

RESERVOIRS SOUS PRESSION

Calcul réglementaire

par le Capitaine H. BENEDITTINI,
— Ingénieur de l'Ecole Nationale
Supérieure des Mines d'Alès
— Corps des Sapeurs-Pompiers
de la Communauté urbaine de Lyon

AVANT PROPOS

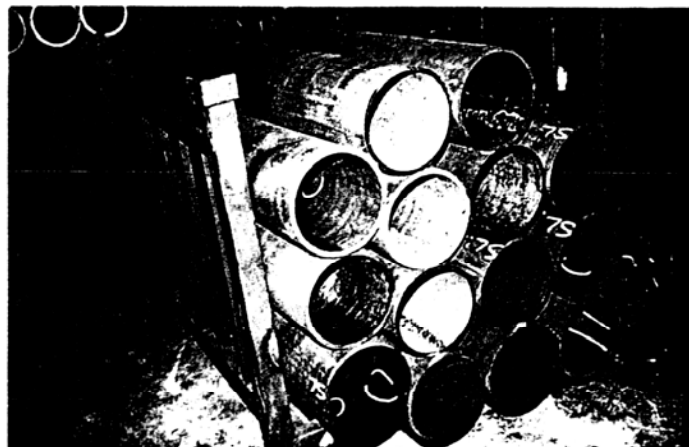
Avec la révolution industrielle, on a vu se développer l'utilisation des machines. Elles étaient destinées, avant tout, à remplacer l'homme et l'animal lors des efforts importants que les industries nouvelles nécessitaient. Cette production d'énergie a impliqué la réalisation d'enceinte résistant aux pressions des fluides, dont le cycle thermodynamique assurait le travail moteur.

Bien sûr, l'exemple de la machine à vapeur, motorisant bateau et train, immortalisée par la description d'Emile Zola dans « *La Bête Humaine* » reste à l'esprit de tous. Cette vapeur surchauffée, dont la pression anime le mouvement alternatif d'un piston, est issue d'une chaudière : comment cette enceinte de plusieurs mètres de long résiste-t-elle aux pressions de plusieurs dizaines d'hectopièze (1) et à la chaleur du foyer ?

Mais ce progrès technique, malgré l'évolution des connaissances en résistance des matériaux et métallurgie, provoque un risque nouveau : la rupture de réservoirs de vapeur sous pression (chaudières, tuyauteries) laisse des plaies profondes dans le monde du travail. L'Etat, ainsi poussé par les nécessités, jouera alors son rôle réglementaire afin de garantir un niveau correct de sécurité, à la fois pour le travailleur et pour la population. L'élaboration du règlement de sécurité sera assurée par les cadres techniques du Service des Mines.

La préoccupation du contrôle des enceintes sous pression (appareils à pression de gaz et appareils à pression de vapeur) a été appréhendée de façon différente par les pays industrialisés : en admettant que le calcul scientifique d'une enveloppe aboutisse à un calcul exact de sa structure, comment apprécier le taux de risque lié à l'évolution du matériau dans le temps (corrosion, fatigue...) et donc déterminer la marge de sécurité à imposer ? D'autre part, il convient, par l'intégration des matériaux nouveaux (les matériaux composites par exemple), de faire bénéficier l'utilisateur des progrès techniques. Cette adéquation représente un équilibre difficile à atteindre, d'autant plus que les contraintes financières jouent de plus en plus un rôle prépondérant.

(1) Pièze : ancienne unité de pression dans le système C.G.S. : 1 hectopièze = 1 bar



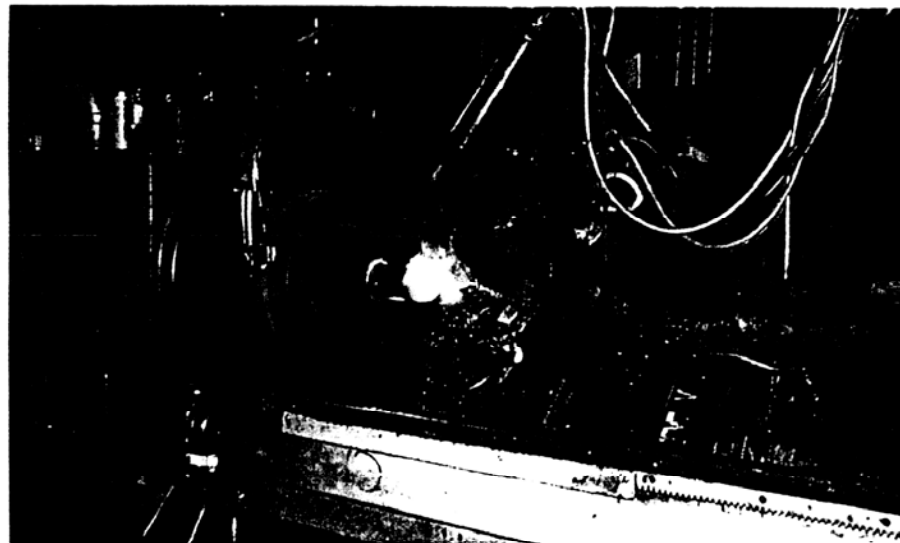
Tubes en acier 35 CD 4
 matière première
 pour la réalisation
 des bouteilles forgées
 cliché FFESSM.

Certes le Sapeur-Pompier n'a pas la mission de concevoir ni de vérifier les appareils à pression, et ce bref récapitulatif du cadre réglementaire pourra étonner certains.

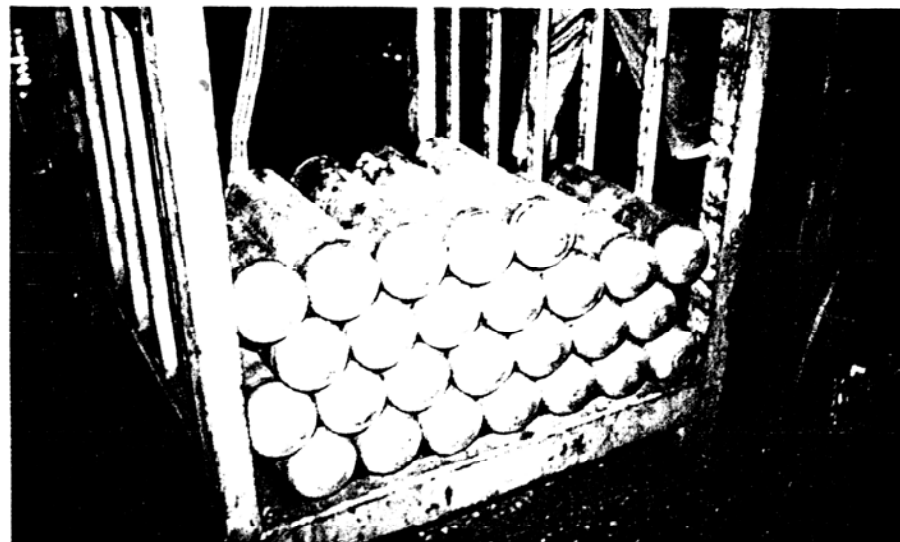
Néanmoins, il nous a paru souhaitable, alors que dans chaque véhicule d'incendie l'A.R.I. est devenu le compagnon indissociable de la LdT, que les installations de compression d'air, avec réservoirs tampons, ornent presque chacun de nos CSP, que les tubes d'O₂ arment chacun de nos V.S.A.B., de préciser le cadre réglementaire où se meut cet être étrange qu'est le réservoir à pression.

Compte tenu de l'ampleur du sujet, l'objet de cet article sera volontairement réduit aux bouteilles forgées, destinées à l'emmagasinage des gaz comprimés (seront en particulier éliminés les appareils à pression de vapeur) : bouteilles d'air (A.R.I. et plongée) et bouteilles d'oxygène.

Forgeage du fond, cliché FFESSM.



Fonds terminés, cliché FFESSM.



PRESENTATION

Dans l'état actuel de la réglementation sur les réservoirs à pression de gaz, le décret du 18 janvier 1943 « portant règlement sur les appareils à pression de gaz » demeure la pièce maîtresse malgré le fait qu'il soit issu d'une période troublée de notre histoire, (le lecteur remarquera qu'aucune signature ne subsiste pour ces textes).

D'autre part, l'arrêté du 23 juillet 1943 « relatif à la réglementation des appareils de production d'emmagasinage ou de mise en œuvre des gaz comprimés, liquéfiés ou dissous » précise les conditions de calcul et de vérification des récipients métalliques sous pression. Ce texte, modifié à de nombreuses reprises, a été complété par l'arrêté du 9-février 1982 « relatif à la construction et au chargement des bouteilles forgées utilisées à l'emmagasinage des gaz comprimés liquéfiés ou dissous » suivant lequel est construite la majorité de nos bouteilles.

Enfin, les Directives Européennes laissent présager l'avenir probable du cadre réglementaire.

DECRET DU 18 JANVIER 1943

Après la définition de son objet (appareils à pression destinés à être utilisés à terre et pour les bouteilles dont le produit : Pression x Volume est supérieur à 80) le décret du 18.1.43 précise :

- L'obligation de vérifications préalablement à l'épreuve,
- Les marques d'identité et de service (article 4),
- Le renvoi à des arrêtés (23/07/1943) pour les conditions de construction (article 9),
- La déclaration et enquête en cas d'accident occasionné par un appareil à pression — blessures graves ou mort — (article 10);
- Que des dérogations aux règles générales sont possibles, après accord de la Commission Centrale des appareils à pression (article 11).

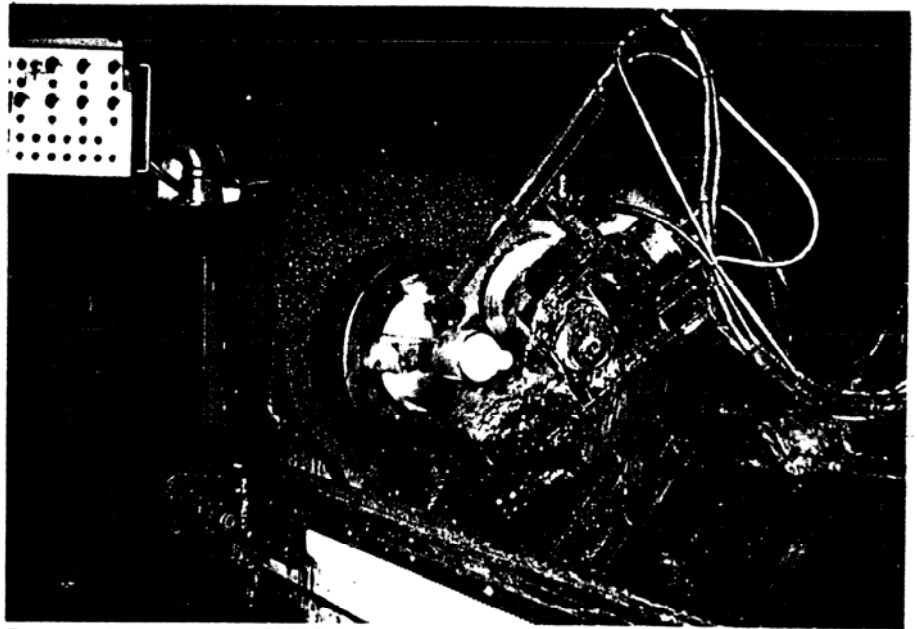
ARRETE DU 23 JUILLET 1943

Dans son titre I, cet arrêté définit les règles de construction des appareils :

- Résistance du matériau aux actions chimiques des corps qu'il peut contenir (article 3),
- Le métal doit être exempt de fragilité dans le domaine des températures, de pression d'utilisation et d'épreuve (article 4).

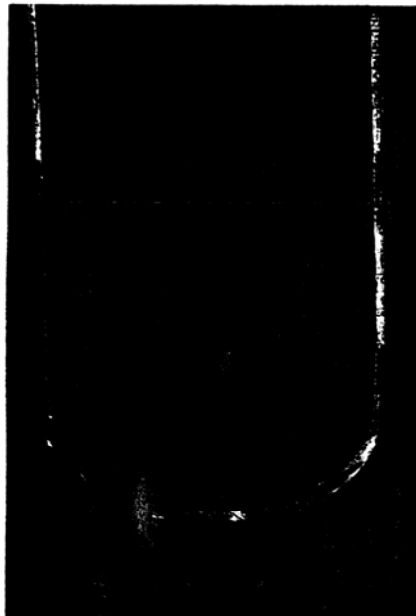
L'article 4 modifié par l'arrêté du 29 mai 1989 précise :

- pour le produit utilisé $A \geq 20$ ou
 - sur l'appareil à l'état neuf $RA \geq 10\ 500$ et $A \geq 14$
- Les règles de calcul (sous la responsabilité du constructeur). A la pression

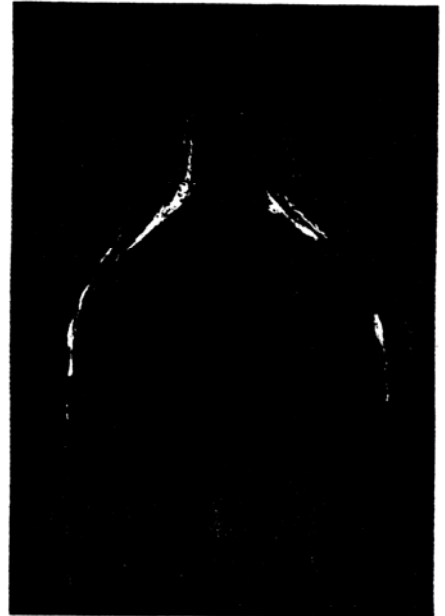


Forgeage de l'ogive, cliché FFESSM.
Coupe d'un fond d'une 12 l/200 bars. On peut remarquer la sur-épaisseur égale à 1.5. Voir norme NF 49-901 relative aux bouteilles en acier sans soudure.

Coupe d'une bouteille de 12 l/200 bars au niveau de l'ogive. On remarque que la variation d'épaisseur est continue.



Coupe d'une bouteille en alliage d'aluminium. L'épaisseur est de 12 mm pour un diamètre de 180 mm et une pression de service de 200 bars.



Allure de la déchirure lors d'un essai de rupture sous pression hydraulique cliché FFESSM. La déchirure répond à la norme 49-901 : Allure longitudinale sans ramification latérale.



de calcul le taux de travail de l'acier R doit être inférieur à la plus petite des deux valeurs (2) :

$$\frac{1}{3} R_m \text{ ou } \frac{5}{8} R_{0,2}$$

Afin de déterminer les contraintes auxquelles sont soumises les parties sous pression, il est admis un calcul simplifié. Ainsi pour les appareils cylindriques à parois minces on utilisera la « contrainte de membrane » (moyenne de la plus grande contrainte principale dans la paroi).

En réalité, chaque point du métal est soumis à une tension des contraintes dont le calcul exact dépasserait l'approche globale de la réglementation, qui vise seulement à garantir un niveau de sécurité.

Néanmoins, l'existence de variation rapide de courbure et l'existence des ouvertures, font apparaître des points singuliers où des poids de contrainte peuvent exister.

Enfin, des essais d'éclatement peuvent permettre d'apprécier, à partir de la pression de rupture, le degré de sécurité.

Ainsi, choisissant un acier (3) on peut déterminer l'épaisseur de la paroi :

$$a = \frac{P d}{\frac{2 R}{3} + P} = \frac{200 \times 200}{\frac{2}{3} \times 10 \times 1000 + 200} = 5,8 \text{ mm}$$

(voir remarque sur la formule d'épaisseur de paroi).

le taux de travail sera pris à

$$\frac{R_m}{3} \text{ car } \frac{R_m}{3} = 333,3 \text{ est inférieur}$$

$$\text{à } \frac{5 P_e}{8} = 531.$$

L'acier vérifie les conditions :

$$R_m \times A = 16 \times 1000 > 10\,500$$

$$\text{et } A = 16 > 14$$

D = diamètre extérieur de la bouteille en mm
R = Résistance à la traction
P = Pression de calcul (pression maximale de service).

(2) R_m : Résistance à la traction exprimée en mégapascals

A : Allongement après rupture en pour cent.

$R_{0,2}$: Limite d'élasticité à 0,2 p. 100, c'est-à-dire que l'on observe lors de l'essai, un allongement non proportionnel égal à 0,2 p. 100 de la longueur initiale.

Remarque :

$1/3 R_m$ est prépondérant à la température ambiante, alors que $5/8 R_{0,2}$ devient prédominant pour des récipients destinés à être utilisés à haute température.

(3) Caractéristique de l'acier choisi pour l'exemple
c = 0,27/0,34 % ; Cr = 2,25/2,75 % ; Mo = 0,45/0,60 %

Après une trempe à l'huile 925 °C et un revenu à 600 °C.

On obtient les caractéristiques suivantes :

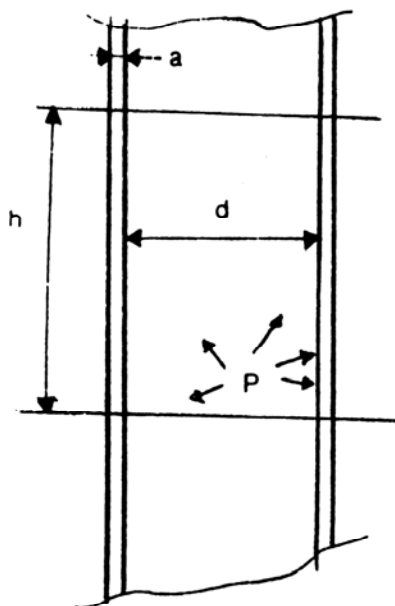
$$R_m = 1000 \text{ N/mm}^2 \quad A = 16$$

$$R_e = 850 \text{ M/mm}^2$$

$$\text{d'où } \frac{R_m}{3} = 333,3 \quad \frac{5 R_e}{8} = 531$$

REMARQUE

Le calcul traditionnel de l'épaisseur de la paroi se déduit de l'étude en résistance des matériaux des enveloppes minces (schéma).



Soit un tube de longueur indéfinie, dans lequel règne une pression P, de diamètre d et d'épaisseur a, à l'équilibre on donne l'égalité entre :

— la poussée, exercée par la pression P sur la surface S à l'intérieur du tube.

— la somme des contraintes normales dans la section plane.

Soit numériquement : P.S. = n.s. avec $S = d \times h$ et $s = 2 a h$.

d'où

$$n = \frac{P d}{2 a}$$

Pour le calcul « réglementaire » le diamètre choisi est le diamètre moyen, soit : $D - a$ avec a = épaisseur du tube et D diamètre extérieur. D'où la formule :

$$n = \frac{P (D - a)}{2 a}$$

Enfin le titre II prévoit :

— Les conditions de l'épreuve,

— La périodicité des ré-épreuves (10 ans appareils fixes, 5 ans pour les autres, sauf cas particulier).

Ainsi, la modification de la périodicité des ré-épreuves des bouteilles de plongée (arrêté des 16 février et 20 mai 1985) fait suite à des problèmes de corrosion fissurante. On pourra remarquer que déjà en 1945, l'emmagasinage sous forme comprimée de gaz issus de la distillation des combustibles solides avait provoqué la réduction de la périodicité des épreuves des bouteilles les contenant. En effet, des corrosions fissurantes, liées à la présence de condensats, se développaient en provoquant de nombreux accidents par rupture.

ARRETE DU 9 FEVRIER 1982

En raison de l'évolution de la construction des bouteilles forgées et du poids important des appareils construits suivant les prescriptions de l'arrêté de 1943, un cadre dérogatoire devait être créé.

Celui-ci reconsidère le calcul des enveloppes en assortissant cet allègement de mesures compensatoires :

— Caractéristiques des matériaux (précision sur les aciers et définition des alliages d'aluminium).

— Essais plus complets (essais mécaniques, essais d'éclatement à l'eau, essais de mise en pression répétés : 12 000 cycles à la pression d'épreuve).

Ainsi, la formule de calcul de l'épaisseur de la paroi de la bouteille se déduit de l'égalité :

$$P_h \frac{D - a}{a} = \frac{3}{2} R$$

P_h = Pression d'Epreuve Hydraulique

D = Diamètre extérieur nominal

R = La plus petite des deux valeurs R_e et $0,85 R_m$

$$\text{d'où } a = \frac{P_h D}{3/2 R + P_h}$$

soit pour la même qualité d'acier que précédemment (application numérique de l'arrêté de 1943).

$$a = \frac{300 \times 200}{3/2 \times 10 \times 850 + 300} = 4,6 \text{ mm}$$

Ici $R_e = 850 \text{ N/mm}^2$ et $0,85 R_m = 0,85 \times 1000 = 850 \text{ N/mm}^2$ (voir caractéristiques de l'acier choisi au § précédent).

Une distinction est faite entre les bouteilles en acier (titre II) et les bouteilles en alliage d'aluminium (titre III). En effet, l'acier constitue un matériel traditionnel très bien connu des métallurgistes (composition — diagramme Fer — Carbone — Traitements thermiques) alors que les alliages légers demeurent moins cernés.

Dans ces conditions, l'arrêté fixe, a priori, les alliages (2001, 5283, 6082) que le fabricant peut utiliser sans autorisation préalable. D'autre part, les tolérances sur les traitements (taux d'écroissage, température de mise en solution et de trempe), sont diminuées à cause de leurs influences importantes sur les caractéristiques du métal (on peut noter que certaines fabrications ont dû être retirées, suite à des problèmes des traitements thermiques — arrêté du 14 janvier 1976).

Dans l'état actuel, la majorité de nos bouteilles destinées à recevoir des gaz comprimés, est calculée et construite suivant cet arrêté. Néanmoins, le législateur définit un cadre dans lequel peut se mouvoir le fabricant, suivant ses propres connaissances des matériaux et son savoir-faire et rester, ainsi, le seul responsable de ses fabrications.

Cet aspect est d'ailleurs une constante de la réglementation française (et nous le verrons au chapitre suivant que cette remarque est aussi valable pour la réglementation Européenne).

1 — Directives du 27 juillet 1976

Déjà le 27 juillet 1976 la C.E.E. exprimait le désir de voir confirmer la réglementation sur les appareils à pression, dans sa directive n° 76-767 « *Concernant le rapprochement des Législations des Etats Membres, relatives aux dispositions communes aux appareils à pression et aux méthodes de contrôle de ces appareils* ».

Après définition des appareils concernés (« dans tout appareil fixe ou mobile sans réserve peut régner ou se développer une pression effective d'un fluide supérieur à 0,5 bar ») et le renvoi à des directives particulières pour leurs conceptions, leurs constructions et leurs contrôles, elle précise qu'aucun Etat Membre ne peut interdire, ni refuser la mise sur le marché, ou l'utilisation d'appareils à pression type C.E.E. (C.E., appareils construits suivant les prescriptions C.E.E.).

La directive prévoit, outre certaines clauses dérogatoires, l'adaptation possible des directives aux progrès techniques et des clauses de sauvegarde (un Etat Membre peut provisoirement interdire un appareil présentant des dangers, sous réserve d'une information immédiate de la Commission compétente).

Un code de marquage des appareils est défini (lettre *e*) avec symbole du pays.

2. — Directive C.E.E. n° 84-525

« *Concernant le rapprochement de législation des Etats Membres, relative aux bouteilles à gaz en acier, forgées* ».

Celle-ci s'applique aux enveloppes dont le volume intérieur est compris entre 0,5 et 150 l.

Son annexe 1 prévoit :

a — La définition des termes et symboles

(Définition des limites d'élasticité, pression de rupture, traitement thermique).

b — Le type d'acier

(défini par son élaboration et sa composition chimique, le traitement thermique)

L'acier utilisé doit être insensible au vieillissement.

c — Le calcul des parties sous pression :

* Epaisseur minimale

$$a = \frac{Ph \times D}{\frac{20 R}{4/3} + Ph}$$

D = Diamètre extérieur en mm

avec a = Epaisseur minimale de la bouteille en mm

Ph = Pression hydraulique d'épreuve en bar

R = La plus petite des 2 valeurs en N/mm²

(Re = limite d'élasticité (0,85 Rm avec Rm = constance de la traction pour les bouteilles trempées puis revenues

* *Epaisseur du fond :*

si convexe alors 1,5 a
si concave alors 2 a

* *L'épaisseur doit varier progressivement*

d — Les essais

— Essais sur les aciers, dureté BRINELL, traction, pliage, résilience (à — 20° C)

— Essai sur les bouteilles

Essai de rupture hydraulique (la pression de rupture mesurée doit être supérieure à :

$$Pr = \frac{20 a \times RM}{D - a}$$

Remarque : Pour l'exemple précédent la

$$Pr = \frac{20 \times 4,6 \times 1000}{200 - 4,6} = 471 \text{ b}$$

les essais montrent en effet des pressions de rupture supérieures à 500 b.

— Essai de pression répétée : 12 000 cycles à la pression d'épreuve, ou 80 000 cycles à 2/3 de la pression d'épreuve.

e — L'apposition des marques

Suivant code, avec indication du pays d'origine, de signe et marque de vérification et/ou d'agrément C.E.E., du type de traitement thermique, de la valeur de la résistance à la traction de l'acier utilisé, nom du fabricant, pression d'épreuve, numéro de fabrication, capacité en litres et masse de la bouteille en kilogrammes.

3. — Directive C.E.E. n° 84-526

« *Concernant le rapprochement des législations des Etats Membres relatives aux bouteilles à gaz forgées, en aluminium non allié et en alliage d'aluminium.*

A la différence de la directive 84-525 celle-ci précise de plus :

— Le type d'alliage d'aluminium à utiliser (2 types seulement)

— Les traitements thermiques et mécaniques (taux d'érouissage en particulier).

La règle de calcul de l'épaisseur minimale est la même.

$$a = \frac{Ph D}{\frac{20 R}{4/3} + Ph}$$

En revanche, les essais sur la bouteille sont complétés par des essais de corrosion et des essais de sensibilité à la corrosion sous tension (anneaux de tension soumis à la corrosion).

4. — Arrêtés d'application

Les arrêtés prévoient, en particulier, l'agrément des Organismes de contrôle, le marquage des bouteilles du type C.E.E. (conformes aux directives 525 — 526).

5. — Conclusions

Les textes C.E.E. s'inscrivent directement dans le prolongement de l'arrêté de 1982 :

— Même formule de calcul,
— Même base de contrôle.

En revanche, les essais sont élargis (corrosion pour les bouteilles en alliage d'aluminium) et plus poussés (essai de fatigue sur 80 000 cycles).

CONCLUSIONS

Notre métier de Sapeur-Pompier nous confronte à de nombreux domaines de l'activité industrielle, aussi bien pour nos propres équipements qu'au cours des interventions.

Ces facettes constituent probablement un attrait de notre activité mais imposent aussi une connaissance approfondie qu'il semble difficile d'acquérir dans l'ensemble des secteurs. Certes, nous n'appartenons pas à un bureau d'études et notre mission ne vise pas la conception, mais comment peut-on conserver un crédit vis-à-vis des professionnels de l'industrie si leurs problèmes nous sont totalement inconnus ?

Ainsi, ce court panorama de la réglementation sur les bouteilles à gaz forgées vise à brosser, rapidement, le contexte du réservoir sous pression. Il est fatalement incomplet et abandonne volontairement toute la partie réalisation industrielle qui intéresserait, à coup sûr, de nombreux lecteurs (c'est-à-dire, avec quoi, et comment doit-on faire un réservoir sous pression ? Type de l'alliage ? Traitement thermique ?).

Par ailleurs, il convient — au moment où l'existence de l'Europe devient réalité — de cerner plus précisément notre situation nationale. En effet, il est probable que dans un avenir proche, des constructeurs étrangers nous proposent des matériels concurrents et qui sont peut-être plus performants.

Ceci, d'autant plus que le réservoir sous pression constitue le handicap n° 1 de nos A.R.I. par le poids qu'il engendre.

Le porteur d'A.R.I., comme le Plongeur, rêve d'un appareil d'un poids insignifiant, d'un encombrement nul et d'une autonomie indéfinie.

Cette vision utopique n'en demeure pas moins une préoccupation de tous les responsables de la protection individuelle : doit-on passer à 300 bars ? Doit-on choisir des réservoirs frettés avec des fibres composites ?

Dans l'attente de cette évolution, nos réservoirs sont encore calculés suivant la base de la réglementation de 1943, avec néanmoins l'évolution considérable de l'arrêté de 1982. ■