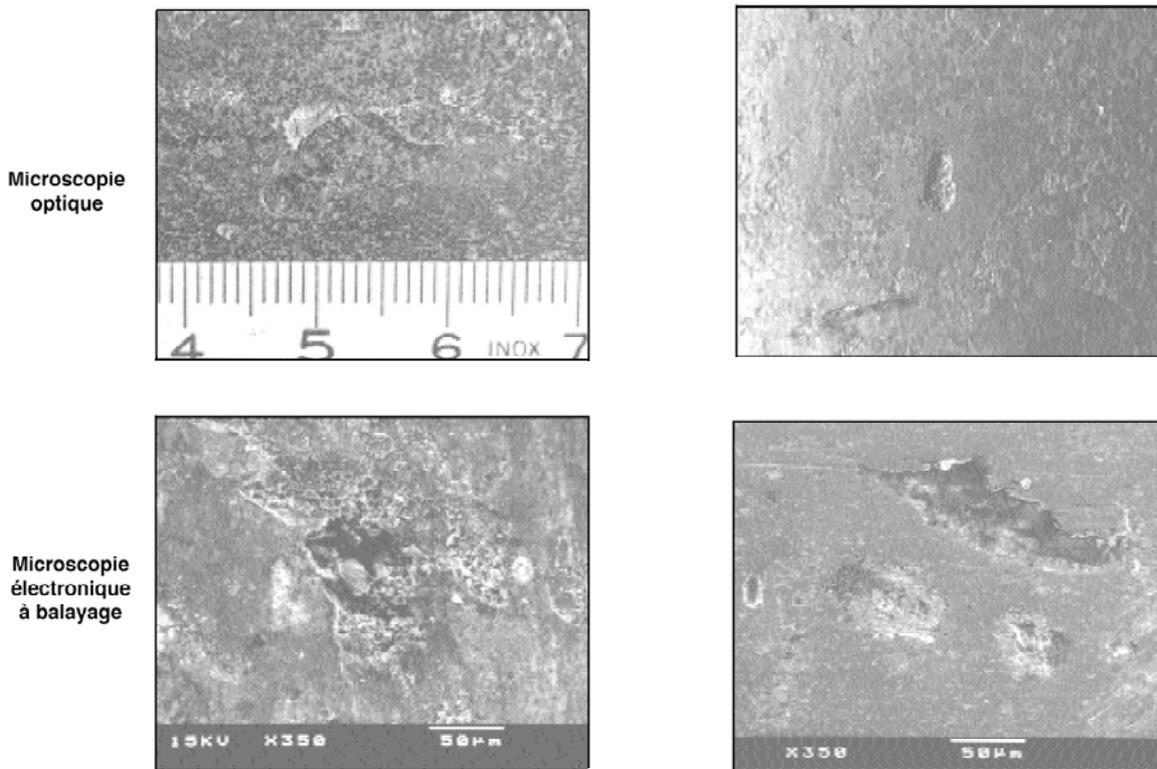


La réépreuve des bouteilles de plongée
objectifs et limites

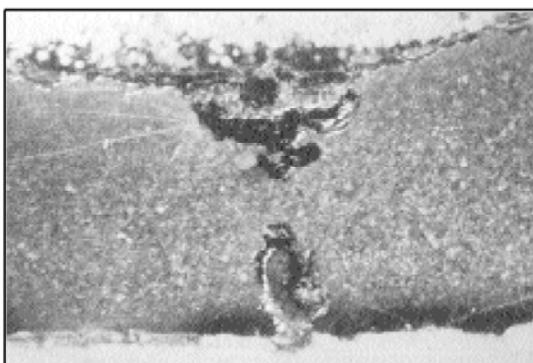
Exemples de défauts de surface trouvés sur la paroi intérieure de tubes ou de bouteilles de plongée



J.P. MONTAGNON - FFESSM

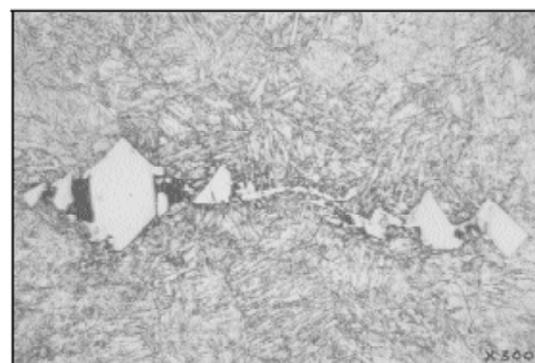
Figure 1

Défauts internes trouvés dans des bouteilles de plongée



Défaut macroscopique

La coupe micrographique perpendiculaire à la paroi de la bouteille montre une cavité provoquée par la corrosion et qui a entraîné une fuite.



Défaut microscopique

Inclusion exogène d'oxyde de zirconium dure et fragile, qui se fragmente au laminage et peut provoquer une amorce de rupture.

Figure 2

La réépreuve des bouteilles de plongée

AVERTISSEMENT

Les notions, uniquement qualitatives, exposées dans ce chapitre visent à montrer à quoi sert la réépreuve des bouteilles de plongée. Elles n'ont pas pour objectif d'aborder des notions quantitatives. Que les puristes pardonnent une simplification volontaire qui n'a pour objectif que de donner aux TIV la possibilité de comprendre en quoi la réépreuve des bouteilles est utile et quelles sont ses limites.

LES TESTS INITIAUX

L'épreuve initiale est un test pratiqué sur toutes les bouteilles qui sortent de fabrication. Elle vise à vérifier l'absence de défauts de fabrication pouvant provoquer sa rupture. Elle vient en complément d'autres tests qui sont réalisés sur des bouteilles prélevées dans les lots. Parmi ces tests statistiques, on note l'essai de surpression qui consiste à charger une bouteille à une pression de deux fois la pression de service. La bouteille ne doit subir ni déformation ni rupture à cette pression. Un autre essai remarquable est l'essai de pulsation qui consiste à cycler la bouteille en pression (hydraulique) entre la pression d'épreuve et une pression résiduelle de 1/10 de la pression d'épreuve soit entre 300 et 30 bar, à raison de 3 à 6 cycles par minute. La bouteille soumise à ces sollicitations doit supporter au moins 11000 cycles sans fuite ni rupture. Une rupture peut intervenir au delà de 11000 cycles à condition que celle-ci ne conduise pas à la fragmentation de la bouteille.

Ces différents essais ont pour objectif de vérifier la présence éventuelle de défauts pouvant avoir soit des conséquences immédiates, soit des conséquences à long terme.

Une conséquence immédiate serait bien sûr l'explosion de la bouteille, une conséquence à long terme serait l'apparition de fissures qui se propageraient pouvant provoquer soit une fuite à travers la paroi, soit une rupture.

PRÉEXISTANCE DE DÉFAUTS

Malgré tous les tests réalisés, tous les contrôles effectués (voir chapitre fabrication), c'est une réalité industrielle, il existe des défauts.

Quelle est la nature de ces défauts préexistants ?

— Les défauts de surface. Ces défauts résultent des différentes opérations de mise en forme. Au cours des déformations de l'alliage des plaques de calamine peuvent se

Notion d'endommagement en fatigue

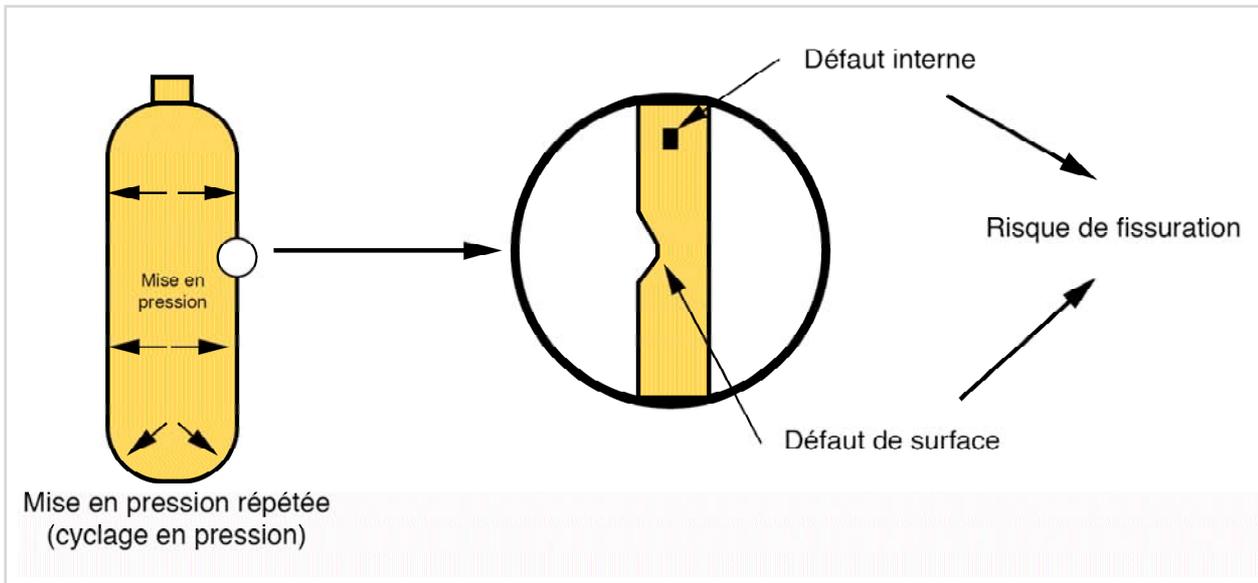


Figure 3

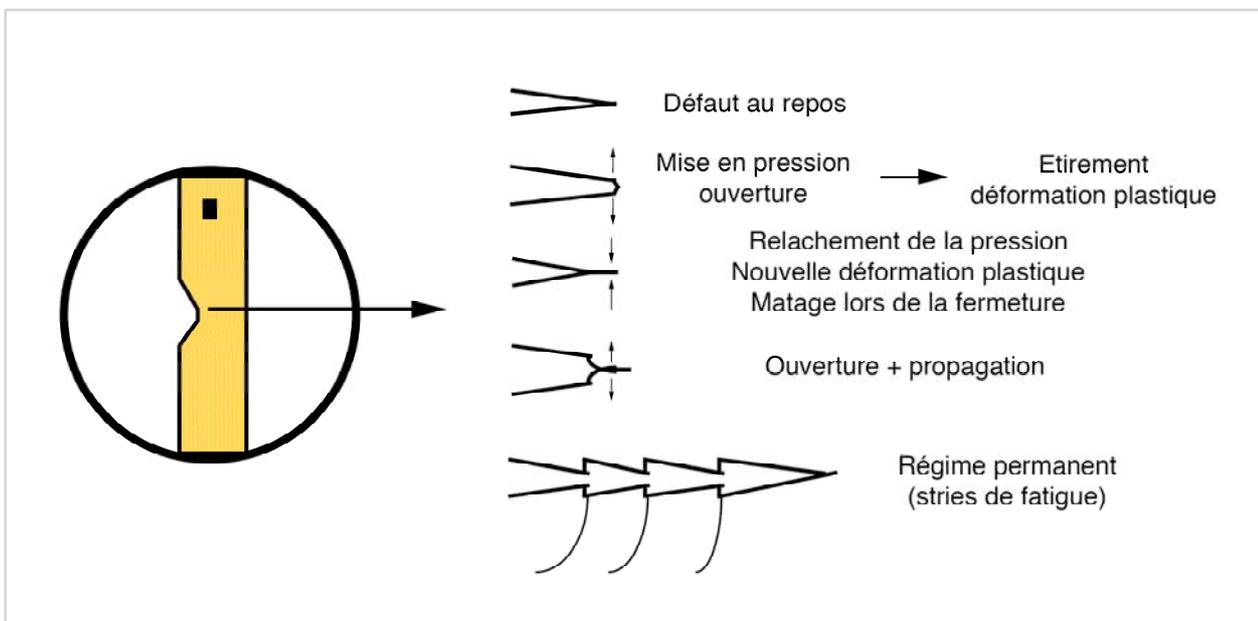


Figure 4

trouver emprisonnées sous des replis de métal sein. Très rapidement, après quelques gonflages, des “écailles” de métal se détachent laissant des trous à la surface. La figure 1 montre ces types de défauts examinés en microscopie optique puis en microscopie électronique.

— Les défauts internes. Ces défauts peuvent prendre la forme d'inclusions d'oxydes. La figure 2 montre une inclusion de zircone (oxyde de zirconium) utilisée dans la fabrication des réfractaires de fours. Ces inclusions dures et fragiles se fragmentent lors des opérations de mise en forme du matériau et donnent naissance à des défauts internes.

S'ajoutent à ces défauts préexistants, tous les défauts de surface pouvant apparaître au cours de la vie de la bouteille, comme les piqûres de corrosion.

Que deviennent ces défauts préexistants ? Sont-ils susceptibles d'évoluer et dans quelle mesure leur évolution peut mettre en péril la sécurité de l'appareil ?

NOTION D'ENDOMMAGEMENT EN FATIGUE

En présence d'un défaut dans le matériau, une sollicitation répétée peut provoquer l'apparition puis la propagation d'une fissure par un phénomène appelé fatigue (figure 3).

Lorsqu'une structure est sollicitée mécaniquement, la contrainte, comme la pression est le rapport de la force sur la surface. Si la structure est simple, la contrainte est uniformément répartie. Si la structure comporte des zones géométriques aiguës, la contrainte n'est plus uniforme et il apparaît sur l'extrémité de ces zones aiguës des concentrations de contraintes. Alors que la contrainte moyenne dans le matériaux est faible, localement la contrainte devient élevée. Plus la géométrie est aiguë, plus la contrainte locale est élevée. Pour une géométrie très aiguë, on peut aboutir localement à une contrainte suffisamment élevée pour qu'elle produise localement la déformation plastique du matériau. Que se passe-t-il alors ?

Pour comprendre ce qui va suivre,, imaginez que vous preniez un morceau de fil de fer et que vous le tordiez de nombreuses fois au même endroit. Plus vous tordez le fil de fer plus celui-ci devient dur et à un certain moment, il casse. Il casse car vous avez utilisé toute la déformation plastique possible (on dit tout son allongement) et une déformation supplémentaire conduit à la rupture.

Transposons ce phénomène sur un défaut préexistant dans le matériau (figure 4). Au chargement, dans la zone aiguë du défaut, la contrainte, du fait de la concentration de contrainte, dépasse localement la valeur limite au delà de laquelle commence la déformation plastique, le matériau s'étire, se déforme plastiquement. Lorsque la contrainte redescend, le matériau tend à revenir à sa forme initiale mais comme il a été étiré lors de la phase précédente, il ne peut pas et se déforme en sens inverse. Ce processus

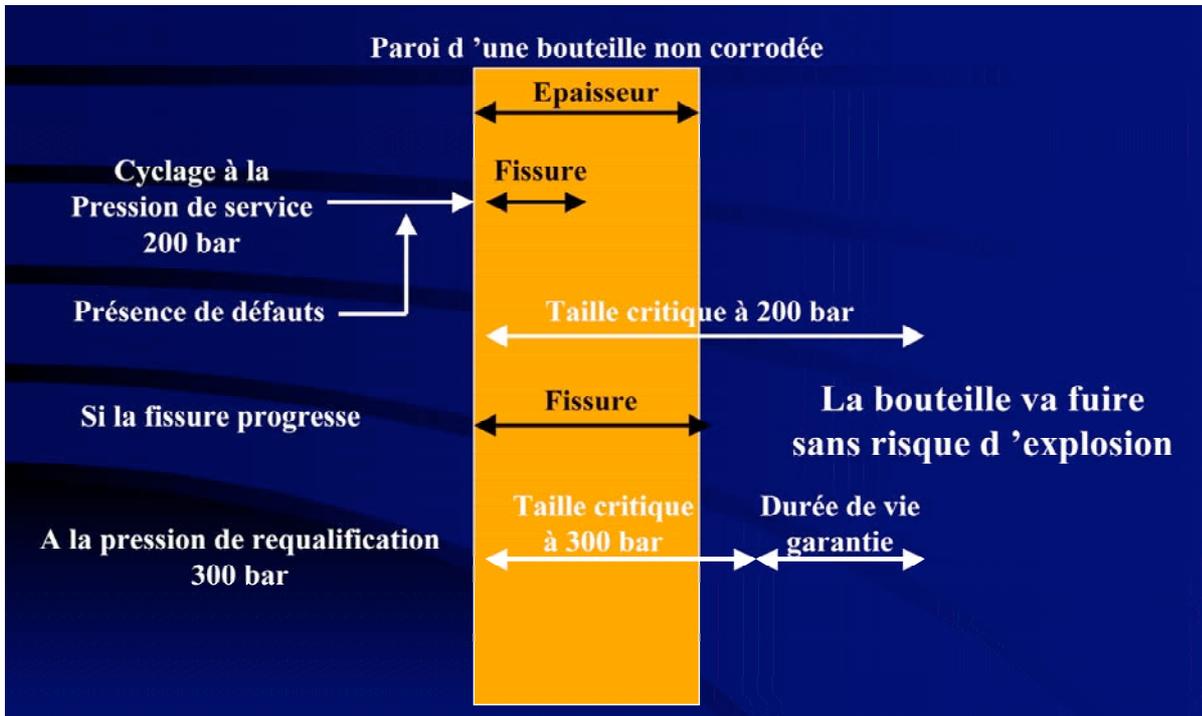


Figure 5

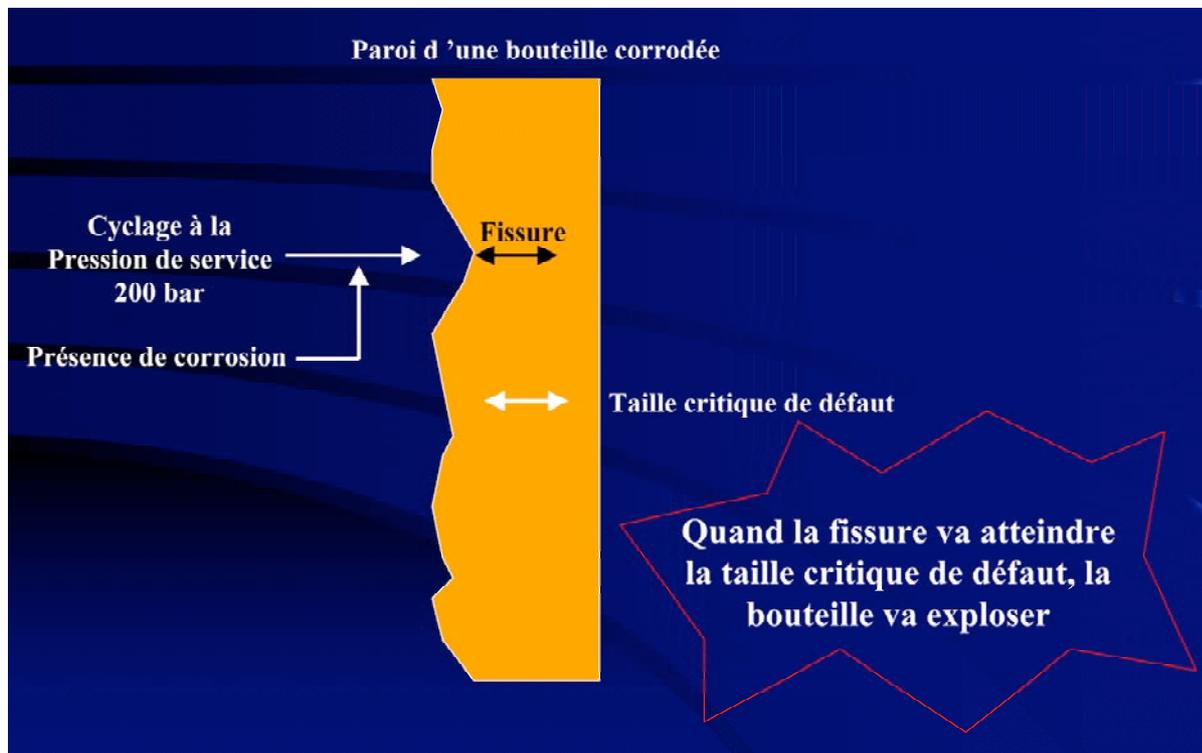


Figure 6

se répète à chaque cycle chargement/déchargement et finalement le matériau casse localement, une fissure prend naissance.

Lorsque ce phénomène d'initiation qui peut être très long, a eu lieu, une fissure existe et sa vitesse de propagation dépend de nombreux paramètres, comme sa géométrie, la contrainte appliquée, la résistance du métal. Notons que la phase d'initiation peut ne jamais avoir lieu.

Si cette phase d'initiation a bien eu lieu, une fissure existe et il devient impératif de savoir à partir de quelle longueur elle devient dangereuse. Une fissure devient dangereuse lorsque qu'elle se propage brutalement, entraînant la rupture brutale de l'appareil. Or, la résistance d'un matériau métallique à la propagation brutale d'une fissure est une de ses caractéristiques mécaniques. Connaissant cette propriété mécanique, on peut calculer quelle est la taille critique d'un défaut susceptible de provoquer la rupture pour une contrainte donnée (explosion de la bouteille).

A titre d'exemple, la taille critique de défaut pour l'acier 35 CD 4 utilisé pour la fabrication des bouteilles est de 14,3 mm pour une contrainte correspondant à la pression de 200 bar (figure 5). On remarque que la taille critique de défaut est supérieure à l'épaisseur de la paroi (entre 4 et 6 mm). Il s'ensuit que si une fissure se propage dans le matériau, elle sera traversante avant d'atteindre la taille critique de défaut et provoquera une fuite qui préviendra l'utilisateur. Ce phénomène a déjà été constaté dans la réalité.

On peut donc affirmer qu'une bouteille en bon état ne présente aucun risque d'exploser même en présence d'une fissure.

LA REEPREUVE

La longueur critique de défaut étant d'autant plus petite que la contrainte appliquée est élevée, lorsqu'on augmente la contrainte, la taille critique diminue. Par exemple pour le 35 CD 4, en chargeant à la pression d'épreuve de 300 bar, la taille critique devient 6,4 mm. On constate alors que la taille critique de défaut est très légèrement supérieure à l'épaisseur de la paroi. En réalisant l'épreuve de la bouteille on a donc mis en évidence qu'il n'existe aucune fissure de taille supérieure à 6,4 mm. On remarque également que la marge est confortable puisque à la pression d'utilisation de 200 bar, la taille critique était de 14,3 mm, ce qui laisse :

$$14,3 - 6,4 = 7,9 \text{ mm}$$

Cela veut dire qu'une bouteille qui a passé avec succès le test d'épreuve, peut être remise en service pour une période d'utilisation au moins identique car :

$$7,9 \text{ mm} > 6,4 \text{ mm}$$



Figure 7 : Morceau d'une bouteille après explosion accidentelle

L'expérience montre qu'une périodicité de 5 ans est largement suffisante puisque aucune bouteille saine (non corrodée) n'a jamais explosé en service. Notons au passage que l'intervalle de 2 ans pour les bouteilles non soumises à la dérogation est une réponse réglementaire à un problème lié à la corrosion et non une réponse pertinente à un problème de fissuration. D'ailleurs, lors des requalifications, les bouteilles ne sont jamais rebutées au moment de la réépreuve, mais sont écartées lors de l'inspection visuelle préalable au test d'épreuve.

CAS D'UNE BOUTEILLE CORRODÉE

Si la paroi est fortement corrodée (figure 6), l'épreuve peut ne plus être un test suffisant. Dans le cas d'une paroi fortement corrodée, son épaisseur est diminuée et pour une pression de service donnée, la contrainte est supérieure, et peut même atteindre localement la valeur limite au delà de laquelle le matériau se déforme plastiquement. A titre d'exemple, la taille critique de défaut calculée pour le morceau de bouteille explosée (figure 7) est de 2,8 mm. La taille critique de défaut étant inférieure à l'épaisseur de la paroi, un défaut préexistant peut se propager brutalement et provoquer l'explosion.

Admettre qu'une bouteille corrodée qui a passé l'épreuve ne présente aucun risque est une grave erreur. Une bouteille corrodée travaille à un taux de contrainte supérieur à sa contrainte nominale de service. Plus la contrainte se rapproche de la valeur limite plus le matériau devient instable, plus la vitesse de propagation d'une fissure augmente et plus petite est la taille critique de défaut. La conjonction de tous ces facteurs peut faire qu'une bouteille corrodée qui aurait subi avec succès une réépreuve pourrait atteindre une taille critique de défaut, et donc exploser, avant même l'épreuve suivante.

CONCLUSION

L'épreuve hydraulique est un excellent moyen pour s'assurer qu'un appareil à pression ne présente pas de défaut susceptible d'en provoquer l'explosion pour une période d'utilisation définie empiriquement (5 ans), pour peu que son intégrité mécanique et géométrique soit préservée (pas de perte d'épaisseur par corrosion).

Dans le cas d'une bouteille corrodée, la réépreuve n'est plus un critère suffisant et c'est pourquoi la requalification prévoit d'abord une visite préalable qui permet d'écartier les bouteilles corrodées, puis le test de mise en pression.

