

Les emboutis profonds ne sont pas si fragiles (*)

par R. Coutin et V. Escalup
(CETIM, Etablissement de Senlis)

Emboutir deux demi-coquilles, puis les souder bout à bout, est une façon économique de fabriquer de petits récipients à pression comme les extincteurs d'incendie ou les réservoirs pour petits matériels frigorifiques.

Malheureusement l'emboutissage profond dégrade les caractéristiques d'allongement de la tôle. Leur restauration par traitement thermique est exigée par la réglementation, ce qui retire beaucoup d'intérêt économique à la fabrication emboutie.

Tout tient en fait au risque de fragilisation qu'il s'agit de bien circonscrire. Et il existe des limites de déformation pour lesquelles les pièces pourraient être exemptées de traitement.

Les petits réservoirs à pression, à paroi d'épaisseur inférieure à 3 mm, peuvent être réalisés à partir de demi-coquilles obtenues par emboutissage profond de tôles laminées à froid définies par la norme NF A 36 401.

On peut ainsi fabriquer des extincteurs d'incendie ou des cartouches jetables de gaz butane avec une meilleure productivité que par le procédé associant deux calottes embouties et une virole roulée.

En effet les cadences d'emboutissage sont nettement supérieures à celles du roulage et de plus les longueurs à souder sont deux fois plus faibles (fig. 1).

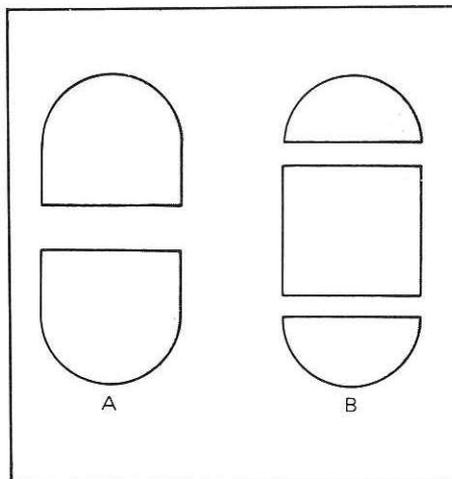


Fig. 1. La fabrication d'un petit récipient par emboutissage profond (A) est plus simple et plus rapide que par emboutissage et roulage (B).

Mais l'emboutissage profond présente un certain nombre d'inconvénients au regard de la réglementation en vigueur :

- les aciers permettant d'obtenir des emboutis profonds ne sont pas, aux termes de la normalisation, des aciers de construction. La norme NF A 36 401 prévoit cependant une valeur de R_m minimale garantie de 270 MPa ainsi qu'une composition chimique garantie qui répond à la circulaire du 24 mars 1978 relative au soudage des appareils à pression ;
- il s'agit de tôles minces sans garantie sur la valeur de la résilience ;
- l'emboutissage entraîne un écrouissage qui modifie les caractéristiques mécaniques du matériau et provoque en particulier une importante chute de la ductilité. La réglementation prévoit une ductilité minimale pour un appareil à pression : il doit être constitué d'un matériau dont l'allongement $A\%$ sera supérieur ou égal à une valeur définie suivant le type d'appareil ($A\% \geq 14$ pour les extincteurs).

Dans le cas des emboutis profonds, cette exigence n'est pas toujours respectée. Et même si l'expérience laisse à penser que ces appareils ou récipients ne sont pas dangereux, encore faut-il en faire la preuve. Les organismes chargés de faire appliquer la réglementation traitent ces problèmes cas par cas avec les entreprises concernées (cf. encadré 1).

Cet état de fait n'est pas sans conséquences économiques. Un récipient ne répondant pas aux conditions imposées sur l'allongement résiduel devra subir un traitement thermique restaurant les caractéristiques du ma-

(*) Synthèse du rapport 13 Y 313 : « Fragilisation des emboutis profonds en tôles minces ». Des résultats plus généraux sont également publiés dans le rapport 101530 : « Liaison entre les propriétés mécaniques des matériaux après mise en forme et les propriétés en service ».

tériau. Or ce traitement, réalisé sous atmosphère protectrice ou sous vide, ne peut pas être effectué à la même cadence que celle de l'emboutissage.

De plus la pièce doit généralement subir une opération de calibrage corrigeant les défauts de forme provoqués par le traitement. Ces contraintes entraînent un tel surcoût que l'emboutissage n'est plus compétitif : le prix des pièces peut plus que doubler !

Que la valeur de l'allongement soit inférieure à celle que fixe la réglementation, ne signifie pas pour autant que l'embouti présente des risques de rupture fragile. En effet, les critères retenus pour les tôles épaisses ne sont pas forcément applicables aux tôles minces.

Pour circonscrire les risques

Le CETIM s'est attaché à définir les limites de déformation pour lesquelles une pièce emboutie à froid ne présente aucun risque de fragilité et peut donc être exemptée de traitement thermique.

Le domaine de cette investigation couvre les tôles minces définies par la norme NF A 36 401, c'est-à-dire en acier doux pour formage à froid, obtenues par laminage à froid, d'épaisseur inférieure à 3 mm.

Le programme d'étude comportait différentes phases :

- caractérisation du matériau embouti par des essais de traction, de dureté et de résilience,

- caractérisation des emboutis vis-à-vis de la rupture fragile à différentes températures, par des essais d'éclatement sous pression. Ces emboutis ont été approvisionnés auprès de fabricants d'extincteurs,
- mesure des contraintes résiduelles sur les emboutis.

Evolution des épaisseurs

Il s'agit d'un contrôle de la répartition de l'épaisseur le long d'une génératrice.

Les mesures confirment, que dans un embouti profond, l'épaisseur minimale se situe toujours au niveau du raccordement entre le fond et la génératrice. Par conséquent, il faudra contrôler l'épaisseur de cette zone au cours des passes successives d'emboutissage.

POUR CONVAINCRE LES TÜV (*)

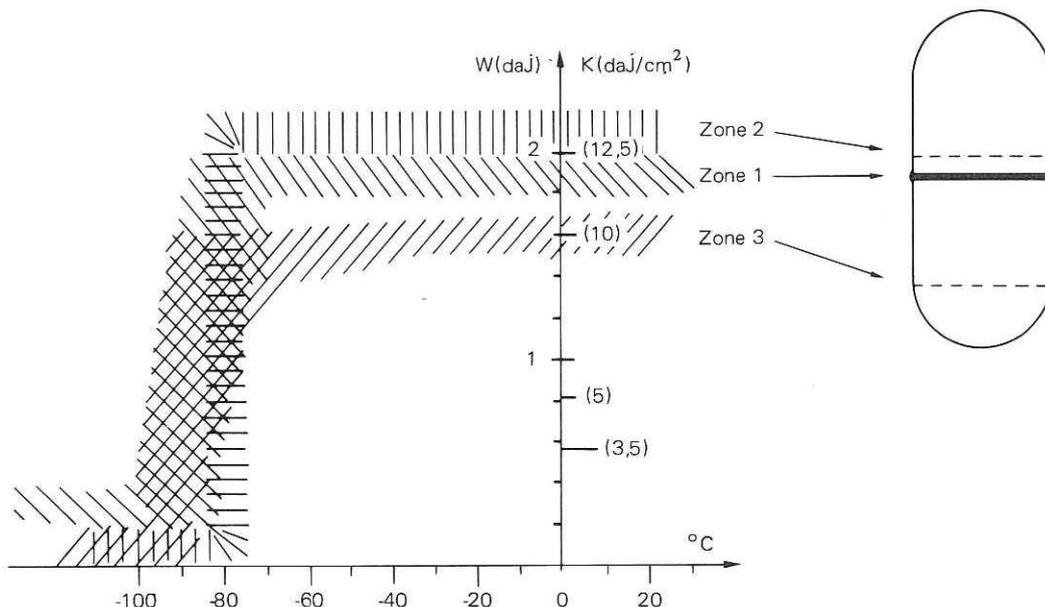
Un fabricant de petits appareils à pression s'est vu refuser l'entrée de ses produits en RFA à cause de l'absence de traitement thermique de ses pièces écrouies.

Les TÜV ont demandé des éléments pour juger des risques de fragilisation.

(*) Technischer Überwachungsverein.

La figure ci-dessous résume les résultats d'essais de résilience effectués sur des éprouvettes prélevées dans les zones les plus déformées (zone 2 et 3) et dans la zone affectée par la chaleur au niveau de la soudure (zone 1).

Les températures de transition relevées sont de l'ordre de -70°C . Au dessus de cette température, le risque de fragilisation est donc nul. Les TÜV ont jugé recevables ces conclusions du CETIM.



Déformations sur les emboutis

Il est essentiel de connaître le taux de déformation de l'embouti. Mais, sauf pour des cas particuliers comme les viroles soudées et les fonds bombés, la définition de la déformation n'est pas claire et de ce fait, sujette à interprétation.

Nous avons utilisé la déformation équivalente : $\bar{\epsilon}$, (encadré 2) dont divers travaux [1], [2], [3], ont montré la validité.

Evolution de la dureté en fonction de la déformation équivalente

Les duretés HV sont mesurées sur les génératrices des emboutis puis leur évolution exprimée en fonction de $\bar{\epsilon}$, en vue de trouver une corrélation entre ces grandeurs. Cette corrélation permettrait de caractériser la déformation de l'embouti par une simple mesure de dureté.

VISUALISATION ET CALCUL DES DÉFORMATIONS

Les déformations subies par la tôle sont visualisées par celles d'un réseau de cercles marqué à sa surface.

Après formage, un cercle de diamètre l_0 est transformé en une ellipse de grand axe l_1 et de petit axe l_2 , l'épaisseur passant de h_0 à h . On a alors :

— déformations algébriques :

$$e_1 = \frac{l_1 - l_0}{l_0} ; e_2 = \frac{l_2 - l_0}{l_0} ;$$

$$e_3 = \frac{h - h_0}{h_0}$$

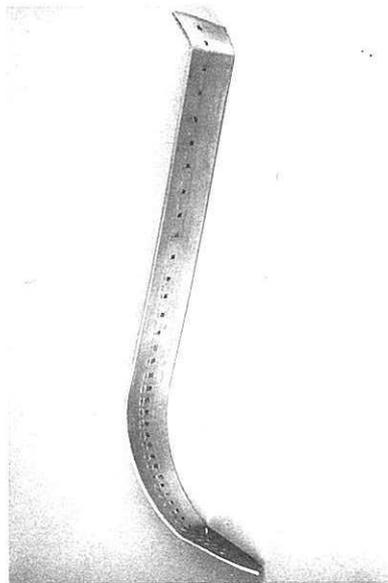
— déformations rationnelles :

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \ln(1 + e_1) ; \\ \epsilon_2 &= \ln(1 + e_2) ; \\ \epsilon_3 &= \ln(1 + e_3) ; \end{aligned}$$

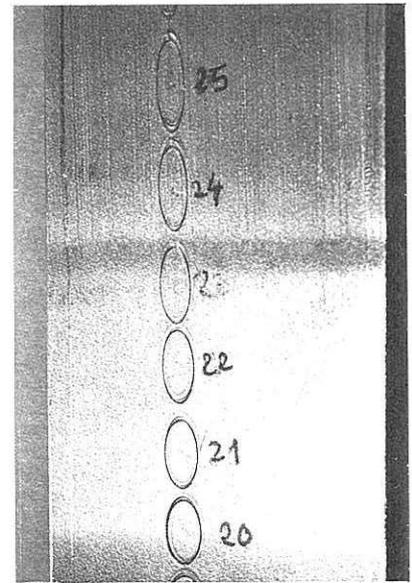
A partir des déformations rationnelles, on calcule la déformation équivalente en faisant l'hypothèse de la conservation du volume de métal :

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_1\epsilon_2 + \epsilon_2^2}$$

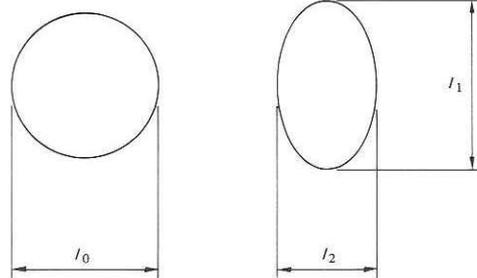
La déformation équivalente permet de comparer des états d'écroutissage obtenus par des procédés différents : emboutissage, traction, laminage, cintrage.



Portion d'embouti marquée d'un réseau de cercles.



Détail des cercles déformés.



Les résultats obtenues (fig. 2) et confirmés par d'autres travaux [1], font apparaître une trop grande dispersion. La mesure de la dureté n'est pas utilisable pour déterminer les déformations locales des emboutis.

Evolution des caractéristiques de traction en fonction de la déformation équivalente

La réglementation prévoit que les éprouvettes soient prélevées dans le sens de la génératrice. Mais compte tenu du gradient d'écouissage le long de l'embouti, elles ont été prélevées dans le sens perpendiculaire. Après prélèvement, les éprouvettes ont été redressées.

Le contrôle des propriétés mécaniques montre un abaissement de la limite d'élasticité, caractéristique de l'effet Bauschinger [6], [9], et des variations dans les valeurs de l'allongement dues principalement à la dispersion des mesures. Ces variations restent cependant limitées.

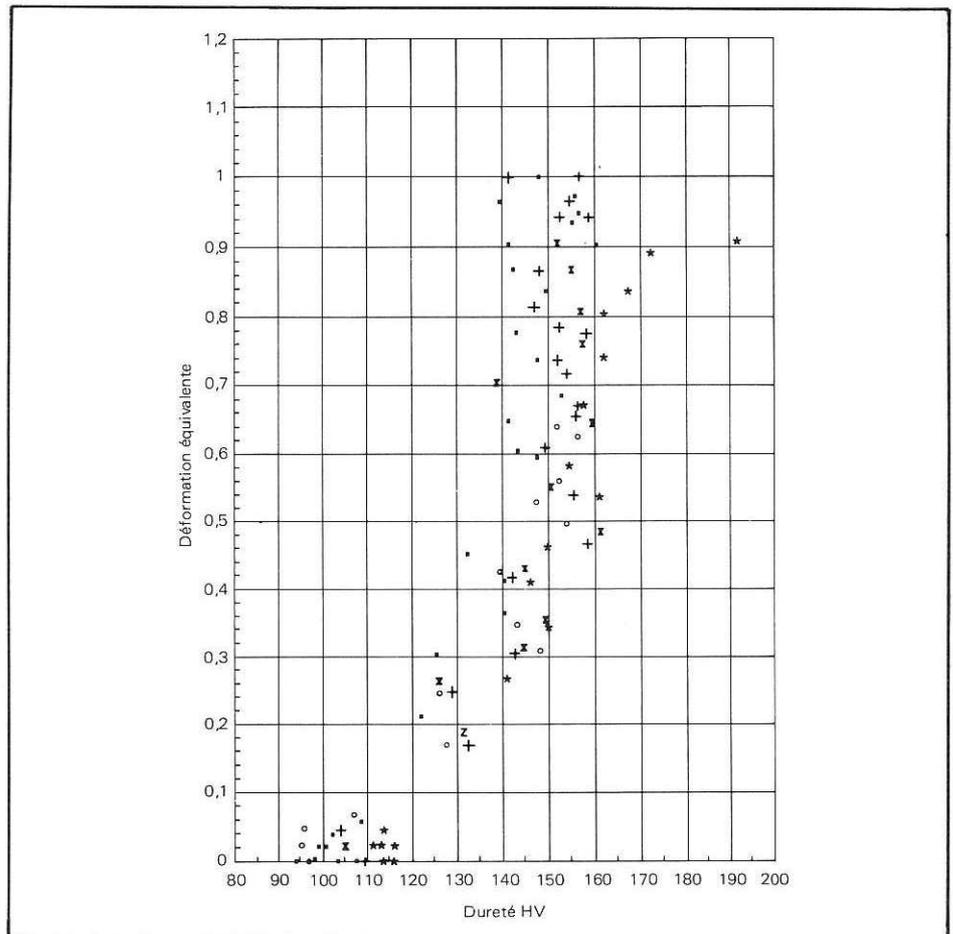


Fig. 2. Corrélation déformation/dureté : une dispersion trop grande.

Résistance à la rupture R_m et limite d'élasticité R_e

Le suivi de l'évolution de ces deux caractéristiques présente un intérêt certain. En effet, dans certains pays étrangers (RFA, Suède), c'est la résistance R_m après écouissage qui est prise en compte pour le calcul de l'épaisseur minimale de paroi des petits appareils à pression.

A cet égard (fig. 3), on peut noter que pour une déformation équivalente de $\bar{\epsilon} = 0,4$, l'accroissement de R_m est de l'ordre de 50 %. Dans les pays où cela est admis, ceci permet d'envisager une réduction d'épaisseur de l'ordre de 33 %.

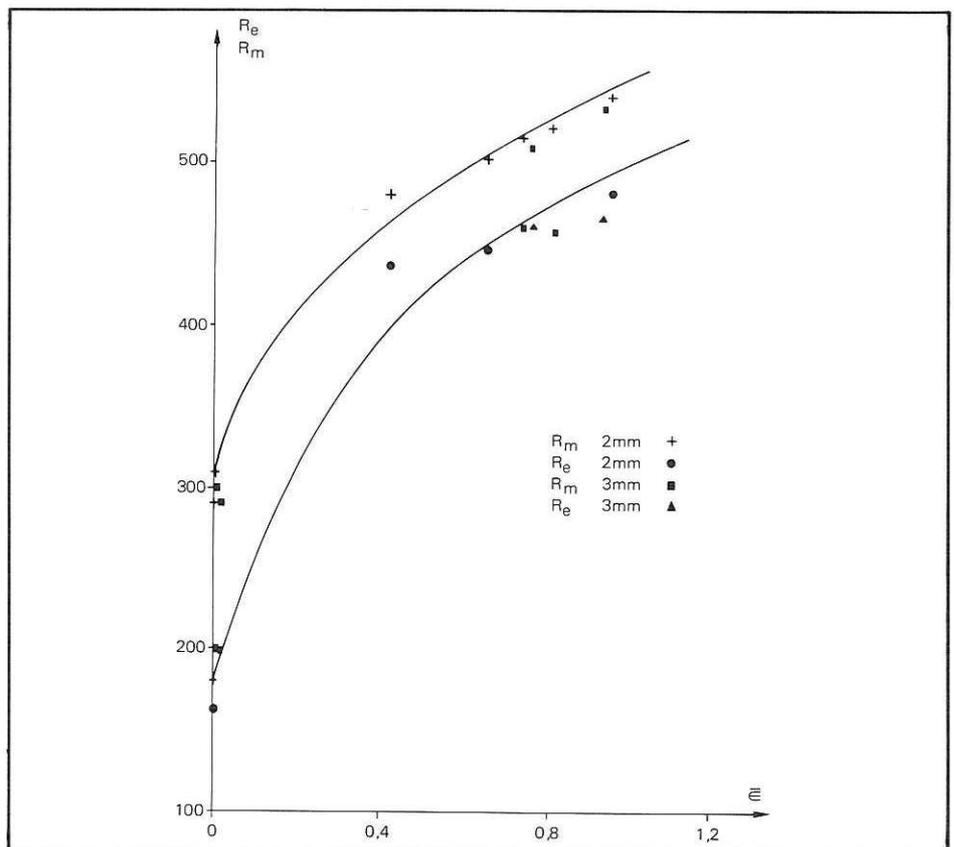


Fig. 3. Pour une déformation équivalente de 0,4, l'accroissement de la résistance à la rupture est de l'ordre de 50 %.

Allongement A% en fonction de $\bar{\epsilon}$

L'allongement A% est le critère retenu pour évaluer la ductilité du matériau qui constitue l'appareil.

Cet allongement subit une importante chute jusqu'à une déformation $\bar{\epsilon} = 0,4$. Ensuite il n'évolue pratiquement plus (fig. 4).

Température de transition par l'essai de résilience

L'essai de résilience permet de mettre facilement en évidence la ductilité d'un matériau. En toute rigueur, il ne s'applique qu'aux produits d'épaisseur égale ou supérieure à 10 mm et est admis jusqu'à 5 mm.

Cependant de nombreuses études ont été effectuées pour de plus faibles épaisseurs : elles montrent que la température de transition d'un matériau se déplace d'autant plus vers les basses températures que l'épaisseur du matériau diminue [4], [5]. Des essais sur un acier XC6 (tableau I) confirment bien cet effet.

TABLEAU I. La température de transition de l'acier XC6 recuit, évolue vers les basses températures quand son épaisseur diminue.

e (mm)	θ_T (°C)
10	$0 < \theta_T < 10$
3	$-60 < \theta_T < -55$
2	$-90 < \theta_T < -70$

Essais de résilience sur des éprouvettes prélevées sur les emboutis

Les niveaux d'énergie de rupture dans le domaine ductile sont pratiquement indépendants de la déformation équivalente $\bar{\epsilon}$ (fig. 5).

La température de transition du matériau est aussi quasi indépendante de $\bar{\epsilon}$ et se situe à -50°C pour une épaisseur de 2 mm et à -20°C pour 2,99 mm.

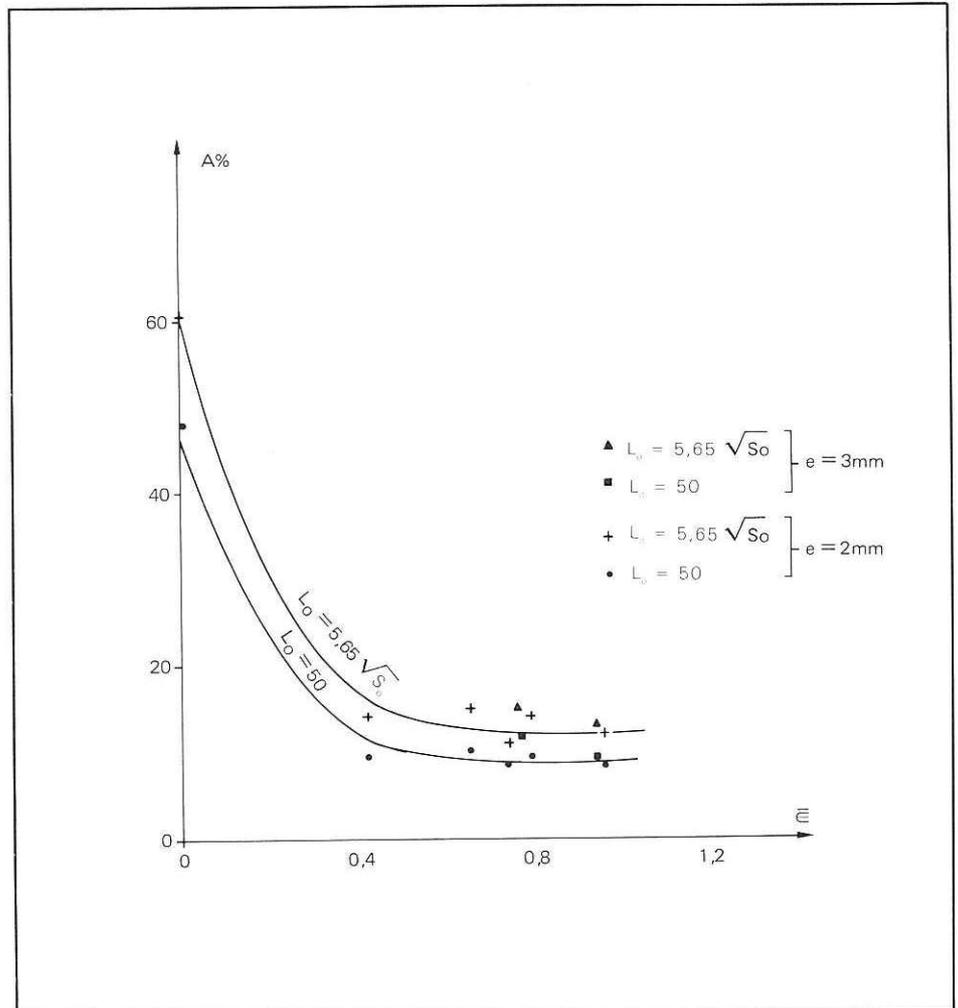


Fig. 4. L'allongement chute brutalement jusqu'à une déformation équivalente de 0,4 puis se stabilise.

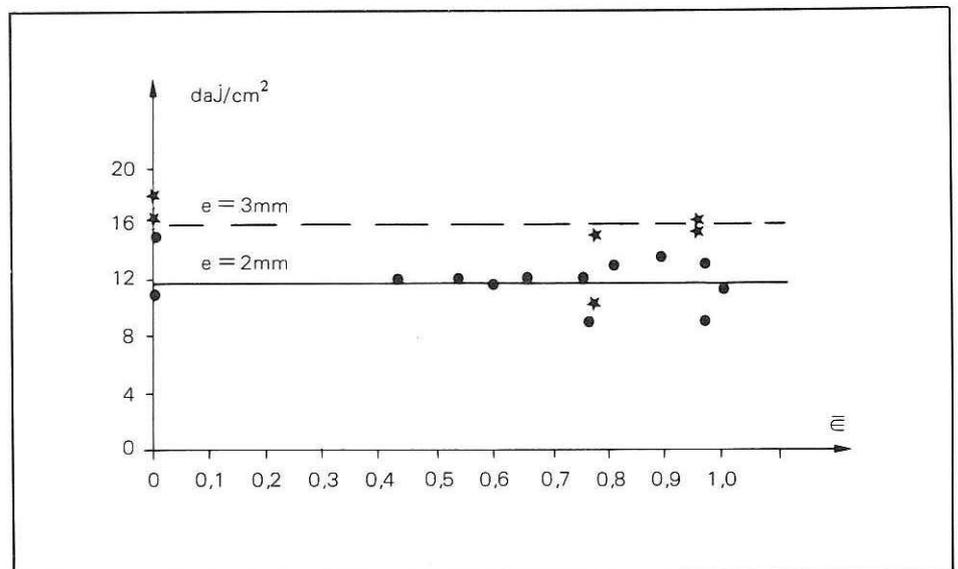


Fig. 5. Une énergie de rupture pratiquement constante.

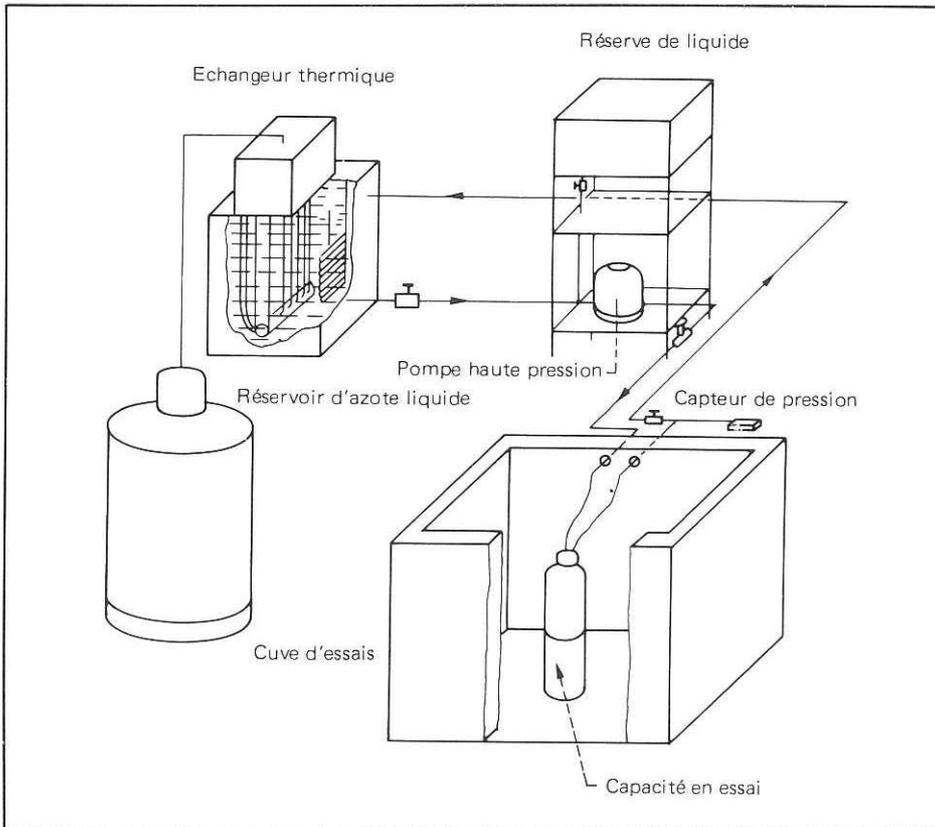
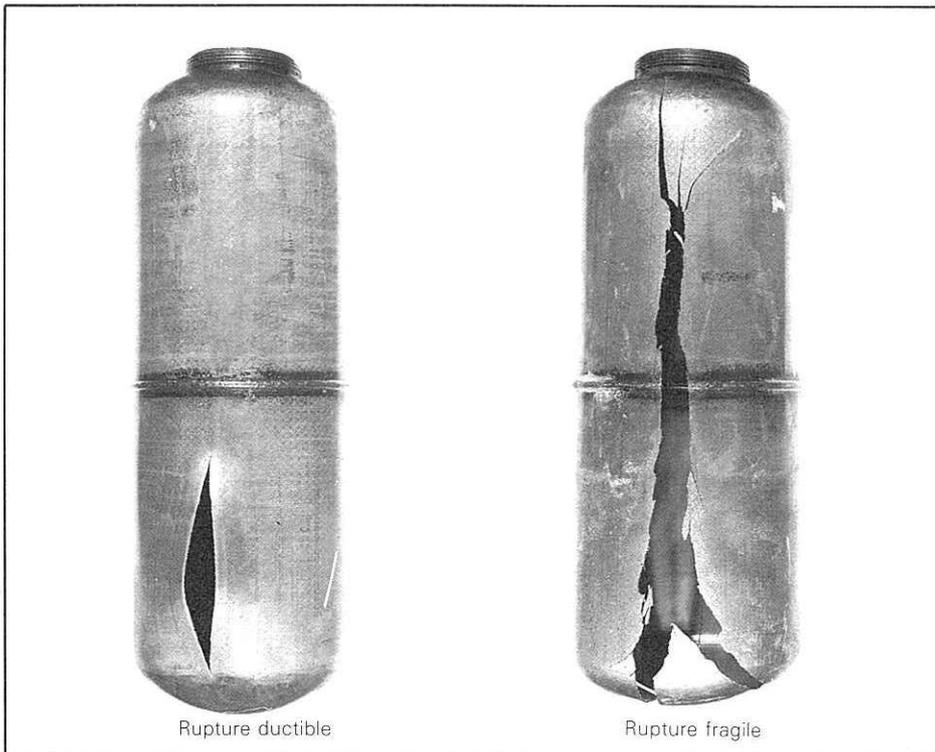


Fig. 6. Schéma de principe de la station d'essai d'éclatement pour appareils à pression, installée à Senlis. À notre connaissance c'est la seule de ce genre en France.



Température de transition sur capacités : -70°C

La température de transition considérée est celle pour laquelle la rupture est encore ductile à 100 %. Elle est déterminée par examen fractographique de la rupture provoquée par mise en pression jusqu'à éclatement, à différentes températures.

Ces essais ont nécessité la construction d'une station d'éclatement spécifique permettant de tester de 20°C à -100°C , sous une pression maximale de 1 000 bars, des capacités pouvant atteindre 500 l (fig. 6) [6].

Les résultats obtenus montrent que la rupture ne s'accompagne jamais de projection de morceaux rompus (fig. 7) et que la température de transition pour les capacités de 2 et 2,99 mm d'épaisseur est inférieure ou égale à -70°C .

Contraintes résiduelles sur les emboutis

Tout embouti profond non recuit est le siège de contraintes résiduelles caractérisées par leur intensité, leur signe et leur direction. Elles s'ajoutent aux contraintes de service et, suivant leur nature (traction ou compression), peuvent favoriser ou retarder la rupture.

Les contraintes résiduelles sur emboutis ont été mesurées par la méthode du trou [7]. Les résultats de ces mesures permettent les constats suivants :

- les contraintes résiduelles dans la paroi sont en traction et donc défavorables car de même signe que les contraintes induites par la pression dans l'enceinte,
- dans la majorité des cas, la contrainte principale dans la paroi est située pratiquement dans la direction longitudinale.

Fig. 7. La rupture, qu'elle soit ductile ou fragile, ne s'accompagne jamais de projection de morceaux rompus.

Le risque de rupture fragile est-il nul jusqu'à -50°C ?

L'emboutissage profond de tôles minces laminées à froid s'accompagne d'une importante chute de la valeur de l'allongement. Sans traitement thermique de régénération, ce procédé serait donc exclu pour l'obtention de petits appareils à pression.

Cependant les températures de transition ($< -50^{\circ}\text{C}$) déterminées par prélèvements sur les emboutis

montrent que le matériau n'est pas fragilisé dans les proportions que laisserait prévoir la chute de l'allongement. Et sur les emboutis eux-mêmes, elles sont encore plus basses : $< -60^{\circ}\text{C}$. Ceci confirme l'absence de risque de rupture fragile aux températures de service les plus courantes : -20°C ou -40°C .

Ces travaux n'ont pas permis d'établir une corrélation entre température de transition du matériau et température de transition de l'embouti. Mais ils laissent par contre entrevoir la possibilité de reconsidérer les limites du critère de ductilité retenu par la réglementation.

Sur des appareils à pression simple, de faible épaisseur, obtenus par emboutissage profond de tôles laminées à froid, le critère $A\% > 14-16$ sous-évalue la ductilité résiduelle de l'appareil. Et l'on pourrait décider que, pour des emboutis dont la déformation équivalente $\bar{\epsilon}$ est inférieure à 1, un traitement thermique de post-formage n'est pas nécessaire. ■

Bibliographie

- [¹] Tôles laminées à chaud en acier extra doux et micro alliés. Etude CETIM 13Y364.
- [²] Tôles formées à froid : choix du traitement thermique en fonction de la déformation. *CETIM-Informations*, n° 68, 1980.
- [³] Détermination des déformations engendrées par les opérations de formage des tôles épaisses. *CETIM-Informations*, n° 72, 1981.
- [⁴] RADEKER W. — Einfluss der Probenbreite auf die Ergebnisse der Kerbschlagprüfung. (Influence de la largeur de l'éprouvette sur les résultats des essais de résilience), *Materialprüfung*, n° 10, octobre 1963.
- [⁵] SCHOENHERR W. et WILKEN K. — Kerbschlagzähigkeit dünner Bleche (Résilience des tôles minces) — *Mitteilungen der D.F.B.O.*, vol 21, n° 4, avril 1970.
- [⁶] Fragilisation des emboutis profonds en tôles minces : Etude et mise au point d'une station d'éclatement. Etude CETIM 43Y313.
- [⁷] CHABENAT A. et MARTIN R. — La mesure des contraintes résiduelles. Méthode de Mathar et Soète. Méthode de Sachs — *Mémoire technique du CETIM* n° 24, 1975.
- [⁸] BAUSCHINGER J. — Changement de la limite élastique sous l'effet de variations cycliques de l'effort — *Mitt. Mech. Technischen Laboratorium München*, Vol. 13, 1886.
- [⁹] BOUHELIER C., MAREZ Y., LECROISEY F. — L'effet Bauschinger dans les tôles roulées à froid — *CETIM-Informations*, n° 54, 1978.