



# LES BOUTEILLES DE PLONGÉE

## des appareils

Longtemps considérées comme des accessoires, les bouteilles de plongée ont commencé à intéresser les plongeurs lorsqu'en 1984 plusieurs accidents ont provoqué une modification de la législation et une prise de conscience, budget oblige, des utilisateurs.

Dès 1975, André Védrières, Directeur de la FFESSM, avait fait le point sur la législation relative à la fabrication, à l'utilisation et à l'entretien de ces appareils dans les numéros 27 et 28 de la revue "Études et Sports Sous-Marins". Bien que le paysage réglementaire ait peu changé, la technologie n'a cessé d'évoluer et la fabrication est soumise aujourd'hui aux exigences de l'Assurance Qualité.



### Le choix du matériau

Le constructeur établit une spécification fixant au moins les limites de composition chimique et les conditions relatives à l'élaboration. Des analyses produits sont fournies au fabricant afin que celui-ci puisse ajuster les conditions de mise en œuvre.

### Les bouteilles en acier

Sauf pour celles destinées à emmagasiner certains gaz comme l'hydrogène, toutes les bouteilles en acier sont fabriquées avec la même "nuance" qui peut prendre des désignations différentes suivant les pays d'origine : France, 35 CD 4 ; Allemagne et Italie, 34 Cr Mo 4.

Le choix de cette nuance est subordonné à la réglementation qui prévoit l'utilisation d'un acier au chrome-molybdène, et à des contraintes économiques et techniques. Les bouteilles de plongée ne représentent qu'une fraction comprise entre 5 et 10 % de l'ensemble des bouteilles fabriquées. Le choix d'un autre alliage conforme aux exigences de la législation et répondant mieux aux conditions spécifiques d'utilisation, notamment la résistance à la corrosion, entraînerait une augmentation notable du prix de revient et donc du prix de vente.

### Les bouteilles en aluminium

Les alliages d'aluminium sont plus sensibles aux agressions du milieu extérieur que les aciers. Cette grande réactivité leur permet, sous certaines conditions, de développer une couche d'oxyde continue et protectrice, l'alumine. Malheureusement cette couche peut

Aucun des "fabricants" de matériel connus du grand public ne produit les bouteilles de plongée. Tout au plus procèdent-ils à l'assemblage des différents éléments fabriqués par des sous-traitants. La production des corps de bouteille fait appel à des techniques industrielles lourdes et des contrôles sophistiqués. Les caractéristiques, qualités et défauts, sont largement induites par le procédé de fabri-

cation. Ces appareils sont soumis à une législation drastique, tant pour la fabrication que pour l'utilisation.

Sous réserve de dispositions particulières, sont laissés à l'appréciation du constructeur et sous sa responsabilité : le choix du matériau, la mise en œuvre, la constitution des assemblages, la détermination des formes, les dimensions et les épaisseurs. En fait, cette liberté apparente est fortement

surveillée, d'une part par les Directions Régionales de l'Industrie et de la Recherche (D.R.I.R.E) qui réceptionnent les appareils et veillent à leur conformité avec les prescriptions en vigueur, et d'autre part, par les services responsables de l'application des normes relatives à l'Assurance Qualité qui procèdent à des audits dans le cadre de l'attribution et du renouvellement des certifications.

être détruite par des agressions mécaniques, des phénomènes chimiques, électrochimiques ou bactériens. Des dommages, plus insidieux que ceux susceptibles d'apparaître dans les aciers, peuvent alors se développer et les alliages doivent donc répondre à des critères de choix sensiblement plus sévères. La teneur en cuivre doit être limitée à une valeur suffisamment basse pour éviter les risques de corrosion sous contrainte.

Ils doivent être aptes à subir un traitement thermique afin d'augmenter leur résistance, faute de quoi l'épaisseur nécessaire à la résistance de l'appareil rendrait le poids de la bouteille prohibitif. Autrefois, les bouteilles étaient fabriquées en alliage d'aluminium magnésium (A-G 5 M 07 ou 5283). Suite à des ruptures en service, celui-ci a été remplacé par un alliage aluminium silicium magnésium (A-SGM ou 6351).

# high tech

## La fabrication

Trois procédés permettent de forger le corps des bouteilles de plongée suivant la forme du demi produit de départ qui peut être, un tube sans soudure, une tôle ou une billette. (figure 1).

### A partir d'un tube sans soudure

Procédé utilisé par la société **Roth**, il fait appel à une technique désignée "flutournage" (figure 2). Cette opération consiste à placer le tronçon de tube dans le mandrin d'un tour et après avoir chauffé l'extrémité à une température comprise entre 1200 et 1250°C, le

métal est repoussé à l'aide d'une molette, en plusieurs passes, jusqu'à la fermeture complète du fond. Ce fond ainsi obtenu est percé, toujours à chaud, et, sous un jet d'azote protecteur, il est procédé à la fermeture finale. Cette dernière opération a pour but d'éliminer les oxydes formés lors du chauffage et emprisonnés dans l'épaisseur du métal. La surface interne du fond de la bouteille est ensuite usinée (opération appelée lamage) afin d'éliminer les irrégularités et replis engendrés par le forgeage. Ce procédé conduit à des fonds dont l'épaisseur est en général

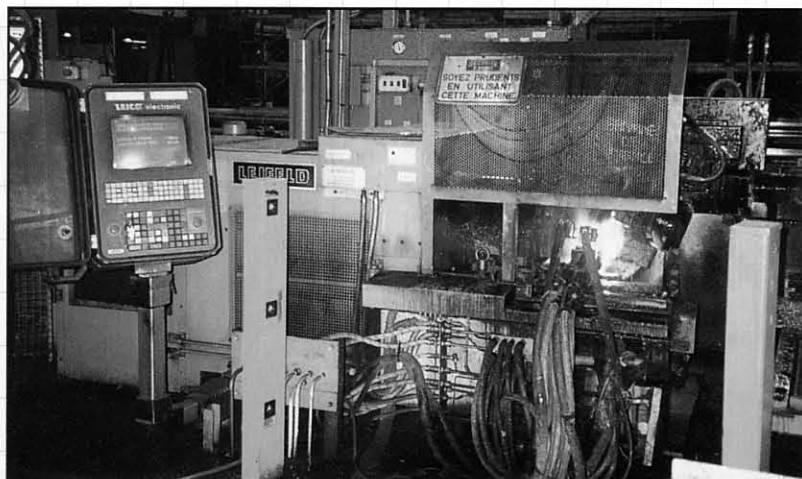


Fig. 2 - Forgeage des bouteilles par flutournage sur machine à commande numérique pilotée par ordinateur (photo Roth).

## LE MOT DU CONSTRUCTEUR

Paul Bouchayer - Société Roth

### Organisation et gestion de la production

Le principe de forgeage de l'acier est une technique millénaire, mais qui utilise aujourd'hui des outils de production à la pointe du progrès.

Pour la réalisation des bouteilles de plongée et autres appareils à pression, la société Roth maîtrise la technique du flutournage. Ce processus de fabrication part de tubes en acier sans soudure. Le savoir-faire Roth permet d'assurer un fond renforcé garantissant une longévité accrue et un meilleur confort d'utilisation.

A partir de plus de 30 références différentes de tubes, caractérisées par le diamètre et l'épaisseur, la société Roth gère un catalogue de 400 produits finis (dont la gamme Tortec). La gamme de bouteilles va de 0,4 litre à 50 litres, avec notamment des bouteilles tampon à 300 bars de pression de service pour les stations de remplissage (voir CTN info n° 24).

L'élaboration de ces produits fait appel à environ 15 opérations de fabrication de base, chaque opération permettant d'obtenir les variantes répondant aux exigences des clients. La multiplicité des références de produits finis et la complexité technique de chaque phase de fabrication et de contrôle exige une maîtrise parfaite du flux de production.

Depuis l'approvisionnement des tubes, jusqu'à l'expédition des produits chez les clients, l'ensemble des opérations est planifié et suivi informatiquement pour une plus grande rigueur dans le respect des délais.

La planification de la fabrication est réalisée en intégrant les exigences des clients en terme de délai.

Le temps de changement d'outils pour passer d'une série à une autre ont fait l'objet d'études d'optimisation afin de les réduire au minimum.

La maintenance préventive de l'outil de production est intégrée au planning de fabrication afin de supprimer les aléas générés par les pannes.

Les opérations de contrôle, d'essais et de réceptions par les organismes habilités au regard des différentes normes et réglementations internationales, font partie intégrante de la fabrication, toujours dans un souci d'ordonnancement optimal de la production.

L'organisation du système qualité de la société Roth est en conformité depuis plusieurs années avec la norme internationale ISO 9002.

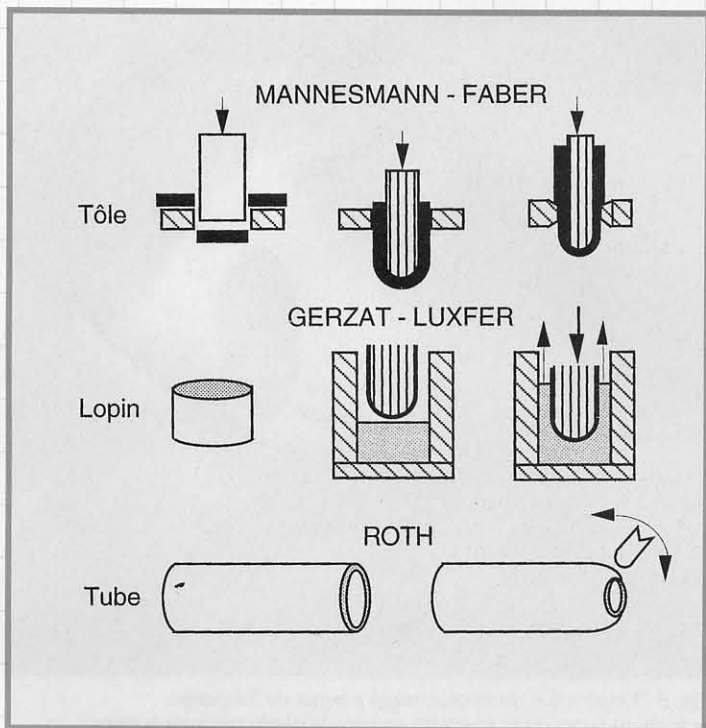


Fig. 1 - Les différentes techniques de fabrication des bouteilles.

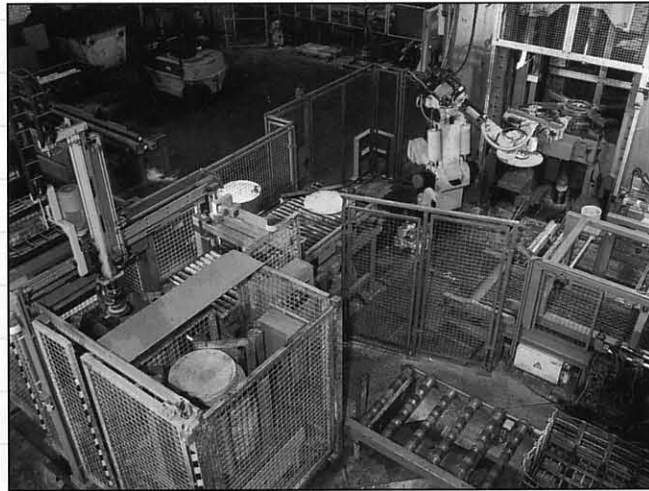


Fig. 3 - Presse de 700 tonnes alimentée par un robot pour la fabrication des corps de bouteille à partir d'une tôle ( photo Mannesmann).

## Le traitement thermique

Le traitement thermique de l'acier comprend deux phases. Une première consiste à chauffer la bouteille dans un four à une température comprise entre 850 et 900°C pendant une durée de 3 heures environ, puis à les refroidir rapidement par immersion dans un fluide comme l'huile ; c'est la trempe. A la suite de ce traitement, l'acier est très dur mais fragile, on dit que sa résilience est faible. Dans ce cas le matériau ne supporte pas les chocs, et se comporte

comprise entre 2 et 3 fois l'épaisseur de la paroi.

### A partir d'une tôle

Ce procédé est mis en œuvre par deux sociétés : la société **Mannesmann Stahlflaschen** dont l'usine de production des bouteilles de plongée est située à Homburg dans la Sarre (anciennement IWKA), et la société **Faber** en Italie. Un flasque, pièce circulaire découpée dans la tôle par estampage, est marqué du repère de coulée, puis subit un traitement de surface de phosphatation, appelé bondérissation, destiné à améliorer les coefficients de frottement de la pièce sur l'outillage de mise en forme. Les ronds sont ensuite déformés à l'aide d'une presse de 700 tonnes (figure 3) en plusieurs passes (figure 4) entrecoupées de traitements thermiques de recristallisation sous gaz neutre à la température de 720°C environ. Ce procédé conduit à des fonds dont l'épaisseur est du même ordre de grandeur que l'épaisseur de la paroi. Il faut noter que la société Mannesmann, consciente de l'avantage que constitue une surépaisseur à l'endroit où l'eau de condensation se rassemble, étudie la possibilité de modifier le procédé de manière à obtenir un fond plus épais.

### A partir d'une billette

Ce procédé est mis en œuvre par la société Mannesmann pour des bouteilles autres que les bouteilles de plongée et par la société **Heiser**, à Vienne en Autriche. Une billette, morceau de métal plein, de forme cylindrique ou parallélépipédique, est chauffée à une température de 1200°C environ dans un four, puis filée en plusieurs opéra-

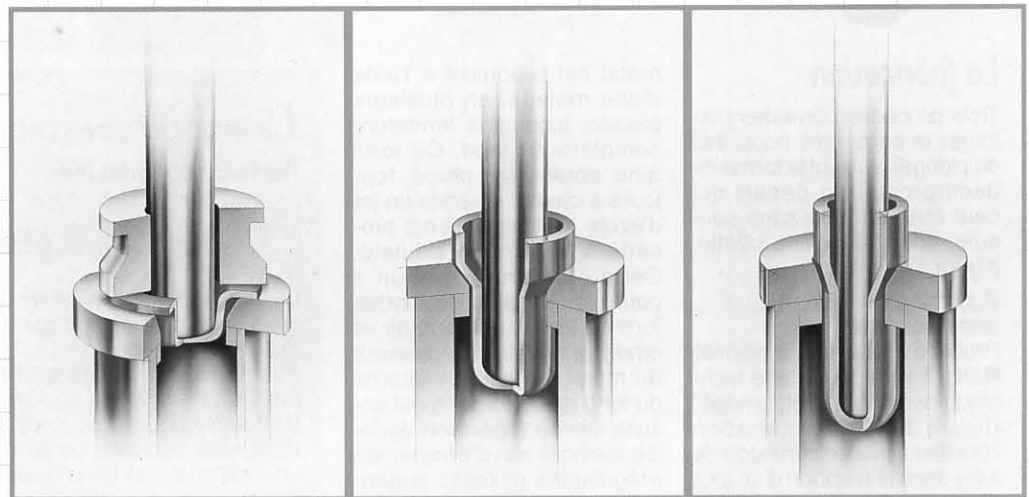


Fig. 4 - Fabrication par filage à partir d'une tôle (Photos Mannesmann).

tions successives sur une presse de 2000 tonnes. On obtient un corps creux qui subit une dernière opération appelée calibrage qui a pour but d'améliorer la géométrie et l'état de surface. Ce procédé conduit à des bouteilles dont le fond est sensiblement plus épais que ceux obtenus à partir de tôle et donc à des bouteilles plus lourdes.

Les bouteilles en aluminium sont fabriquées également à partir d'une billette. Dans ce cas, le métal froid est placé dans la presse et le forgeage se fait en une seule opération. Pour la mise en forme de l'ogive, tous les fabricants de bouteilles en acier utilisent le floutournage, opération qui consiste à repousser le métal à l'aide d'une molette, à une température de 1200°C environ à laquelle l'acier est suffisamment malléable (figure 5). Pour les bouteilles en aluminium, le col est forgé à la presse, à froid et en une seule opération.



Fig. 5 - L'opération de floutournage permet de fabriquer le fond ou le col de la bouteille comme le potier façonne la terre. (Photo Mannesmann).

"comme le verre". Il est indispensable de procéder à une deuxième phase de traitement thermique, qui consiste à réchauffer la bouteille à une température de l'ordre de 600°C pendant un temps suffisant pour diminuer la fragilité et redonner au matériau de l'allongement à rupture, c'est-à-dire une certaine capacité à se déformer avant de rompre. Un allongement à rupture minimum de 16 % était prévu par la législation française, il est de 14 % dans la directive européenne. A la suite de ce traitement thermique la dureté est contrôlée sur chacune des bouteilles. Par exemple, la société Mannesmann dispose d'une machine entièrement automatique qui réalise un méplat sur la bouteille à l'aide d'une fraise, fait une empreinte à l'aide d'un pénétrateur et mesure l'empreinte par analyse d'image. Un ordinateur calcule la dureté d'après les dimensions de l'empreinte analysée, stocke en mémoire les résultats et commande un jet de peinture pour marquer la bouteille. La couleur de marquage dépend du résultat de la mesure.

Le traitement thermique des bouteilles en alliage d'aluminium 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, et à l'inverse de l'acier, le matériau est mou et déformable. Il subit ensuite un revenu à une température de l'ordre de 200°C, pendant lequel il est soumis à un phénomène de durcissement qui conduit à ses propriétés finales. Les températures de mise en œuvre des alliages d'aluminium étant relativement basses, ceux-ci ne supportent pas les élévations de température trop importantes. Les opérations de crackage thermique ou de cuisson des peintures sont donc à proscrire impérativement lors des remises en état ou des réépreuves.

## Description de la bouteille

Le constructeur doit fournir un descriptif à l'organisme qui fait la réception. Les caractéristiques dimensionnelles doivent y figurer avec les tolérances qui s'y rapportent (hauteur, contenance, défaut d'aplomb, déformation longitu-

dinale, masse). Le descriptif doit indiquer le procédé de fermeture du fond, les contrôles effectués en cours de fabrication, les traitements thermiques et mécaniques déterminant les caractéristiques finales de la bouteille. Ces caractéristiques doivent vérifier, entre autre, que dans le cas d'une bouteille réalisée à partir d'un tube sans soudure, l'épaisseur du centre du fond soit supérieure à 1,5 fois l'épaisseur du tube, avec une variation continue entre le fond et le tube.

Le constructeur donne les garanties appropriées quant aux caractéristiques mécaniques du métal constituant le corps de la bouteille, en fonction des règlements dans lesquels il a choisi de s'inscrire : la valeur minimale de la limite d'élasticité  $R_e$ , la résistance à la traction  $R_m$ , de l'allongement à rupture  $A$  % et la valeur maximale du rapport  $R_e/R_m$ . Le métal doit être exempt de fragilité dans les domaines de températures et de pressions de service et d'épreuve. L'allongement doit être supérieur à 14 % et le produit de la résistance à la traction par l'allongement ( $R_m \times A$ ) doit être égal ou supérieur à 10500.

**1<sup>er</sup> cas :** arrêté de 1943 modifié par l'arrêté de 1982 – titre II. La contrainte, c'est-à-dire le taux de travail du métal dans la paroi, doit être inférieure à la plus faible des deux valeurs suivantes : 1/3 de la résistance du métal à la température ordinaire, 5/8 de la limite d'élasticité à 0,2 % d'allongement du métal à la température maximale de service.

**2<sup>e</sup> cas :** arrêté de 1943 modifié par l'arrêté de 1982 – titre V (régime dérogatoire). La contrainte doit être inférieure à la plus faible des deux valeurs suivantes : 0,425  $R_m$  (résistance à la traction), 0,5  $R_e$  (limite d'élasticité).



## L'Europe en bouteilles

**A l'heure de l'Europe, on entend souvent des affirmations erronées sur la libre circulation des appareils. Qu'en est-il ? Paul Bouchayer, responsable du service Assurance Qualité de la société Roth fait le point :**

### Directive n°84.525 CEE du 17 sept. 1984

Art. 3 : les états membres ne peuvent refuser, interdire ni restreindre pour des raisons qui concernent sa construction et le contrôle de celle-ci, au sens de la directive 76/767/CEE et de la présente Directive, la mise sur le marché et la mise en service d'une bouteille de type CEE.

L'art. 4 définit la procédure à respecter (précisé dans l'annexe I). Agrément CEE de modèle : ceci correspond à une homologation initiale du produit et comprend la vérification de la définition du produit et des calculs de résistance, et partir d'une pré-série de cinquante pièces mini, des prélèvements sont faits pour vérifications et essais des caractéristiques géométriques et mécaniques.

Vérification CEE : dans chaque lot de fabrication, des prélèvements sont faits pour vérifications et essais des caractéristiques ; ces essais sont plus succincts que pour l'agrément CEE de modèle. Tous les produits sont soumis à l'épreuve hydraulique.

L'agrément CEE de modèle et la vérification CEE peuvent être réalisés par n'importe quel organisme habilité : DRIRE, TÜV, APRAGAZ...

*Nota : certains organismes de contrôle peuvent faire une vérification CEE, mais pas un agrément CEE de modèle.*

### Arrêté Ministériel du 11 mars 1986 portant application de l'article 3 de la Directive n° 84.525 CEE

L'art. 5 précise que les bouteilles doivent être présentées à un expert de la DRIRE. Celui-ci vérifie : - l'existence du certificat d'agrément CEE de modèle, - la conformité des marquages "CEE" et des marques de services relatives à la réglementation française. Il appose alors le poinçon "Tête de cheval" DRIRE.

En clair, cela signifie qu'une bouteille ayant un agrément CEE de modèle et ayant subi une vérification CEE lors de sa fabrication, doit être vérifiée et poinçonnée par un organisme reconnu du pays où elle va être utilisée.

- Bouteille fabriquée en France, utilisée en France : agrément CEE de modèle par n'importe quel organisme reconnu, vérification CEE par n'importe quel organisme reconnu, vérification DRIRE (marquage + poinçon DRIRE)

- Bouteille fabriquée en France, utilisée en France et en Allemagne : agrément CEE de modèle par n'importe quel organisme reconnu, vérification CEE par n'importe quel organisme reconnu, vérification DRIRE (marquage + poinçon DRIRE), vérification TÜV (marquage + poinçon TÜV)

- Bouteille fabriquée à l'étranger, utilisée en France : agrément CEE de modèle, vérification CEE, vérification DRIRE (marquage + poinçon DRIRE)

Une bouteille "CEE" signifie que le produit ne peut pas être refusé par un pays de la CEE, mais auparavant, chaque pays :

- 1) a pris le soin de vérifier qu'elle était bien "CEE",
- 2) a fait compléter le marquage par certaines indications propres à son pays,
- 3) a apposé son poinçon (appelé communément "double poinçon").

### Conclusions :

La bouteille "CEE" est conçue, fabriquée, contrôlée et vérifiée de la même façon quel que soit le fabricant. Ce n'est pas le cas des produits à réception DRIRE, TÜV, LLOYDS, APRAGAZ..., l'un par rapport à l'autre. Une bouteille "CEE" importée en France doit avoir le "double poinçon" DRIRE pour pouvoir être utilisée. Le "double poinçon" n'apporte aucune valeur ajoutée au produit tout en créant une contrainte de coût et d'organisation, car une opération de vérification supplémentaire est à réaliser.

**Remerciements :** Mr Gerd Von Bassewitz (Mannesmann), Mr Paul Bouchayer (Roth), Madame D. Bouche (Mannesmann), Pierre Vogel (Vieux Plongeur Marseille).



## Les contrôles

Bien que le coefficient de sécurité soit plus faible, tous les constructeurs ont choisi la 2<sup>e</sup> solution (dérogatoire) qui conduit à des bouteilles plus légères. Les contrôles prévus dans le premier cas se résument à une mesure de dureté et l'épreuve à 1,5 fois la pression de service. Dans le deuxième cas, les contrôles sont plus nombreux et plus coûteux : ils comprennent la mesure de dureté, la recherche de défauts par ultrasons, le contrôle des dimensions et des tolérances des usinages, le poids, sur chacune des bouteilles. L'épreuve initiale fait partie de ces contrôles systématiques. Elle consiste à gonfler chaque bouteille à une pression égale à 1,5 fois la pression de service, à l'eau et non à l'air, ce qui serait trop dangereux en raison de l'énergie d'élasticité emmagasinée à cause de la compressibilité de l'air. L'épreuve, comme la ré-épreuve d'ailleurs, est un essai, initialement empirique, qui a trouvé toute sa signification lors des développements plus récents de la mécanique de la rupture. Il permet de vérifier s'il n'existe pas, au sein du matériau, de défaut ou fissure dont la taille pourrait provoquer l'explosion de la bouteille. La taille d'un tel défaut, appelé défaut critique, dépend, pour un matériau donné, de la contrainte appliquée et donc de la pression. Plus la pression est élevée, plus la taille critique de défaut est faible. Notons au passage qu'une réduction de l'épaisseur par corrosion produit le même effet, car la contrainte, à pression constante, est inversement proportionnelle à l'épaisseur.

En résumé, lorsque la bouteille a satisfait à l'épreuve, cela signifie que le plus grand défaut qui puisse exister a une taille inférieure à la taille critique correspondant à la pression d'épreuve. La taille cri-

tique à la pression de service étant supérieure à la taille critique de la pression d'épreuve, la différence entre les deux correspond à la "marge de sécurité" sans risque d'explosion. Un défaut étant toujours susceptible de progresser en service, il est nécessaire de pratiquer des réépreuves à intervalles réguliers. Aucun accident n'étant survenu suite à une fissuration brutale, l'intervalle entre réépreuves fixé initialement à 5 ans est largement suffisant, à condition que la corrosion ne réduise pas l'épaisseur de la bouteille.

On peut signaler également que, compte tenu des propriétés mécaniques de l'acier 35 CD 4, la taille critique de défaut à la pression de 200 bars est supérieure à l'épaisseur des parois des bouteilles. En d'autres termes, une bouteille non corrodée présentant une fissure devra fuir, et donc prévenir, avant de présenter un risque d'explosion. D'ailleurs, quelques cas de fuites ont été recensés sans qu'elles aient produit d'explosion.

D'autres essais sont réalisés sur des prélèvements statistiques dans la fabrication, ce sont les essais de surcharge, d'éclatement, de pulsation.

- L'essai de surcharge : la bouteille doit pouvoir supporter une pression égale à 2 fois la pression de service sans dommage.

- L'essai d'éclatement consiste à charger la bouteille jusqu'à l'éclatement. Cet essai est réalisé dans une enceinte blindée. Les pressions de rupture sont généralement comprises entre 450 et 600 bars pour une bouteille de 200 bars de pression de service. La rupture intervient en principe suivant une génératrice et la forme de celle-ci est soigneusement analysée.

- L'essai de pulsation consiste à cycloer la bouteille à tester entre la pression ambiante et la pression d'épreuve, à raison de 3 à 5 cycles par minute. La bouteille doit subir 12000 cycles sans fuite ni rupture. Entre 12000 et 20000 cycles, une fuite peut apparaître mais la fissure ne doit pas conduire à la fragmentation de la bouteille. La législation ne prévoit pas d'essai au-delà de 20000 cycles. Néanmoins, certains fabricants poursuivent les essais bien au-delà ; par exemple la société Roth a obtenu sur ses bouteilles des nombres de cycles allant de 48810 à 68860 avant fissura-

tion. Il faut préciser que cet essai de fatigue est un moyen de vérifier s'il n'y a pas de défaut issu de la fabrication et susceptible de se propager en service. Le nombre de cycles obtenu lors de l'essai n'est pas représentatif de la durée de vie et on ne peut pas dire qu'une telle bouteille pourra être chargée 12000 fois sans précaution ni dommage. D'autres facteurs que la pression interviennent en service, comme le temps de maintien de la pression, la vitesse de chargement et de déchargement, le milieu ambiant, la corrosion, la teneur en oxygène, l'humidité...

## Les finitions

Vous reconnaissez au premier coup d'œil la marque d'une bouteille grâce à sa couleur. Si la peinture fait partie de son look, elle contribue également à la protection contre la corrosion. Pour en arriver là, la bouteille a subi un grenailage afin de débarrasser sa surface extérieure des traces d'oxydation consécutives au traitement thermique. Ce grenailage avive la surface, créant une légère rugosité favorable à l'accrochage du revêtement anticorrosion. Le plus courant des revêtements est le shoopage, opération qui consiste à projeter du zinc en fusion sur la surface. L'épaisseur déposée varie suivant le constructeur, comme d'ailleurs pour les entreprises qui reconditionnent les bouteilles à l'occasion des réépreuves. Les épaisseurs rencontrées sont comprises entre 40 et 120 microns. L'épaisseur nécessaire pour la bonne protection d'un appa-

reil exposé en permanence aux embruns est de 120 microns. Compte tenu de l'utilisation des bouteilles, une épaisseur de 80 microns est considérée comme suffisante. Attention aux propositions de certaines entreprises qui, pour "tirer le prix", déposent des revêtements beaucoup plus minces, défavorables à la longévité de la protection. Une autre solution, adoptée par la société Heiser, est l'utilisation d'une peinture au zinc appelée "primaire au zinc" qui peut être ou non cuite au four. Cette solution, plus simple que le shoopage surtout lorsqu'elle est réalisée à froid, peut être mise en œuvre de manière artisanale, même par le club. C'est d'ailleurs la solution adoptée pour la réparation des ouvrages en mer comme les plates-formes de forage. Pourquoi le zinc ? Le zinc est moins noble que l'acier et crée avec celui-ci un couple électrochimique (création d'un courant électrique) favorable à l'acier qui va ainsi être protégé. Ce revêtement de zinc se comporte comme les anodes sacrificielles disposées sur les coques de bateau en acier ou sur les embases d'hélices. Il va se dissoudre lentement, et tant qu'il y a du zinc, l'acier est protégé. Un petit éclat du revêtement n'est pas très grave car la protection est toujours assurée par le zinc environnant. Pour limiter la dissolution du zinc, celui-ci est recouvert d'une couche de peinture d'apprêt. La couche finale, peinture polyuréthane à deux composants cuite au four, termine la protection.

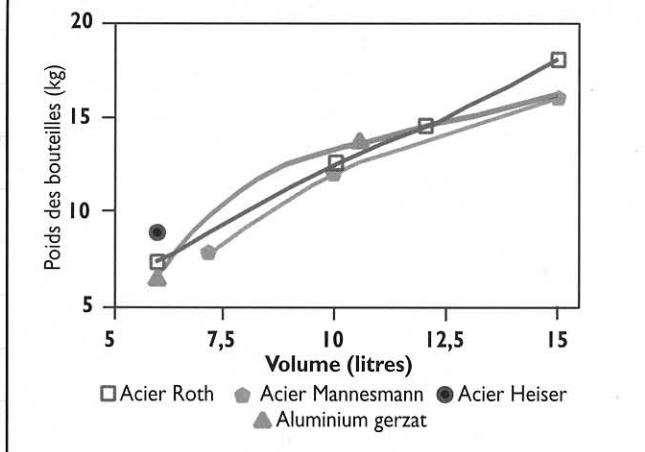
FABRICANT	Contenance (litres)	Pression (bars)	Diamètre (mm)	Poids (kg)
Gerzat (alu)	10,5	200	180	13,6
Luxfer (alu)	10,4	232	191	13,6
Mannesmann	12	200	171	13,7
Heiser	12	200	171	14,3
Roth	12	200	168	14,5
Heiser	12	200	204	15,1
Roth	12	200	203	15,8
Mannesmann	15	200	204	16
Luxfer (alu)	12,2	232	204	16,1
Gerzat (alu)	15	200	183	16,3
Mannesmann	12	230	204	16,5
Roth	12	230	203	18
Roth	15	200	203	18
Mannesmann	15	230	204	19
Roth	15	230	203	20

L'intérieur des bouteilles est également grenailé à l'aide de grenailles de diamètres et de formes différentes suivant les constructeurs, et peut subir des traitements très variés comme du microbillage, des traitements de conversion par phosphatation... Toutes ces opérations sont destinées à rendre la surface intérieure la moins réactive possible vis-à-vis de la corrosion, avec plus ou moins de bonheur suivant le cas. On rencontre encore quelquefois des vernis incolores et transparents mais, le plus souvent, les revêtements intérieurs sont abandonnés car le remède est pire que le mal. Le défaut d'adhérence de ces revêtements (époxy ou rilsan) sur l'acier ainsi que les différences de déformation conduisent à des décollements. En pression, l'humidité, présente dans la bouteille, passe à travers et produit une corrosion cavernueuse. Enfin, pour les détruire, ils nécessitent préalablement à la réépreuve des traitements de crackage thermique qui sont source de dommage. Alors, comment protéger l'intérieur ? Il n'est techniquement pas possible de déposer du zinc par projection à l'intérieur des bouteilles. D'ailleurs, la toxicité de l'oxyde de zinc interdit une telle solution. La dernière solution est de laisser le métal à nu et éventuellement de le protéger avec un film gras par pulvérisation d'huile d'une qualité compatible avec la respiration. L'utilisation de ces huiles, dites alimentaires, suscite des polémiques car aucune huile n'est dépourvue de toxicité, c'est simplement une question de dose.

### L'épaisseur, une question de poids

L'épaisseur de la bouteille est directement liée à la notion de contrainte. Dans le corps de la bouteille, la contrainte maximum (tangentielle) est égale à : pression x rayon / épaisseur. Nous avons vu précédemment que la contrainte admissible, ou taux de travail, est définie par rapport aux caractéristiques mécaniques du matériau. Cet exigence a deux conséquences :

- pour un taux de travail donné, l'épaisseur de la paroi est directement proportionnelle au rayon du tube. Si le rayon du tube augmente, l'épaisseur de la paroi doit être augmentée



**Fig. 6 - Poids des bouteilles de pression de service 200 bars. A volume égal, les bouteilles en alliage d'aluminium sont plus lourdes que les bouteilles Mannesmann. Leur poids est également inférieur à celui des bouteilles Roth pour les volumes inférieurs à 6 litres et pour les bouteilles de 15 litres. Les bouteilles Mannesmann sont sensiblement plus légères que les bouteilles Heiser et Roth. Toute modification des diamètres ou des pressions de service peut inverser ces données.**

dans les mêmes proportions pour maintenir la contrainte admissible.

- plus la résistance du matériau est basse, plus l'épaisseur de la paroi doit être grande.

Ces deux paramètres, rayon du tube et résistance du matériau, interviennent directement dans le poids de la bouteille. Pour la même contenance, une bouteille longue et étroite sera plus légère qu'une bouteille courte et ventrue. De même pour les bouteilles en alliage d'aluminium dont la résistance est d'environ 1/3 de la résistance de l'acier alors que le rapport des masses volumiques est de 1/2,9, le gain de poids dû à la densité de l'aluminium n'est pas évident et dépend essentiellement du diamètre de la bouteille. La figure 6, réalisée avec des poids relevés dans des catalogues de bouteilles, montre que l'aluminium n'est favorable que pour des contenances inférieures à 5 litres ou supérieures à 13 litres. Ces valeurs sont fortement dépendantes du rayon des bouteilles et peuvent varier très fortement en fonction de la conception (rapport hauteur/rayon). Notons enfin que l'épaisseur d'aluminium nécessaire au maintien du taux de contrainte conduit, pour une bouteille de 10 litres, à un volume externe équivalent à une bouteille acier de 12 litres. C'est pour cette raison que souvent, les bouteilles en aluminium présentent, en fin de plongée, une flottabilité positive difficile à compenser.

On peut se poser la question de savoir si l'augmentation des pressions de service ne peut pas, dans une certaine mesure abaisser la fiabilité des bouteilles. Une pression de service plus élevée va né-

cessairement engendrer des épaisseurs de parois plus grandes pour maintenir un taux de contrainte donné. Si l'épaisseur de la paroi devient trop importante, la taille critique de défaut à la pression

de service peut devenir inférieure à cette épaisseur et dans ce cas, l'explosion peut survenir sans fuite. Cela veut dire également qu'une diminution donnée d'épaisseur de la paroi par corrosion devient de plus en plus dangereuse à mesure que la pression de service augmente.

J.-P. Montagnon



## LE MOT DU CONSTRUCTEUR

D. Bouche - Société Mannesmann Stahlflaschen

### Assurance Qualité à l'usine de Hombourg

Les réservoirs à gaz sous pression sans soudure sont soumis à des prescriptions de sécurité strictes dans tous les pays. En raison de leurs contraintes élevées, un défaut dans la construction, dans l'acier ou dans le déroulement de la fabrication peut avoir des conséquences mortelles. Ces exigences élevées conditionnent un système d'Assurance de la Qualité qui surveille chaque opération de fabrication et documente les résultats d'essais et contrôles.

La société Mannesmann Stahlflaschen GmbH s'engage à une livraison de ses produits en conformité avec les prescriptions techniques mentionnées dans les commandes internes usine, c'est-à-dire réglementations, normes et éventuellement spécifications du client.

Les produits sont soumis aux directives strictes du système d'Assurance de la Qualité de Mannesmann.

Les mesures ayant trait à la qualité dans les différents départements de fonction sont étayées par des directives de travail et des installations de contrôle/essais des plus modernes (par exemple machine de contrôle de sécurité et Ultrasons).

La matière de base (tôle, billette et tube) ainsi que les accessoires venant de fournisseurs extérieurs sont contrôlés par le département AQ vis-à-vis du respect des prescriptions MSF.

Un autre pas important vers la sécurité d'un standard de qualité élevé et constant est la certification de l'usine de Hombourg selon ISO 9001 prévue pour 1997. Dinslaken est déjà certifiée ISO 9001.

En détail, le service AQ de l'usine de Hombourg a les missions suivantes :

- respect et développement du système AQ jusqu'à la certification,
- nature des prescriptions et spécifications,
- techniques de contrôle et installation,
- contrôle de qualité,
- surveillance (calibrage) des instruments de mesure et de contrôle,
- traitement des commandes au niveau technique dans des cas non classiques,
- contrôles de réception et mise à disposition pour expédition,
- traitement des réclamations,
- développement et agrément de nouveaux types de bouteilles.