



Novembre 2017

De la physique des gaz à la fabrication des bouteilles de plongée sous-marine 4^{ème} partie : Les bouteilles en aluminium / TS anti corrosion / Qualification ESP.

Avec cette 29^{ème} newsletter nous allons clôturer notre thématique sur la plongée sous-marine en abordant la fabrication des bouteilles de plongée **en aluminium**. Nous en profiterons pour bien différencier les bouteilles en acier et celles en aluminium, essentiellement utilisées dans les eaux chaudes.

Nous achèverons cette newsletter en abordant le sujet des **traitements de surface anticorrosion** et le point associé à la **qualification des produits** par le biais de test d'épreuve hydraulique.

LES BLOCS EN ALUMINIUM (LUXFER).

a) Nuance, traitement de durcissement et caractéristiques mécaniques.

Autrefois fabriquées en France à partir d'un alliage d'aluminium et de magnésium (A-G5 MO7 ou 5283) qui se durcissait par écrouissage, les bouteilles souffraient d'une faiblesse en matière de résistance à la corrosion et principalement à la corrosion sous contrainte surtout en milieu chloruré. Ultérieurement, l'alliage de la série 5000 a été remplacé par un alliage aluminium /magnésium/silicium de la série 6000 (A-SGM - 6351), nettement plus résistant en matière de corrosion sous contrainte. Jusqu'en 1988 compris, la société Luxfer a utilisé un alliage de la même série, le 6351. Depuis 1989, les bouteilles sont fabriquées à partir d'un alliage 6061 durcit par traitement thermique.

Le mode de durcissement des alliages d'aluminium de la famille 6000 (Al-Mn-Si) est différent de celui des aciers qui apporte une élévation de la dureté après la trempe des pièces chauffées vers 840°C. Pour l'aluminium, le traitement thermique de renforcement des propriétés mécaniques comprend également deux opérations. Après un chauffage aux environs de 500 °C, les bouteilles subissent une trempe, en général à l'eau. A la suite de cette trempe, l'alliage est mou et déformable. Il subit ensuite un réchauffé à une température de l'ordre de 200 °C afin d'enclencher des mécanismes de précipitation au sein de la structure métallurgique. Ces transformations structurales durcissent la matière pour lui conférer ses propriétés d'utilisation, on parle d'état T6.

Tableau 3 : Caractéristiques mécaniques d'un alliage 6061 (Al-Mn-Si).

	Limite d'élasticité Rp _{0,2} (MPa)	Charge à rupture Rm (MPa)	Allongement A(%)
6061	280	320	14

Les températures de précipitation des alliages d'aluminium de la famille 6000 étant relativement basses, celles-ci ne supportent pas les élévations de température trop importantes. Les opérations de polymérisation de peinture par cuisson sont à proscrire.



Novembre 2017

Pour information, il existe une ancienne norme française portant sur les « billettes en alliages d'aluminium destinées à la fabrication des bouteilles à gaz sous pression » (NF A 50 101) qui définissait différents nuances d'aluminium utilisés pour les bouteilles de gaz :

- 5013 et 5283 (Al, Mg), qui durcissent par déformation plastique (écrouissage),
- 6082 (Al, Mg, Si), qui durcissent par précipitation,
- 2001 (Al, Cu), qui durcissent également par précipitation.

La résistance mécanique après durcissement de l'alliage 6061 T6 est relativement basse, comme le montre les caractéristiques mécaniques du tableau 3 (< 1/3 de celle de l'acier 35CrMo4). Il est donc nécessaire d'augmenter l'épaisseur des parois des blocs par rapport à ceux en acier (Cf. Tableau 4).

Tableau 4 : Etude comparative entre un bloc aluminium et un bloc acier

Matériaux	Capacité (en litre)	Pression de service (en bar)	Diamètre du fût (en mm)	Longueur (en mm)	Epaisseur du tube (en mm)	Epaisseur du fond (en mm)	Volume d'air (en m3)	Masse (en kg)	Fabricant
Acier	12	200	171	650	4 à 5	6 à 7	2400	12,8	Roth
Aluminium	12,2	232	204	610	12 à 13	17 à 18	2830	16,48	Luxfer

Pour les blocs « similaires » (capacité et pression de service), il est nécessaire de multiplier par un facteur 3 environ les épaisseurs des parois. On s'aperçoit que le bloc aluminium est plus lourd que celui en acier, puisque le rapport des densités n'est que de 2,7. En revanche, vu que son volume est également plus important, la poussée d'Archimède sur une bouteille aluminium sera plus importante, il sera perçu comme moins lourd une fois immergé (diminution du poids apparent). Cela explique, qu'il n'est pas exceptionnel de voir flotter en surface des bouteilles en aluminium, lorsqu'elles sont quasi vides. On parle de flottabilité positive qui est renforcée dans les mers compte tenu d'une teneur en sel plus élevée. On aura tendance à voir davantage de blocs aluminium dans les zones tropicales (mer chaude = combinaison plus fine et à forte salinité = poussée d'Archimède) car sa résistance à la corrosion est supérieure à celle des aciers de construction. Cependant, il ne faut pas oublier que les bouteilles aluminium sont plus sensibles aux chocs.

Remarque : Lorsque l'on veut effectuer une transposition acier / alliage d'aluminium, dans le cas d'équipement sous pression où la contrainte est uniforme sur l'ensemble des parois, il est important de penser au critère de « capacité de résistance » et au critère de « capacité de déformation ».

Equivalence résistance

$$Re_{Acier} * S_{Acier} = Rp_{0,2 Alu} * S_{Alu} \text{ (avec } S \text{ l'aire de la section de l'équipement)}$$

$$S_{Alu} = Re_{Acier} / Rp_{Alu} * S_{Alu} > 3 S_{Acier}$$

Equivalence déformation

$$E_{acier} * S_{acier} = E_{Alu} * S_{Alu} \text{ (avec } E \text{ : le module d'Young)}$$

$$\text{Donc } S_{acier} : 210\ 000 / 70\ 000 S_{Alu} = 3 S_{Alu}$$



Novembre 2017

b) Focus sur les blocs filés

Il s'agit du 3^{ème} procédé listé qui consiste à mettre en forme à froid des billettes d'aluminium à l'aide d'une presse de 2 000 tonnes. Ce procédé conduit à des bouteilles dont le fond est sensiblement plus épais que ceux obtenus à partir de tôle. Les cols sont finalisés par fluotournage à chaud ou à froid.

Les billettes sont obtenues en tronçonnant une barre. Le cylindre froid est forgé en une seule opération. A la sortie, le produit mis en forme est très chaud compte tenu des taux de déformation extrêmement importants mis en jeu avec ce procédé. Dans une deuxième opération, le col est forgé à l'aide d'une presse, en une seule fois.

FIN DE L'EXPLORATION : retour à la surface et à la qualification des blocs.**a) Protection anticorrosion.**

Si la couleur des bouteilles est une question de look et d'identification commerciale, les revêtements utilisés ont tout de même comme fonction première de protéger les blocs contre la corrosion. En corrosion marine, les protections galvaniques à base de zinc sont majoritairement utilisées, puisque cet élément est « électrochimiquement parlant » moins noble que l'acier. Le revêtement à base de zinc se comportera donc comme une anode sacrificielle qui se dissoudra lentement en présence d'un électrolyte, condition sine qua non pour qu'un courant de corrosion puisse être généré. On utilise les alliages 85%Zn-15%Al plus résistants en milieu marin qu'un dépôt de zinc pur.

C'est une des raisons pour lesquelles on recouvre le revêtement de zinc – aluminium plus résistant d'une peinture d'apprêt. Il s'agit d'une peinture type polyuréthane bi-composants (avec durcisseur), cuite au four, qui complète donc la protection. Lors d'un éclat de peinture, un phénomène de pile va s'instaurer et le zinc environnant commencera à se dissoudre lentement et non pas l'acier.

Anciennement réalisé par galvanisation (bain de zinc fondu), le revêtement à base de zinc est réalisé par projection thermique au fil soit à la flamme, soit à l'arc électrique. Avant cette étape, une opération de grenailage sera nécessaire afin de nettoyer la surface extérieure de la bouteille des traces d'oxydation consécutives au traitement thermique et d'activer la surface, créant une légère rugosité favorable à l'accrochage du zinc projeté.

L'épaisseur déposée varie entre 80 et 120 microns. En revanche, les surfaces intérieures des bouteilles ne sont pas revêtues, certaines peuvent être huilées. Pour ce qui concerne les bouteilles en aluminium, elles seront juste peintes.

b) Qualification et requalification d'équipement sous pression.

Pour qualifier un équipement sous pression, on réalise des épreuves hydrauliques. La bouteille est remplie d'eau et placée dans une zone sécurisée (blindée). On soumet le bloc à une pression allant jusqu'à une fois et demi la pression de service (soit 300 bars pour une bouteille utilisée à 200 bar). Cette pression est maintenue pendant quelques minutes et on observe si celle-ci évolue ou pas. Ce



Novembre 2017

contrôle non destructif peut être associé à un système de détection de fissuration par émission acoustique puisque l'amorçage d'une fissure et sa propagation générera un signal qu'il sera possible de détecter à l'aide d'un capteur piézo-électrique.

L'Arrêté du 15 mars 2000 relatif à l'exploitation des équipements sous pression (revue le 7 avril 2017) traite entre autre des points relatifs aux inspections périodiques et aux requalifications périodiques.

Pour chacun de ces items, des spécificités existent pour les bouteilles de plongée :

« L'inspection périodique a pour objet de vérifier que l'état de l'équipement sous pression lui permet d'être maintenu en service avec un niveau de sécurité compatible avec les conditions d'exploitation prévisibles. Elle est de douze mois pour les bouteilles pour appareils respiratoires utilisées pour la plongée subaquatique ainsi que pour les récipients mobiles en matériaux autres que métalliques, sauf si ces derniers font l'objet d'essais de contrôle du vieillissement en service réalisés conformément à un cahier des charges approuvé par le ministre chargé de la sécurité industrielle, après avis de la Commission centrale des appareils à pression, auquel cas l'intervalle entre deux inspections périodiques est porté au plus à quarante mois. »

« L'intervalle maximal entre deux requalifications périodiques est fixé à :

- deux ans pour les bouteilles pour appareils respiratoires utilisées pour la plongée subaquatique ainsi que pour les récipients mobiles en matériaux autres que métalliques.
- cinq ans pour les bouteilles pour appareils respiratoires utilisées pour la plongée subaquatique dont l'inspection périodique a été effectuée au moins annuellement dans les conditions définies par la circulaire TIV 864-1 de la Fédération française d'études et de sports sous-marins, par la circulaire 595/A du Syndicat national des entrepreneurs de travaux immergés ou par une décision du ministre chargé de la sécurité industrielle prise après avis de la Commission centrale des appareils à pression ainsi que pour les récipients mobiles en matériaux autres que métalliques ayant fait l'objet des essais de contrôle du vieillissement mentionnés. »

La mise en place de cette réglementation a fait chuter de façon spectaculaire les accidents de type explosion de bouteilles. Pour plus d'informations, vous pouvez vous contacter le Syndicat de la chaudronnerie, tuyauterie et maintenance Industrielle.

Cet article technico-pédagogique à l'image de ce que nous avons déjà écrit sur la Haute Horlogerie, le Design ou la Pétanque nous permet de comprendre l'importance de la métallurgie dans la fabrication de composants aussi bien pour faciliter sa mise en forme que pour lui apporter ses propriétés de fonctionnement.

Dans ce texte, les rappels sur la physique des gaz a permis de comprendre ou rappeler les quelques lois élémentaires régissant les gaz que l'on soit en plongée sous-marine ou face à un procédé métallurgiques sous pression ou utilisant des gaz (neutres ou actifs). Il a également montré les 3 grandes technologies de mise en forme pour la fabrication de blocs en acier mais également en aluminium pour ceux qui ont la chance de plonger sous les tropiques....

**Novembre 2017**

Pour conclure, il est important de souligner l'existence de blocs composite en aluminium, renforcé par un épais bobinage de carbone et de fibre de verre imprégné, puis ré-enduit de résine époxy. On parle de bouteille « carbone ». Cette association permet une diminution de l'épaisseur de la partie métallique et une baisse du poids (30 %). Le carbone assure une résistance du bloc pouvant être gonflé jusqu'à 345 bars, tout en n'imposant aucune contrainte législative supérieure à celle des blocs aciers.

Rendez-vous en 2019 pour notre 30^{ème} newsletter sur l'apport de la fabrication additive et une application appliquée au monde de la fonderie. D'ici là, bonne fin d'année !