

COMMENTAIRE DES DIAPOSITIVES SUR LA
CORROSION DES BOUTEILLES DE PLONGEE.

Introduction.

Ce diaporama a été réalisé par Jean-Pierre MONTAGNON, Instructeur National. Il a pour but de présenter les différents aspects de la corrosion que l'on peut rencontrer dans les bouteilles de plongée. Ce diaporama n'est pas exhaustif et nous serons sans doute amenés à le compléter.

Diapositive n°1.

Voici ce qui peut se produire lorsque des produits abrasifs, sable, sel, sont emprisonnés entre le culot et la bouteille. Ceux-ci provoquent l'abrasion de la peinture puis l'abrasion et la dissolution de la couche de zinc qui protégeait l'acier. L'acier, sans protection galvanique, plongé dans l'eau de mer se corrode à très grande vitesse. La profondeur de cette corrosion a provoqué le rejet de la bouteille à l'examen visuel préalable à la réépreuve. D'où la nécessité de rincer cette partie, si possible, après chaque plongée et de déshabiller complètement chaque bouteille avant de pratiquer l'inspection visuelle.

Diapositive n°2.

Si l'on coupe une bouteille en deux dans le sens de la longueur, afin de comparer l'épaisseur des différentes parties, on remarque que l'ogive et le fond sont nettement plus épais que la paroi du tube. Ces différences ne sont pas les mêmes pour toutes les fabrications.

Diapositive n°3.

Les bouteilles de plongée en acier ont toutes des fonds convexes, mais l'épaisseur de ces fonds varie suivant les fabrications. Les deux échantillons de gauche sont des bouteilles de 12 litres fabriquées en France, la première par ROTH, la deuxième par VALLOUREC ANZIN. Les échantillons de droite ont été prélevés dans des bouteilles fabriquées à l'étranger, celui du haut dans une bouteille de 15 litres FABER (Italie), les deux dernières dans des bouteilles de 12 litres et de 4 litres I.W.K.A. (R.F.A.).

La législation française impose, pour des bouteilles forgées à partir d'un tube sans soudure, que l'épaisseur du fond soit au moins égale à 1,5 fois l'épaisseur de la paroi du tube. On constate que les bouteilles fabriquées en France répondent largement à cette exigence car l'épaisseur du fond de ces bouteilles est de 2 à 2,5 fois l'épaisseur de la paroi du tube.

Par contre, les bouteilles fabriquées à l'étranger par emboutissage et filage à partir d'une plaque, ne sont pas soumises à cette obligation de surépaisseur. D'autre part, ces bouteilles étant conformes à la législation en vigueur dans leur pays d'origine, elles sont admises à pénétrer sur le marché français après accord du Service des Mines.

Dans le cas d'une bouteille forgée à partir d'un tube, on peut admettre que le procédé de mise en forme puisse induire dans le fond de la bouteille des défauts, d'où l'intérêt d'une épaisseur plus grande, dont le but serait de compenser une perte de résistance due à la présence éventuelle de ces défauts.

Par contre, on conçoit également que lorsque la bouteille est fabriquée par emboutissage d'une plaque, il n'y a aucune raison pour qu'il y ait plus de défauts dans le fond que dans le corps de la bouteille.

Cette différence est parfaitement justifiée si on ne s'en tient qu'à la fabrication.

Examinons maintenant ce qui se passe à l'utilisation.

Lorsqu'on pratique les inspections endoscopiques, on remarque généralement que la corrosion est plus importante au fond des bouteilles que sur les parois. La raison est que les bouteilles sont stockées debout et que l'eau qui a pu y pénétrer se rassemble au fond.

C'est pourquoi on peut penser qu'une surépaisseur du fond est un facteur de sécurité, et que la conclusion de l'inspection endoscopique sera nuancée en fonction de l'épaisseur initiale du fond et donc du mode de fabrication.

Diapositive n°4.

Examinons les différents aspects que l'on peut rencontrer à l'intérieur des bouteilles.

Si l'on fait abstraction des piqûres que l'on voit sur le contour, la zone centrale grise et brillante est caractéristique de l'éclat métallique d'une bouteille en bon état.

Diapositive n°5.

Si l'on examine cette zone centrale à l'aide d'un microscope, on remarque que l'acier est à nu, non corrodé, cette zone est en parfait état.

Les ondulations que l'on observe sont dues au procédé de mise en forme et ne sont absolument pas préjudiciables. La rugosité est due au mode de forgeage et au grenaillage qui a suivi.

Diapositive n°6.

La coloration brune de la surface montre que celle-ci est oxydée, mais elle a gardé l'aspect brillant caractéristique de l'éclat métallique. Le film d'oxyde est parfaitement adhérent. C'est une oxydation superficielle uniforme (critère N°1).

Diapositive n°7.

Vue au microscope d'une oxydation superficielle uniforme. On remarque également des boursouflures. Ces boursouflures sont des produits de corrosion qui cachent des piqûres locales.

Lorsque ces piqûres sont réparties sur l'oxydation superficielle uniforme, cela correspond au critère N°2.

Si ces piqûres sont alignées sur une génératrice du tube, c'est à dire dans le sens de la longueur du tube, on les appelle "piqûres en lignes" (critère N°3).

Diapositive n°8.

Si les piqûres se concentrent dans certaines zones, on aboutit à l'aspect suivant.

Diapositive n°9.

Si on regarde de plus près ces piqûres, on remarque qu'elles sont très rapprochées. Ceci conduit à les assimiler à un défaut équivalent qui est l'enveloppe de toutes ces piqûres. Ce défaut équivalent atteint une taille relativement importante qui peut rendre la bouteille dangereuse.

C'est pourquoi les bouteilles qui présentent ce type de défauts sont réformées. La sévérité de la décision peut-être modulée en fonction du Type de fond (épais ou mince). Si les piqûres ne sont rassemblées que dans la partie centrale d'un fond épais, un sursis peut être accordé à deux conditions:

- vérifier l'épaisseur résiduelle au minimesureur à ultrasons, la profondeur des piqûres doit être inférieure à 10% de l'épaisseur initiale.
- aucune piqûre n'existe dans la zone de raccordement fond-tube.

Diapositive n°10.

Lorsqu'on gratte les boursouflures pour enlever les produits de corrosion, on voit en effet qu'elles cachent des trous.

Diapositive n°11.

Voici l'échelle donnant la taille de l'enveloppe de ces défauts qui atteint 2 cm de longueur.

Diapositive n°12.

Lorsque la corrosion se généralise, on rencontre l'aspect suivant. L'intérieur se recouvre d'oxyde pulvérulent d'aspect mat. La surface n'a plus du tout l'aspect métallique. Une grande quantité de produits de corrosion tombe dans le fond de la bouteille et on peut les recueillir en retournant cette bouteille.

Diapositive n°13.

Lorsqu'on enlève les produits pulvérulents et que l'on regarde au microscope, on voit que le métal a développé une grande quantité de boursouflures.

Diapositive n°14.

Après grenaillage de la surface pour enlever les produits de corrosion adhérents, on voit apparaître les piqûres dont la profondeur est comprise entre 2 et 2,5 mm pour une épaisseur initiale du fond de 4,5 mm. L'épaisseur résiduelle est donc très faible et rend la bouteille dangereuse.

Diapositive n°15.

Vue agrandie de l'une de ces cavités qui met en évidence la forme hémisphérique de ce type de défauts.

Diapositive n°16.

Si l'on effectue une coupe micrographique et que l'on examine la cavité dans le sens de l'épaisseur de la paroi, on voit que la profondeur est importante et que la géométrie présente des parties très aiguës. Ces défauts aigus se chargent d'humidité à la remise en service et sont à nouveau le siège de phénomènes de corrosion par aération différentielle. C'est pourquoi lorsqu'une bouteille présente des piqûres, même petites, le processus de corrosion redémarre irrémédiablement sur celles-ci. Notons également que ces zones très aiguës peuvent donner naissance à des fissures de fatigue.

Diapositive n°17.

Ces défauts peuvent même traverser la paroi et provoquer une fuite. C'est ce qui s'est passé pour cette bouteille de 4 litres qui totalise deux ans et demi de service.

On peut à ce sujet faire la remarque suivante : les propriétés mécaniques du matériau permettent l'existence d'un défaut de dimension au mois égale à l'épaisseur. Si ce défaut isolé existe, il provoque une fuite décelable sans risque d'explosion, d'où l'importance du critère de proximité défini dans la procédure d'inspection.

Diapositive n°18.

La robinetterie, fabriquée en laiton, constitue avec le corps de la bouteille, un couple électrochimique dont l'acier est l'anode. Une corrosion très intense peut se développer à proximité de ce couple et même détruire totalement le filetage. Pour y remédier, graisser soigneusement les filetages, à l'aide de graisse "LG" au disulfure de molybdène (préconisée par Spirotechnique) avant de remonter, et serrer modérément la robinetterie sur la bouteille (couple de serrage : 5 0 N.m).

Diapositive n°19.

Lorsque la corrosion se généralise, la taille des défauts devient si grande qu'ils sont jointifs et forment des chancres.

Diapositive n°20.

Par exemple, ces deux cavités ne forment plus qu'un seul défaut de grande taille.

Diapositive n°21.

On voit ici l'échelle des défauts, chaque trou faisant en moyenne 5 mm de diamètre, leur juxtaposition conduit à un défaut d'une taille supérieure à la taille critique au delà de laquelle il y a instabilité et risque d'explosion.

Diapositive n°22.

C'est ce qui s'est passé pour cette bouteille dont vous voyez un morceau ici.

En résumé, la généralisation des piqûres forme des chancres, la multiplication de ces chancres proches les uns des autres peut provoquer l'explosion. Il ne faut donc pas négliger la présence de piqûres, même petites. Une piqûre préexistante sera toujours le siège d'une nouvelle corrosion à la remise en service.

On remarque, que grâce à l'inspection visuelle, on peut mettre en évidence ce type de défauts. quelquefois, l'inspection nécessite un grenailage pour enlever les produits de corrosion qui masquent les défauts. Mais qu'il y ait grenailage ou non, l'inspection visuelle permet d'écarter les bouteilles rendues dangereuses par la corrosion.

Diapositive n°23.

Voici un autre aspect de la corrosion. Elle se développe sous forme de plaques d'oxyde qui se détachent de la paroi. On remarque que cette corrosion n'intéresse qu'une partie seulement de la surface, le reste paraissant parfaitement sain. Cette corrosion correspond au critère N°4.

Diapositive n°24.

Sur cette vue, on met en évidence les endroits où les plaques d'oxyde sont tombées.

Diapositive n°25.

La corrosion est plus profonde que la couche d'oxyde qui se détache, le matériau sous-jacent est poreux. On peut à l'aide d'un minimesureur par ultrasons déterminer l'épaisseur saine et déduire la profondeur de l'atteinte. Ce type de corrosion, conduit au rejet de la bouteille.

Diapositive n°26.

Voici le critère N°5 qui correspond à la généralisation de la corrosion en plaques dont vous voyez ici une vue rapprochée.

Diapositive n°27.

Quelques mots des revêtements intérieurs.

Les propriétés mécaniques et physiques des résines servant à fabriquer ces revêtements sont peu compatibles avec cette utilisation.

en effet, ces matériaux :

- ne sont pas complètement étanches à l'humidité,
- laissent passer l'air pendant la période de stockage sous pression ce qui nécessite de l'éliminer lorsque la pression baisse. L'air emprisonné provoque le décollement du revêtement dont l'adhérence sur l'acier n'est déjà pas très bonne par nature.
- ont un coefficient de dilatation et un module d'élasticité différents de ceux de l'acier.
- leur plasticité diminue avec le vieillissement.

Ces revêtements, de part leurs propriétés, n'empêchent nullement la corrosion de se développer, et de plus, lorsqu'ils sont opaques, nuisent au dépistage de cette corrosion.

En conclusion, lorsqu'une bouteille est garnie intérieurement d'un revêtement opaque, il est extrêmement délicat d'apprécier son état. Si le revêtement est parfaitement adhérent, on peut supposer qu'il n'y a pas de corrosion. Par contre, si le revêtement présente des boursouflures, il y a presque toujours une corrosion sous-jacente comme dans cette bouteille.

Diapositive n°28.

Cette boursoufflure d'environ 1 cm carré de surface était isolée, le revêtement ne présentant aucune rupture. Pourtant, le retrait du revêtement a mis à jour une corrosion très importante.

Enfin, vous savez qu'il est nécessaire d'enlever le revêtement intérieur avant de faire pratiquer la réépreuve. Cette opération délicate peut endommager la bouteille et c'est pourquoi les fabricants ont abandonné ce type de revêtement.

On rencontre actuellement des vernis transparents déposés après phosphatage de la surface. Ces vernis sont plus faciles à détruire, en général un simple grenaillage suffit, ce qui est moins préjudiciable qu'une attaque chimique ou qu'un craquage thermique. De plus, ils ne masquent pas la corrosion.

Diapositive n°29.

Voici un repli de forgeage rencontré dans une bouteille qui a servi pendant 17 ans. Ceci montre que de tels défauts ne sont, à l'évidence, pas dangereux et que le matériau tolère la présence éventuelle de défauts de ce type.

Le principal ennemi est donc la corrosion, souvent engendrée par de mauvaises manipulations ou par défaut d'entretien. Il est très important de surveiller périodiquement l'état des bouteilles. La détection précoce d'une entrée d'eau ou d'un début de corrosion interne est le seul moyen de lutter efficacement contre le risque d'endommagement irréversible.

Diapositive n°30.

Les bouteilles P.A. sont fabriquées soit en acier ordinaire A 56 TU non destiné aux traitements thermiques soit, plus récemment, en acier TU XC 35 de caractéristiques mécaniques équivalentes mais de propriété métallurgique meilleure. En fin de fabrication, elles ont subi un recuit de normalisation qui leur confère une structure micrographique particulière appelée structure en bandes. Cette structure présente des hétérogénéités de composition qui rend particulièrement sensible à la corrosion cet acier déjà très sensible par nature.

Ces bouteilles, lorsqu'elles sont mal entretenues, sont particulièrement dangereuses et il est indispensable, comme pour les bouteilles de plongée, de les visiter chaque année. Ne pas hésiter à les remplacer en cas de doute. Il est souhaitable de remplacer toutes les anciennes bouteilles P.A. à filetage conique par les nouvelles à filetage cylindrique, ce qui facilite les interventions (couple de serrage : 30 N.m).

Diapositive n°31.

Vous avez sur cette diapositive les deux moitiés d'une même bouteille avant et après grenaillage. On remarque que les piqûres sont de dimensions très importantes, environ 5 mm

de diamètre et 1,5 à 2 mm de profondeur. L'épaisseur résiduelle est très faible, cette bouteille est extrêmement dangereuse.

Diapositive n°32.

Voici une autre bouteille P.A. très dangereuse.

Diapositive n°33.

On remarque sur cette bouteille, près de l'ogive, un chancre de 2 cm de long. Si cette bouteille avait été chargée, elle aurait sans doute explosé.

Une précision, ces trois bouteilles P.A. sont âgées de deux ans et demi.

Conclusion.

La résistance à la corrosion des bouteilles de plongée laisse à désirer. Malheureusement, la législation ne prévoit pas d'aptitude particulière ni de tests d'évaluation de résistance à la corrosion.

L'utilisation d'un matériau plus noble, pour une fabrication aussi marginale, engendrerait un coût supplémentaire élevé et conduirait à un prix de vente prohibitif.

On peut augmenter considérablement la durée de vie des bouteilles de plongée par une utilisation soigneuse et attentive. Il faut intervenir sans délai en cas d'entrée accidentelle d'eau de mer dans la bouteille car en présence d'eau de mer, la vitesse de corrosion est dix fois plus grande que la vitesse de corrosion due à l'humidité de condensation. Il est très important de purger soigneusement la robinetterie avant de charger une bouteille.

Une simple inspection visuelle annuelle (6 mois en milieu tropical) permet:

- de déceler les bouteilles rendues dangereuses par une corrosion accidentelle,
- de nettoyer, rincer, sécher et huiler l'intérieur et d'éviter que l'accumulation d'eau ne provoque des dégâts irréversibles. Il est préférable d'effectuer la visite après une période d'utilisation intense ou en eau de mer et avant la période de stockage ou d'hivernage.

Rappelez-vous la règle des 100 jours:

En présence d'un verre d'eau de mer, il ne faut que 100 jours, soit environ 3 mois, pour rendre une bouteille dangereuse.