression de gros volumes solides / Sylvie Le Floch 1 — Joints solides utilisés dans les différents types d'enceintes hautes pressions 2 — Matières premières des joints 3 — Assemblages (HP)-(HT) P. 173. Le matériel standard / Jean-Pierre Petitet 1 — Tubes, conduites et raccords 2 — Les vannes 3 — Quelques types d'enceintes commercialisées 4 — Les générateurs de pression 5 — Le matériel moins standard P. 187. Assemblages haute pression / Gérard Hamel 1 — Montage des raccords de pressions 2 — Montage de quelques passages électriques 3 — Les passages de thermocouple 4 — Les passages optiques, montage des fenêtres 5 — Montage des joints et des obturateurs sur une cellule haute pression P. 197. Usinage / Jean-Pierre Michel 1 — Introduction 2 — Les joints de faible épaisseur 3 — Les bagues anti-extrusion à 45° 4 — Les joints à 45° 5 — Les joints « double Bridgman » 6 — Les joints plats en élastomères 7 — Les joints en indium (étanchéité en hélium et azote liquide 8 — Joints métal-métal type Lens ring 9 — Les passages du courant 10 — Usinage de matériaux exotiques P. 211. Les règles de sécurité / Patrick Boissinot 1 — Dangers présentés par les appareils à pression 2 — Appareils à pression rencontrés dans les laboratoires et facteurs de risques 3 — Principes généraux de prévention et réglementation 4 — Moyens de protection 5 — Conclusion},
pages = {73–81},
number = {18},
booktitle = {Matériaux et joints d'étanchéité pour les hautes pressions},
publisher = {{MRCT}-{CNRS}},
author = {Petitet, Jean-Pierre},
bookauthor = {Boissinot, Patrick and Langlois, Patrick and Pádua, Agilio},
editor = {Mottin, Stéphane and Lelièvre, Gérard},
editorb = {Mottin, Stéphane},
editorbtype = {redactor},
date = {2011},
langid = {french},
keywords = {Hautes pressions -- Matériaux, Joints d'étanchéité, Matériaux -- Effets des hautes pressions}, doi = {10.5281/zenodo.400484},
}
```

Les métaux non ferreux - Alliage cuivre-béryllium et titane

Jean Pierre Petitet

Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux et des Hautes Pressions
CNRS, Institut Galilée, Université Paris 13
99 avenue J. B. Clément, 93430 Villetaneuse

1 – Introduction

Le chapitre rédigé par J.P. Dichtel décrit les propriétés mécaniques recherchées lors de la conception des enceintes haute pression. En dehors des aciers dont l'étendue des nuances offre aux concepteurs de matériel haute pression un grand nombre de possibilités, il existe très peu de métaux non ferreux utilisés à cet effet. Les deux principaux sont le cuivre-béryllium (essentiellement les nuances 25 et M25) et le titane (essentiellement la nuance TA6V). Ce dernier, longtemps méconnu, commence à trouver de nombreuses applications mécaniques grâce à l'abaissement de son coût, sa légèreté et l'adéquation de ses propriétés mécaniques à la construction d'ensembles soumis à de fortes contraintes mécaniques et thermiques. Il est utilisé pratiquement pur, ce qui est exceptionnel pour un matériau de structure. Il présente de réels avantages pour les hautes pressions, notamment dans la manipulation des fluides supercritiques, pour sa bonne résistance à la corrosion et sa bonne tenue en température tant que celle-ci reste inférieure à 400°C. On reviendra par la suite sur ce qui justifie le choix des nuances citées. Dans ce chapitre on donnera les grandes caractéristiques de ces métaux, les domaines d'utilisation et quelques éléments de leur manipulation en matière d'usinage et d'assemblage.

Les données citées sont issues de compilations fournies par STAINLESS (revendeur de BRUSH WELLMAN) pour les cuivre-béryllium et par TIMET pour le titane.

2 – Le cuivre-béryllium

Il existe deux catégories de cuivre-béryllium: celle constituée par les nuances 25, 190, 290, M25 et 165 et celle constituée par les nuances 3, 10, 174. Ces deux séries diffèrent par le taux en béryllium qui passe de 1.6 à 2 en pourcentage de masse pour la première série et de 0.15 à 0.7 en pourcentage de masse pour la seconde.

La première série, notamment les nuances 25 et M25 (cette dernière contient 0.2 massique % de plomb, ce qui améliore ses propriétés à l'usinage) est vendue sous toutes les formes possibles et est recommandée pour la construction mécanique grâce à sa dureté (45 Rockwell C) et sa résistance à la rupture (au-delà de 1400 N mm²). La deuxième série,

moins performante du point de vue mécanique, est utilisée pour sa bonne conductivité thermique qui peut atteindre 90 % de celle du cuivre, avec des propriétés mécaniques améliorées. Le tableau 1 donne la composition des principaux représentants des deux séries.

Tableau 1- Compositions des différents alliages à base de Cu-Be (d'après document STAINLESS)

Alliage	Désignation AFNOR	Be % m	Co	Nil	Co+Ni	Co+Ni+Fe	Pb
25		1.8-2.0	-	-	0.2 min.	0.60 max	0.02
190	Cu-Be 1.9						max.
290							
M25	Cu-Be1.9 Pb	1.8-2.0	-	-	0.2 min	0.60 max.	0.2-0.6
165	Cu-Be1.7	1.6-1.8	-	-	0.2 min	0.60 max.	-
3	Cu-Ni1.8	0.2-0.6	-	1.4-2.2	-	-	-
10	Cu-Co2Be	0.4-0.7	2.4-2.7	-	-	-	-

On s'attachera plus particulièrement à décrire les caractéristiques et les propriétés de l'alliage 25 dont les propriétés de résistance et de tenue à la corrosion en font un bon alliage pour la construction de matériel devant fonctionner sous haute pression.

2 – 1. Propriétés physiques et chimiques

Les propriétés, acquises par l'association entre cuivre et béryllium, font de cet alliage un bon complément des aciers.

Le coefficient de dilatation ($17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) est comparable à celui des aciers. Ceci est un atout important pour la construction d'enceintes chauffantes avec des parties vissées, des bagues anti-extrusion ou toutes formes de joints.

Le module d'élasticité est de 131 N mm^{-2} , ce qui permet de fabriquer des bagues anti-extrusion grâce à la bonne résistance à la relaxation sous contrainte. La propriété est mesurée sur un feuillard sous contrainte de flexion constante équivalent à 75% de la limite élastique à 0.2% pendant 1000 heures.

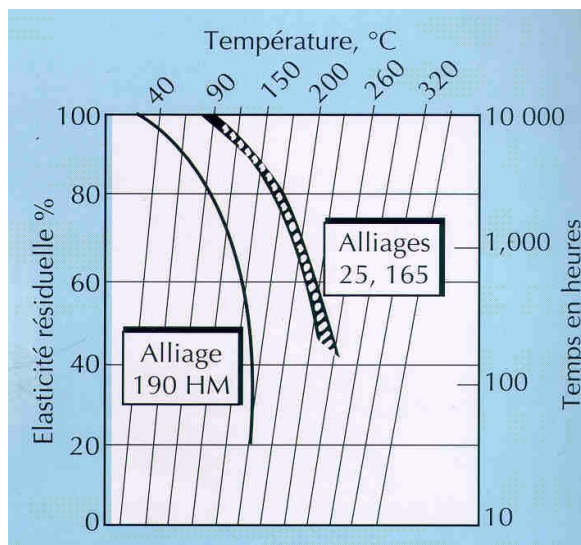


Figure.1 – Elasticité résiduelle des alliages Cu-Be (Document STAINLESS)

Ces propriétés confèrent au Cu-Be 25 une aptitude à diminuer les effets de grippage au niveau des raccords filetés et des alésages.

Contrairement aux inox, il résiste à la corrosion des milieux chlorés, à l'hydrogène et CO_2 . Il est compatible avec la plupart des solvants organiques s'ils ne contiennent pas d'impureté (sulfures, acides). Il résiste aux solutions aqueuses d'hydroxyde à froid et à chaud. *En revanche les cuivre-béryllium ne résistent pas aux solutions ammoniacales.*

Une propriété connue est la bonne tenue à froid (milieux cryogéniques $T < 90 \text{ K}$) car il n'y a pas de transition ductile-fragile. On verra sur le diagramme de phase (Figure 2) que les basses températures tendent à accroître lentement la précipitation du béryllium et la dureté du matériau. En revanche la tenue à chaud est limitée à environ 300°C , température au-delà de laquelle il y a redissolution du béryllium et perte des propriétés mécaniques.

2 – 2. Un peu de chimie

Toutes les propriétés précédentes s'expliquent par la constitution des alliages entre le cuivre et le béryllium. Si l'on observe le diagramme de phase (Figure 2), on constate que vers 870°C , la solubilité de Be est de 2.7 en masse % (phase alpha), alors qu'à la température ordinaire, la solubilité n'est que de 0.2 en masse % (phase alpha + gamma). Ces propriétés constituent la clé du traitement thermique des alliages cuivre-béryllium.

Une trempe à température élevée conserve Cu-Be à l'état mou et ductile. Chauffé à 315°C pendant 2 à 3 heures, le béryllium précipite, la dureté augmente et la résistance devient maximale. Une addition de cobalt à la nuance 25 diminue la taille des grains et améliore l'homogénéité de l'alliage (nuance M25). Il faut noter une contraction de 0.2% des dimensions au cours des opérations de revenu.

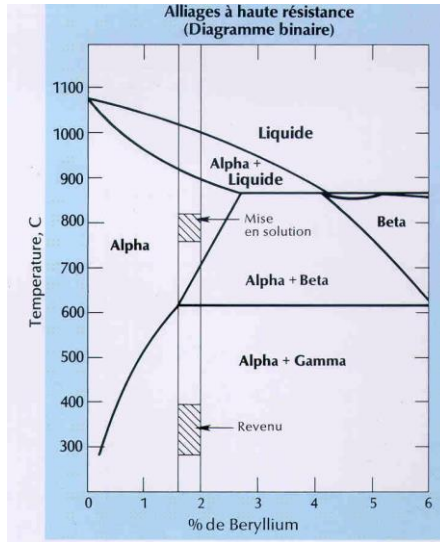


Figure 2 – Diagramme de phase (Document STAINLESS)

La courbe de la Figure 3 présente la limite élastique du Cu-Be 25 suivant les traitements thermiques appliqués.

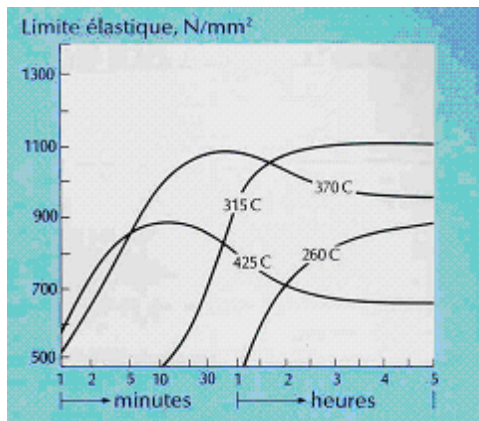


Figure 3 – Courbe limite élastique (Document STAINLESS)

2 – 3. Assemblage de Cu-Be

D'une manière générale, tous les alliages durcissables par précipitation sont brasables et soudables à condition de contrôler la préparation. Dans le cas des cuivre - béryllium, les pièces à souder doivent être traitées par une solution aqueuse avec 20 % en masse d'acide nitrique. Pour évacuer les flux, on utilise une solution de NaOH.

Il faut insister sur la perte des propriétés mécaniques lors du brasage (ou soudage) et la nécessité de recuire l'assemblage pour les récupérer (exemple de la soudure d'un fil sur un passage de courant conique en Cu-Be).

Tous les procédés de soudage sont bons: tungstène *arc inert gas* (TIG) et *metal arc inert gas* (MIG).

2 – 4. Usinage

Les vitesses de coupe sont équivalentes ou supérieures à celles nécessaires pour l'usinage des aciers. Les Cu-Be sont généralement usinés à l'état revenu.

Comme dans tous les matériaux qui s'écaillent, il faut une passe *sous* la zone écrouie, comme dans le cas des Incônels (0.65 à 1.30 mm), avec des vitesses de 275 m mn⁻¹ et une avance de 0.13 à 0.25 m mm⁻¹. L'angle de coupe des outils doit être compris entre 5 et 20 °.

2 – 5. Conditionnement

Le Cu-Be 25 est conditionné sous toutes les formes: barres, plats, ronds... néanmoins les grands diamètres sont difficilement disponibles (supérieurs à 200 mm). Ceci est dû à des problèmes d'homogénéité au cours de l'élaboration.

3 – Le titane

Le titane est encore mal connu des concepteurs d'enceintes haute pression. Il présente cependant des avantages considérables par rapport aux aciers dans certains domaines où la corrosion est limitante. Ceci est dû à l'affinité du titane pour l'oxygène qui, sous la forme TiO₂, forme dans tous les cas un film protecteur. Ce film est immédiatement reconstitué lors d'un choc ou d'une éraflure. Le deuxième atout du titane est sa légèreté, puisque la densité moyenne, selon les nuances, est de 4500 kg m⁻³, soit deux fois moins que les aciers. Si l'on définit la résistance spécifique par le rapport de la charge à la rupture sur la densité, on trouve 221 pour le TA6V, 165 pour le Cu-Be le plus traité, 60 pour l'inox, 88 pour les bases nickel et 160 à 230 pour les aciers suivant leur traitement.

C'est sa légèreté qui, en définitive, fait du titane un matériau économique. De plus, l'ouverture des frontières de l'Est rend le titane disponible et d'un coût stable par comparaison avec le molybdène, le nickel ou le vanadium. L'extraction du métal de son minerai reste coûteuse, mais les différents avantages décrits dans ce chapitre le rendent réellement compétitif. On distingue trois catégories pour le titane: les titanes purs (dont les différentes nuances dépendent de leur teneur en oxygène), les titanes faiblement alliés (Mo, Ru et Ni < 0.5 en masse %) et les titanes alliés (éléments d'alliage < 20 en masse %). On verra, par la suite, à quoi correspondent ces dénominations.

Pour l'application à la haute pression, il n'est pas souhaitable, sauf si l'on se contente de chemiser une enceinte, d'utiliser les titanes de chaudronnerie (titanes purs ou faiblement alliés). Les nuances les mieux adaptées et les moins coûteuses sont surtout le TA6V (6% en masse d'aluminium et 4% en masse de vanadium) et le TA3V2.5 (3% en masse d'aluminium et 2.5% en masse de vanadium). On insistera plus particulièrement sur ces deux nuances.

3 – 1. Propriétés physiques et chimiques

Comme dans le cas des cuivre-béryllium on ne citera que les propriétés qui font l'originalité et l'avantage des titanes par rapport aux autres matériaux métalliques pour des utilisations en haute pression.

Conductivité thermique. Du fait de la plus grande pureté en titane, la conductivité thermique est 50% plus élevée que celle des inox ($16-19 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), soit $18 - 22 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Rappelons que Cu Be 25 peut atteindre $12 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

La masse volumique est de 4510 kg/m^3 .

Les modules d'élasticité en traction (100 GPa), en compression (90 - 97 GPa) et en torsion (45 GPa) sont élevés.

La résistance à la rupture - Elle va de 345 à 480 MPa et la *résistance à l'élongation* de 275 à 350 MPa, ce qui est très élevé et favorable à l'utilisation du titane pour la construction de matériel haute pression.

Le coefficient de dilatation - Il est de $8.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ soit 2 fois plus élevé que pour les aciers ($17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Cette propriété est un réel handicap pour l'assemblage d'un montage appelé à fonctionner à haute température et utilisant des canalisations et des raccords en acier conventionnels. L'application de charges élevées sur le titane nécessite un durcissement thermique, une nitruration, un chromage dur ou tout autre technique de durcissement en surface qui sont tous réalisables sur le titane et qui permettent de contraindre le titane, dans un raccord fileté par exemple.

Corrosion - Comme il a été dit en introduction, grâce à son film protecteur, le titane résiste remarquablement aux agents chlorés et il n'est pas nécessaire, dans les opérations de chaudronnerie, d'envisager de sur-épaisseur contrairement aux aciers. Le diagramme de Pourbaix (Figure 4) prédit la résistance du titane depuis les milieux légèrement réducteurs jusqu'aux milieux fortement oxydants comme l'acide nitrique.

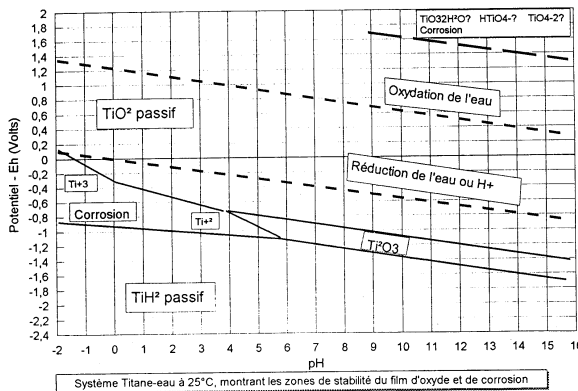


Figure 4 – Diagramme de Pourbaix (document TIMET)

Il résiste aux solutions aqueuses et se trouve désigné pour des essais et études en eau supercritique au-delà de 320°C. Nous l'avons utilisé sans difficulté en eau pure jusqu'à 500°C et 26 MPa au cours d'expériences de plus de 100 heures sans corrosion apparente. Il résiste

également aux milieux alcalins. Enfin, les gaz de toutes sortes: Cl₂, SO₂, NH₃, CO₂, CO, H₂S, HCl, N₂, H₂ et O₂ n'attaquent pas le titane.

En revanche il subirait une corrosion fissurante dans le *méthanol pur*. Il est nécessaire, pour l'usage du méthanol, de le diluer dans l'eau (3% en masse suffit).

Comme les cuivre-béryllium, le titane ne tient pas en continu à de très hautes températures, malgré son point de fusion élevé (1670°C). La valeur de 400°C est une valeur maximum en continu pour le TA6V. Au-delà, on atteint les températures de revenu.

3 – 2. Un peu de chimie

Les différentes nuances de titane sont liées à l'existence d'une transition de phase $\alpha \rightarrow \beta$ à 882 °C. La phase α est *hexagonale*, ce qui est exceptionnel pour un métal pur. La phase β est *cubique centrée*. Les trois nuances citées en introduction se rangent suivant les éléments d'alliage qui favorisent l'appartenance à l'une ou l'autre de ces deux phases. On distingue alors les alphas, les alpha-bétas et les bétas (voir Tableau 2).

Les α sont utilisés pour les basses températures. Ils sont facilement soudables et ductiles. Les alpha-bétas (dont TA6V et TA3V2,5) ont une bonne résistance mécanique et une bonne tenue en température et présentent le meilleur compromis pour la construction d'installations hautes pressions. Les β possèdent les meilleures résistances mécaniques mais ne tiennent pas en température.

Tableau 2 –(D'après H.Sibum, *Advanced Engrn. Mat.*, 2003, 5(6), 393)

nature	exemples	Re (MPa)	Rm (MPa)	A%	remarques
α	Ti-5Al-2.5Sn	830	860	15	
proche α	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	820	890	8	meilleure tenue en température
α/β	Ti-6Al-4V	1030	1100	8	universel
proche β	Ti-10V-2Fe-3Al-	1000	1100	6	travaillable à froid
β	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	965	1000	7	travaillable à chaud
γ	Ti-34Al-1Cr-1Nb-0.25Si	450	520	1	Très bonne tenue à haute température

3 – 3. Usinage

L'usinage des titanes nécessite des *vitesse de coupe faibles* (18 m mn⁻¹ pour des outils HSS à 98 m mn⁻¹ pour des outils carbure) afin de limiter l'échauffement et l'attaque de l'outil par le titane. *Les copeaux de titane sont fortement inflammables (!)*. En revanche, on peut conserver une forte avance de coupe (peu fonction de la température) de 0.1 pour les aciers à 0.40 m.mn⁻¹ pour les carbures. La majorité des nuances de titane a tendance à s'écroûir; la profondeur de passe devra donc se trouver, comme les Cu-Be, au-dessous de la couche d'écroûissage. Il est néanmoins préconisé d'arroser abondamment avec de l'eau à 5% en masse de nitrate.

Il est recommandé de fraiser *en avalant*. Le perçage et le taraudage se font à vitesse faible, de préférence avec des outils carbure (60 m mn⁻¹).

Les techniques d'usinage chimique, par meulage ou par formage sont également pratiquées dans le cas du titane. La seule précaution à prendre est la prévention contre le feu en évitant le stockage des copeaux et en arrosant massivement.

3 – 4. Assemblage du titane

La plupart des nuances de titane sont soudables à cause de la faible teneur générale en éléments d'alliage. Il faut cependant protéger le métal de l'atmosphère à cause de son avidité considérable pour l'oxygène pour former le film protecteur de TiO_2 . Les bains de décapage avant soudure sont constitués de 40% en masse d'acide nitrique et 4% d'acide fluorhydrique. Les métaux d'apport (référence: AWS A5.16-70) sont vendus sous forme de fil.

En revanche le brasage du titane, bien que possible, est déconseillé par la plupart des soudeurs, à cause des possibilités d'alliage pouvant entraîner de manière incontrôlable la modification des propriétés mécaniques du métal et donc de l'assemblage.

4 – Bibliographie

« Les Alliages Cuivre-béryllium » produit par Stainless et Brush Wellman (1995).

« Guide de Conception et de Réalisation des Equipements en Titane » produit par TIMET (1997).