

PRÉSIDENCE DU CONSEIL  
COMMISSARIAT A  
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

## **SOUDAGE DES METAUX SOUS VIDE**

par

J. A. STOHR - J. BRIOLA

Rapport CEA No **785**

CENTRE D'ÉTUDES  
NUCLÉAIRES DE SACLAY  
SERVICE DE DOCUMENTATION  
Boîte postale n° 2 - Gif-sur-Yvette (S.-et-O.)

- Rapport C.E.A. n° 785 -

Service de Technologie

SOUDEGE DES METAUX SOUS VIDE

par

J.A. STOHR ET J. BRIOLA

- Décembre 1958 -

# Soudage des métaux sous vide

Le procédé de soudage sous vide décrit dans la communication ci-après a été mis au point au Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.) en France.

Les numéros des brevets français sont les suivants :

D 84 — PV 706704 du 19 janvier 1956.

1<sup>er</sup> additif D 162 — 84 a — PV 58157  
du 29 décembre 1956.

M. J.A. Stohr, Chef du Service de Technologie au C.E.A., a fait le premier exposé en public de ce procédé de soudage au Symposium Technique sur les Eléments Combustibles, tenu à Paris du 18 au 23 novembre 1957.

Une seconde conférence a eu lieu lors de la Journée du Vide tenue le 4 février 1958, à Paris.

★★

## Introduction.

Le soudage par fusion de certains métaux ne peut être effectué sans précautions spéciales à l'aide des procédés classiques tels que le soudage en atmosphère d'argon avec électrode réfractaire, sous peine de voir altérer profondément les caractéristiques du métal.

C'est ainsi que l'on a été conduit, pour le soudage du zirconium par exemple, à la réalisation de chambres à atmosphère contrôlée, remplies d'argon ou d'hélium.

Les problèmes de production soulevés par de telles chambres sont complexes. Il faut en effet charger la chambre, faire le vide, remplir la chambre de gaz et effectuer la soudure. Le maintien de la pureté du gaz et la non pollution des parois de la chambre par de la vapeur d'eau, nécessaires à l'obtention de soudure de qualité, posent également des problèmes difficiles.

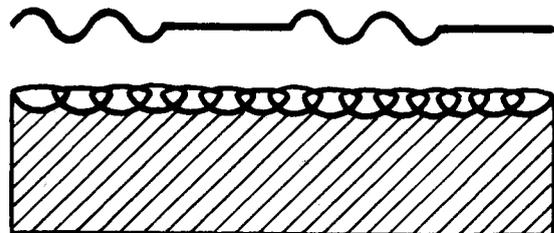
Une grande partie des difficultés rencontrées disparaissent si l'on peut utiliser le vide au lieu d'une atmosphère contrôlée.

Les avantages résultant de l'utilisation du vide sont :

- contrôle aisé de la pression de travail,
- absence de manutention de gaz,
- économie notable due à la non utilisation de gaz relativement purs ; les impuretés de l'argon de la plus haute qualité sont en effet de l'ordre de 50 parties pour un million (oxygène et vapeur d'eau).

L'utilisation du vide ne permettait d'envisager comme source de chaleur que l'utilisation d'électrons accélérés. Cette source de chaleur avait déjà été utilisée pour alimenter des fours de fusion, pour le chauffage d'échantillons dans certains cas particuliers tels que microscope à platine chauffante, et dans la réalisation d'appareils destinés à la purification des métaux.

Fig. 1. — Forme du courant primaire haché provoquant une soudure par points successifs dans le cas de métaux à forte tension de vapeur.



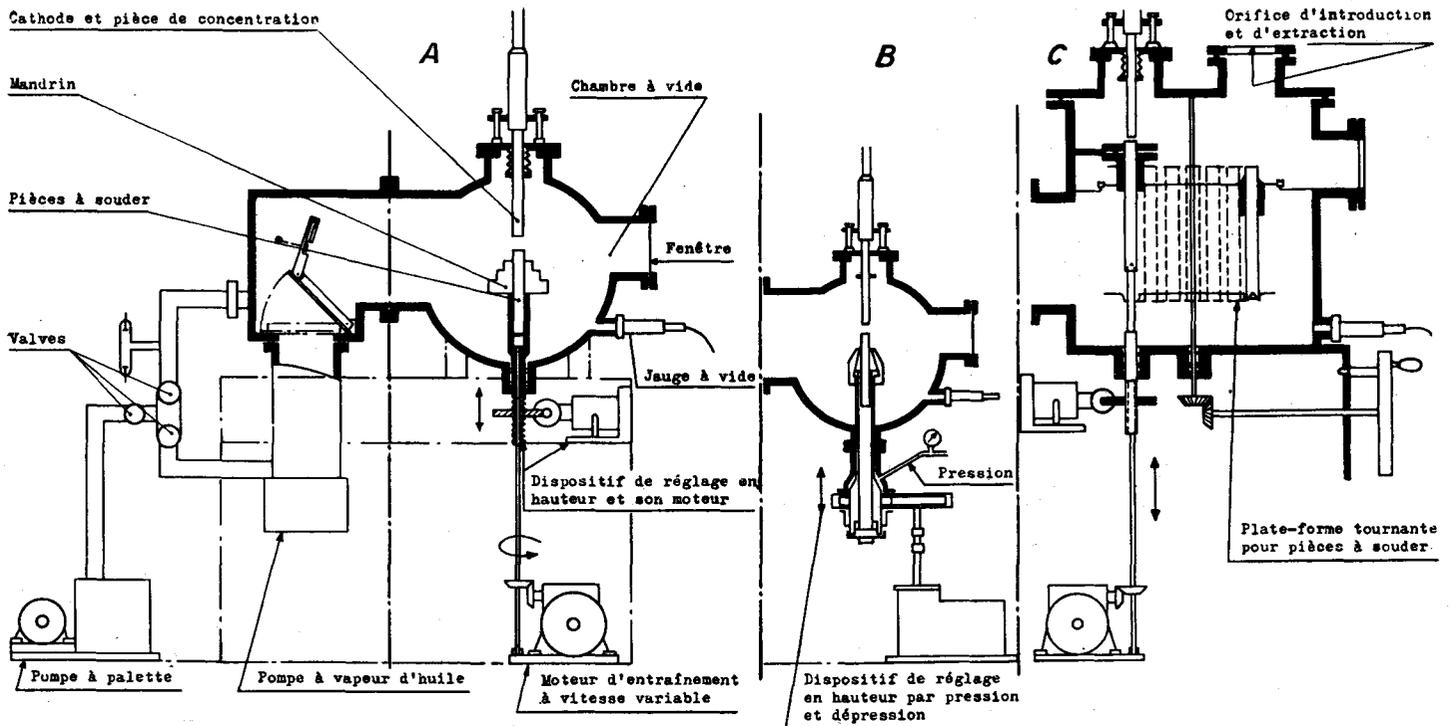


Fig. 2. — Schéma de l'appareil de soudage électronique sous vide. Les croquis B et C montrent les variantes du dispositif d'entraînement des pièces à souder.

### Soudage par faisceau d'électrons.

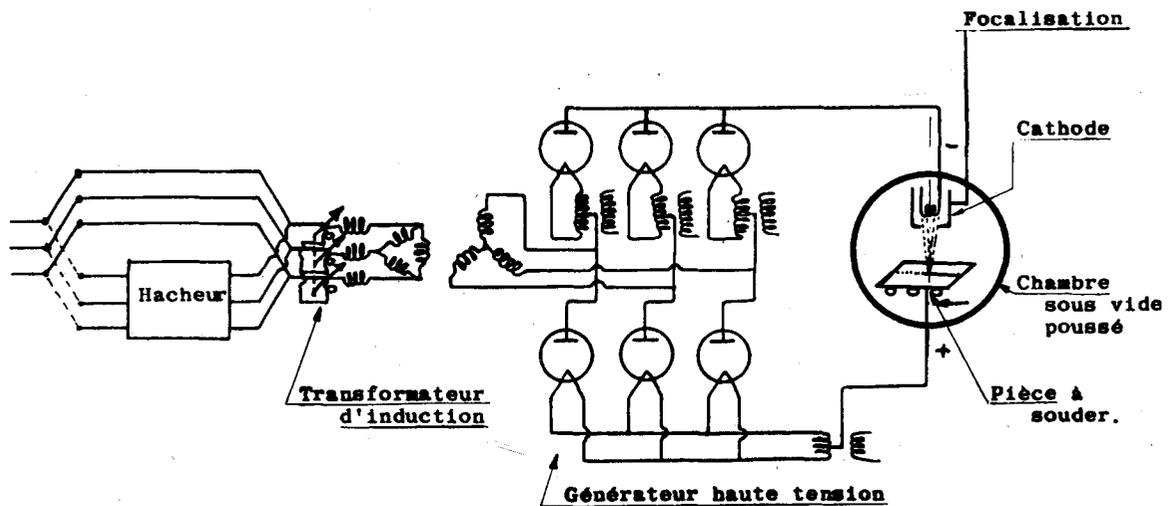
Les moyens de production, d'accélération et de focalisation des électrons sont trop connus pour être décrits ici.

Il est facile de produire, sur un obstacle placé sur le trajet d'un faisceau d'électrons, un point d'impact ayant une surface de dimension déterminée. Sur cette surface sera dissipée une énergie dépendant du nombre d'électrons la frappant par unité de temps, et de leur énergie cinétique, c'est-à-dire pratiquement de l'intensité du courant et de la tension d'accélération.

Si l'on déplace la surface d'impact le long d'une ligne correspondant à la ligne de séparation de deux pièces à assembler par soudage, par exemple, il est possible de fondre le métal le long de cette ligne et d'obtenir ainsi sous vide une soudure continue, identique à celle que l'on obtient en soudage en atmosphère d'argon ou d'hélium avec électrode réfractaire ou même avec un chalumeau oxyacétylénique.

La puissance unitaire, exprimée en Watt/cm<sup>2</sup>, qu'il est possible d'obtenir à l'aide d'un tel dispositif est considérable et permet de réaliser des soudures de types très différents.

Fig. 3. — Schéma du circuit d'alimentation électrique.



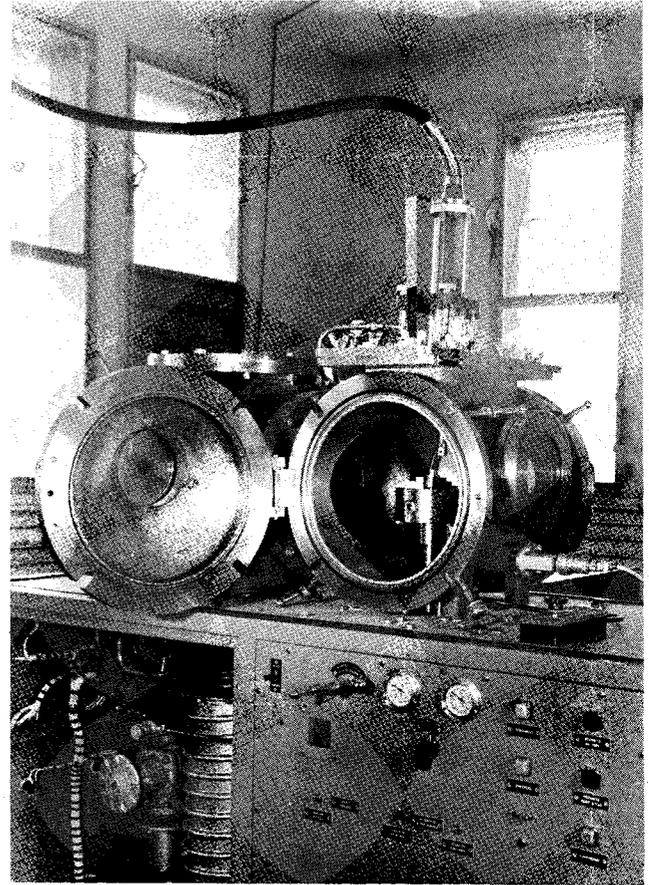
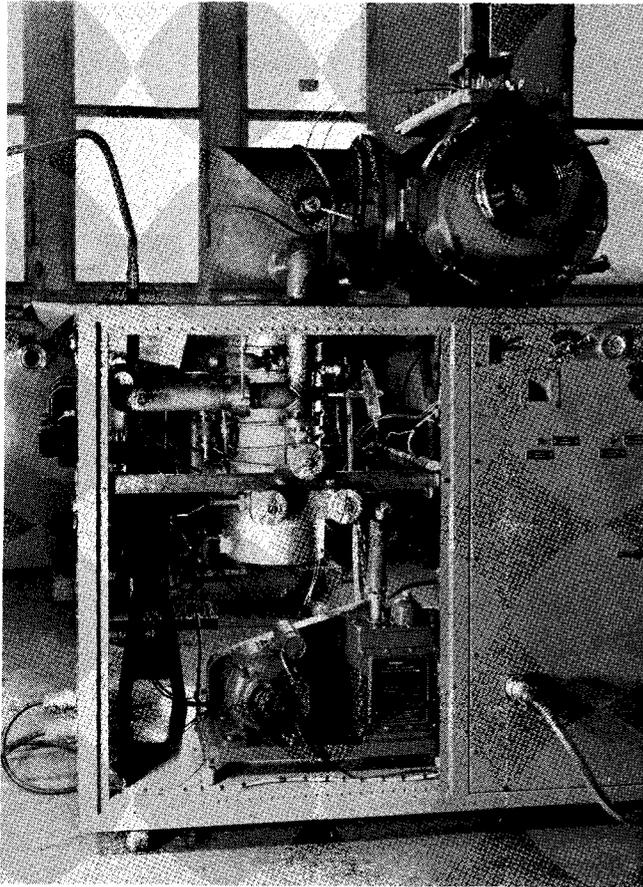


Fig. 4 et 5. — Vue de l'appareil de soudage et de la chambre de vide.

Si l'on considère le soudage de pièces très minces, il est possible de réaliser sans difficulté un point d'impact de  $0,1 \text{ mm}^2$  par exemple — ce qui assure une précision d'assemblages que ne permettent ni le soudage en atmosphère d'argon ou d'hélium, ni, *a fortiori*, le chalumeau. Enfin, le fait que la soudure soit exécutée sous vide empêche toute oxydation et toute détérioration du matériau.

Si l'on considère le soudage de pièces plus épaisses, il est possible de réaliser, sur un point d'impact de  $6 \text{ à } 8 \text{ mm}^2$ , une dissipation d'énergie considérable :  $5 \cdot 10^4$  Watts, par exemple.

Dans tous les cas, la localisation d'énergie et l'utilisation du vide comme milieu ambiant permettent d'améliorer les soudures par rapport à celles qui sont obtenues par les autres procédés.

Dans le cas de métaux réfractaires (tels que tungstène, molybdène, tantale) ou très oxydables (tels que zirconium, béryllium, uranium), les résultats obtenus sont remarquables.

#### Limitation de la méthode.

La puissance qu'il est possible de dissiper sur la surface d'impact dépend des possibilités d'accélérer les électrons, c'est-à-dire de la tension existant entre électrodes. Le maintien de cette tension n'est possible que si aucune ionisation n'apparaît. L'ionisation dépend, dans ce cas, des possibilités de choc entre les atomes de métal vaporisé et les électrons provenant de la cathode.

Pour une géométrie donnée, elle dépendra donc essentiellement de la nature du métal à souder et de la dimension de la surface d'impact.

Pour une température donnée, celle de fusion par exemple, la quantité  $Q$  de métal vaporisé par unité de surface est :

MÉTAL	$Q \text{ g/cm}^2/\text{s}$	TEMPÉRATURE °C
Al	$< 10^{-8}$	660
Zr	$2 \cdot 10^{-6}$	1 750
Ta	$1,4 \text{ à } 1,3 \cdot 10^{-5}$	2 996
W	$1,4 \cdot 10^{-4}$	3 382
Be	$4,4 \cdot 10^{-5}$	1 280
Mg	$> 10^{-3}$	650

La quantité  $QS$  (où  $S$  est la surface du point d'impact) va définir le nombre d'atomes de métal vaporisé par  $\text{cm}^3$  et, par conséquent, la probabilité d'ionisation sur le trajet des électrons, probabilité qui augmente lorsqu'on se rapproche du point d'impact.

Dans le cas de métaux tels que le magnésium, donnant une très grande quantité de vapeur métallique par unité de temps, l'interruption du courant d'anode assurant, avec une vitesse de déplacement convenable, une soudure par points successifs se recouvrant (fig. 1) permet d'éviter

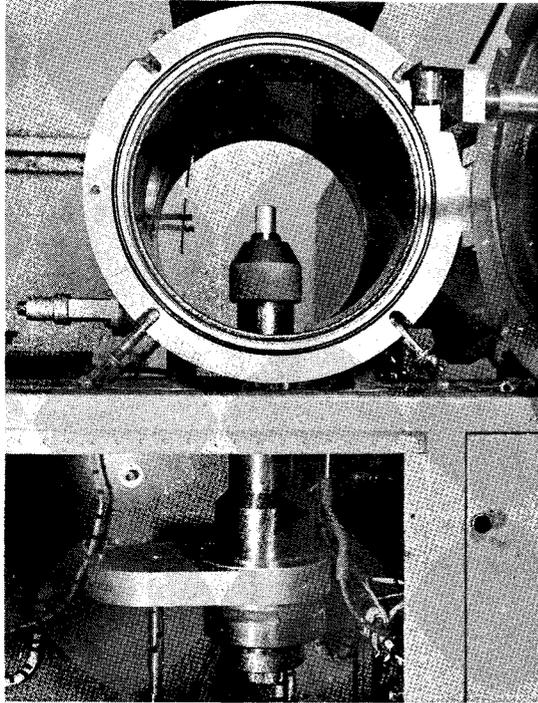


Fig. 6. — Montage pour le soudage de cartouches d'élément combustible.

l'établissement d'un régime d'arc et d'effectuer la soudure en régime électronique.

#### DESCRIPTION D'UN APPAREIL DE SOUDAGE ÉLECTRONIQUE.

La figure 2 représente un appareil de soudage qui a été réalisé pour l'exécution de soudures de révolution, par exemple la soudure d'embouts de tubes ou d'éléments combustibles cylindriques destinés à divers réacteurs du Commissariat à l'Énergie Atomique.

Ce poste est composé d'une chambre en acier inoxydable dans laquelle le vide est réalisé par :

- une pompe à palette d'un débit de  $90 \text{ m}^3/\text{h}$ , qui abaisse rapidement la pression atmosphérique à  $10^{-1} \text{ mm}$  de mercure ;
- un groupe de pompage constitué par une pompe à condensation d'un débit de  $900 \text{ l/s}$  à  $10^{-4} \text{ mm Hg}$  et une pompe à palette ayant un débit suffisant à la pression d'amorçage de la pompe à condensation pour assurer correctement le fonctionnement de cette pompe ;
- des jeux de vannes permettant la commutation de la pompe à palette à gros débit et du groupe de pompage ;
- les vannes et accessoires divers de mesure de pression habituellement utilisés sur une installation à vide entretenu.

A l'intérieur de cette chambre se trouvent :

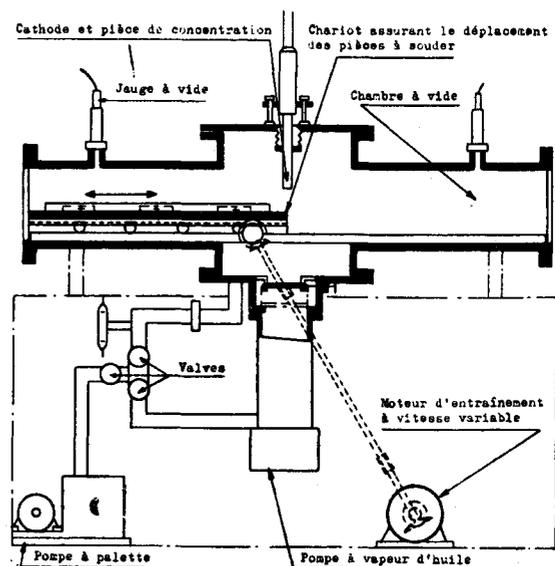
- le canon à électrons, dont la position peut être réglée d'une manière grossière le poste étant arrêté et d'une manière fine pendant le fonctionnement. Ces deux réglages permettent de placer le point de focalisation au point voulu de la ligne de soudure ;
- le dispositif de rotation de la pièce, constitué par un mandrin entraîné par un moteur à vitesse réglable (la régulation de vitesse est assurée par un relais type Dynatrol, comportant un thyatron) ; un second dispositif, constitué par une crémaillère entraînée par un petit moteur, permet de régler la hauteur du mandrin par rapport au canon à électrons.

Un redresseur triphasé (fig. 3) assure l'alimentation H.T. La tension est réglable de 0 à 60 000 volts ; pratiquement, la tension utilisée en cours de soudage est comprise entre 10 000 et 14 000 volts. Une tension réglable permet de fixer le potentiel de la pièce de focalisation, dans le cas où la concentration électrostatique du faisceau est utilisée. Les essais effectués avec un moyen de concentration électromagnétique montrent que cette solution est plus souple.

Un hacheur de courant à thyatrons permet d'effectuer la soudure par points successifs se recouvrant. Le hachage du courant permet :

- d'obtenir une plus grande pénétration de la soudure ;
- d'éviter l'affaissement des bords par effondrement du métal fondu ;

Fig. 7. — Dispositif utilisé pour le soudage longitudinal de tubes ou de tôles.



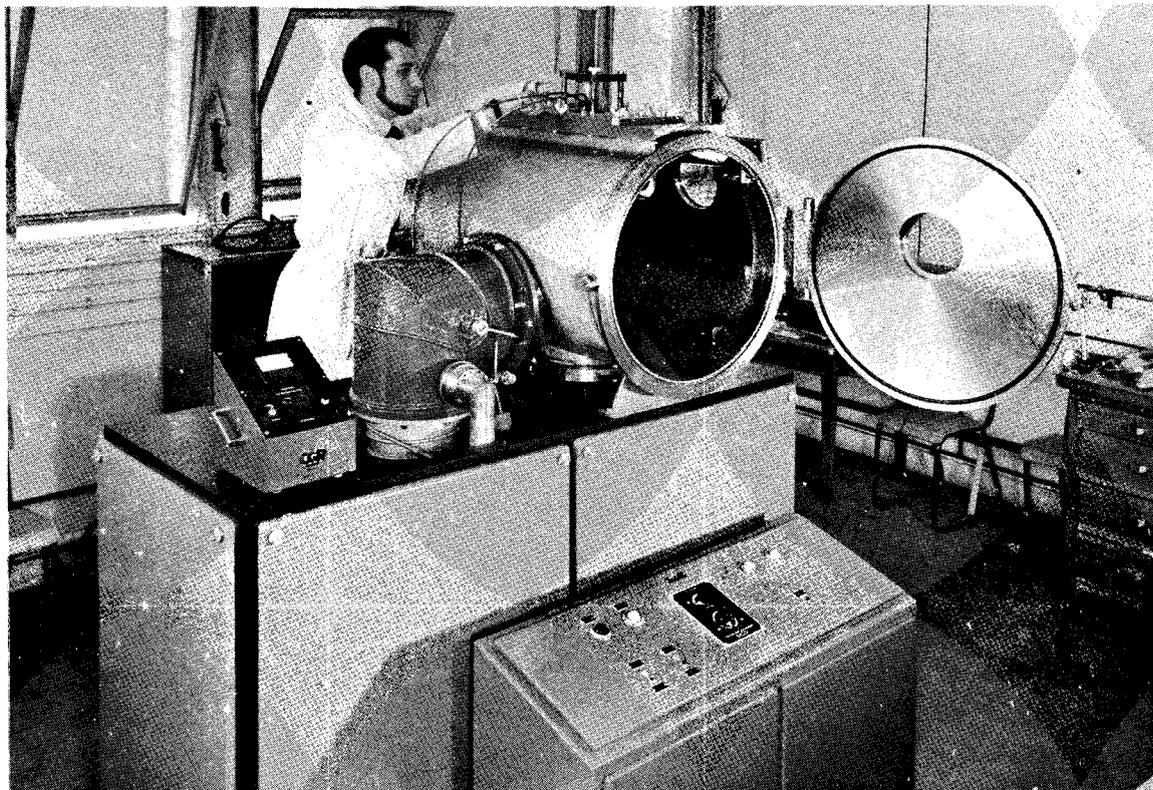


Fig. 8. — Appareillage permettant l'exécution des divers types de soudures.

— de pouvoir souder des métaux à forte vaporisation ou, dans le cas d'un métal donné, de pouvoir fondre une plus grande surface de métal. Ceci n'est toutefois possible que si le rapport :

$$\frac{\text{temps de soudage}}{\text{temps de soudage} + \text{temps de repos}}$$

est de valeur faible, ce qui nécessite une faible vitesse d'avance ou de rotation pour obtenir le recouvrement des points.

Les figures 4 et 5 représentent deux vues de l'appareil de soudage.

Une modification de la partie d'entraînement des pièces à souder a été effectuée pour permettre la réalisation des soudures de fermeture des éléments combustibles. L'élément combustible, constitué par une gaine dans laquelle a été placé le barreau d'uranium, est introduit par la partie inférieure (fig. 2 B et fig. 6) ; une fois le vide réalisé à la pression de travail, soit  $10^{-5}$  mm Hg, le bouchon est mis en place par un poussoir et la soudure effectuée.

Ceci permet de réaliser à la fois la soudure et le vide à l'intérieur de la gaine. La gaine étant

ensuite appliquée par pression hydrostatique à chaud, on évite la réaction de l'oxygène avec le barreau d'uranium.

Pour abaisser le prix de revient, un dispositif à barillet (fig. 2 C) est en cours de réalisation. Il sera ainsi possible d'exécuter 30 soudures consécutives sans avoir à effectuer de rentrée d'air ni à refaire le vide entre chaque soudure.

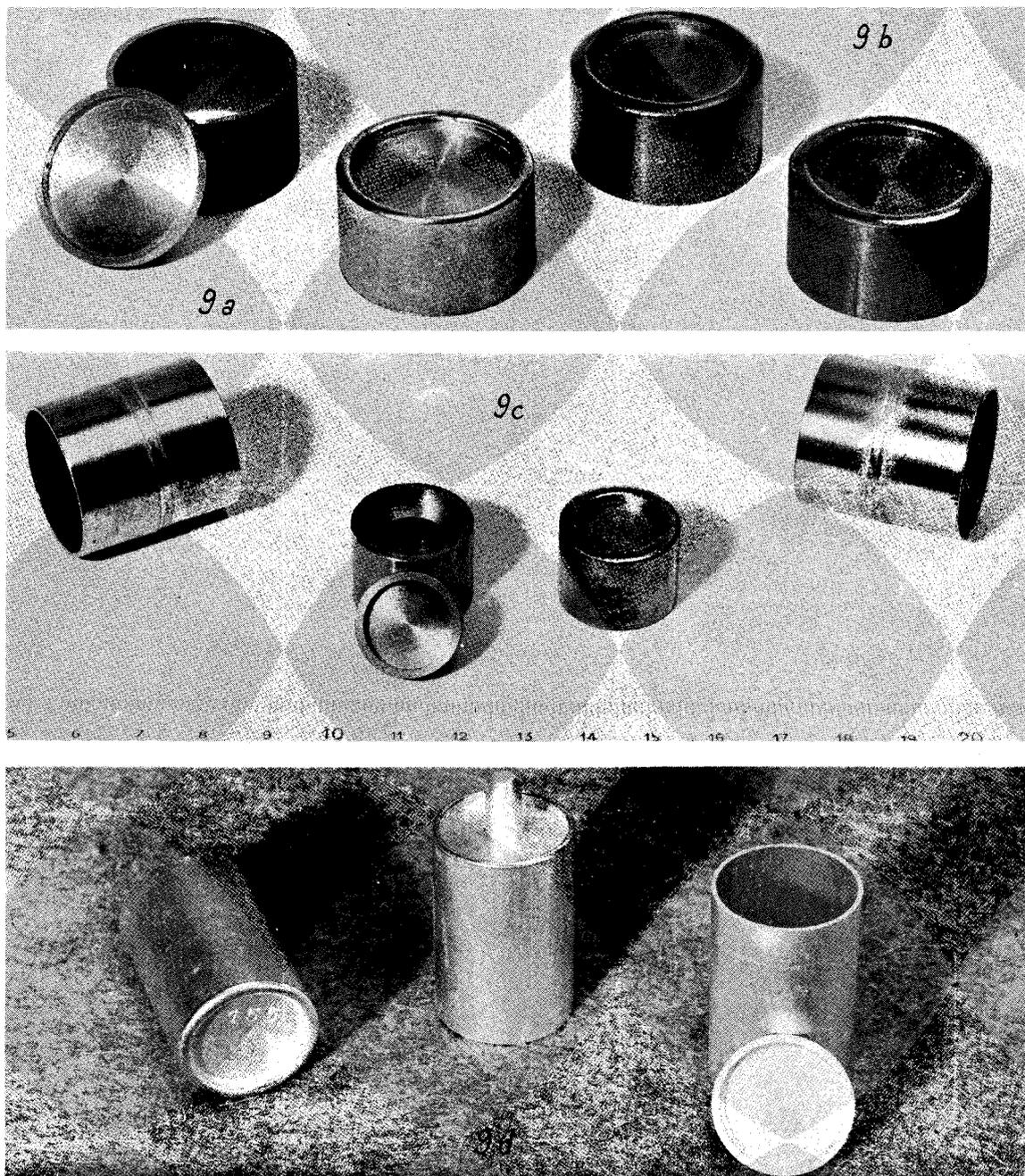
La figure 7 montre le dispositif utilisé pour le soudage de tôles et de tubes le long d'une génératrice. Le dispositif de rotation du poste initialement décrit est remplacé par un dispositif de translation.

La figure 8 montre un poste permettant d'exécuter tous les types de soudures, par rotation ou translation.

#### QUELQUES TYPES DE SOUDURES RÉALISÉES.

Les figures 9 a à 9 d montrent successivement des soudures effectuées sur éléments tubulaires de zirconium, d'uranium de béryllium et d'aluminium.

La figure 9 e montre un exemple de soudage des éléments combustibles du réacteur EL.3 de Saclay. L'élément combustible est constitué par une gaine en aluminium contenant un barreau d'uranium ;



**Fig. 9. — Exemples de soudures exécutées sur différents métaux :  
a) zirconium, b) uranium, c) beryllium, d) aluminium.**

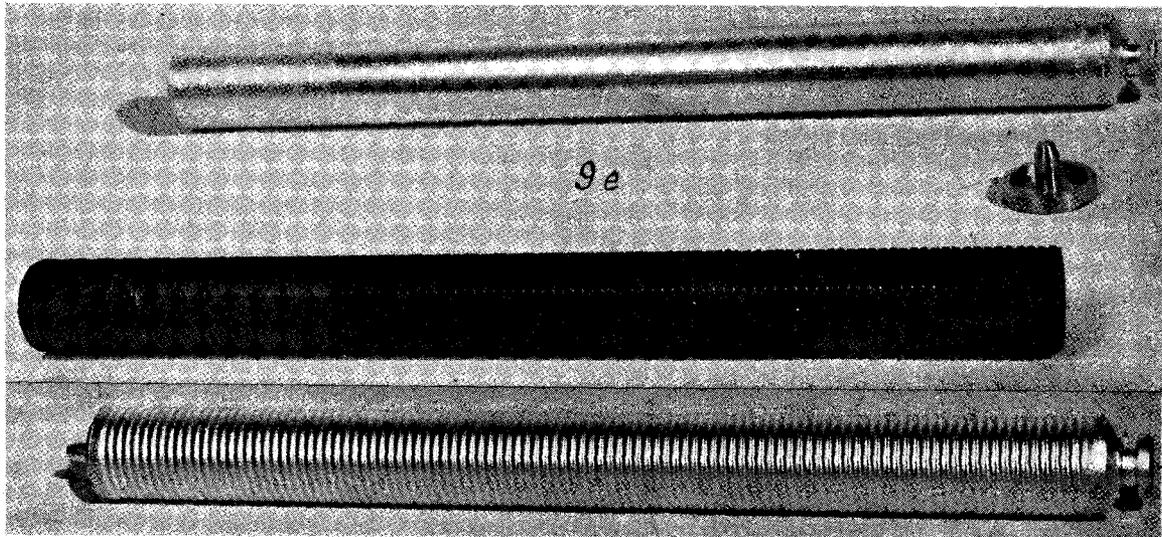
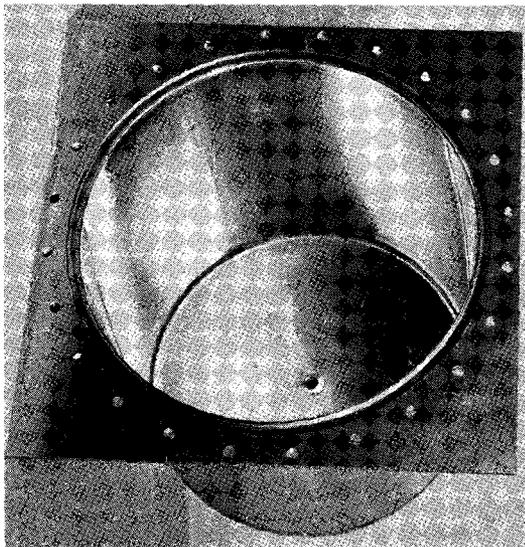


Fig. 9 e. — Constituants d'une cartouche d'élément combustible (gaine, barreau et bouchon) et cartouche une fois terminée.

Fig. 10. — Cuve en zirconium, entièrement soudée par le procédé de soudage électronique sous vide.



cette gaine est fermée par un bouchon en aluminium, soudé par le procédé décrit ci-dessus.

La figure 10 représente la cuve en zirconium du réacteur homogène « Proserpine » de Saclay. Cette cuve comporte une soudure longitudinale, la soudure du fond repoussé, la soudure d'un tube raccordé au fond de la cuve, enfin la soudure de la bride supérieure. Toutes ces soudures ont été effectuées dans le poste représenté figure 8.

#### Conclusions.

Le procédé de soudage sous vide présente de nombreux avantages lorsqu'il est nécessaire de protéger le métal des actions de l'atmosphère.

La possibilité de concentrer sur des surfaces de très faibles dimensions une énergie considérable permet de réaliser des soudures fines et précises, impossibles à obtenir par tout autre procédé assurant la fusion du métal.

La localisation d'énergie permet également d'éviter un échauffement trop général de la pièce, d'éviter des distorsions et de réaliser des assemblages de précision.

La propreté chimique de l'opération offre un grand intérêt dans des industries telles que l'Énergie Atomique ou la fabrication de tubes électroniques.

