

(72) MAUGENDRE, Stéphane, FR

(72) MASSART, Tanguy, FR

(72) SZALATA, François, FR

(71) ISOVER SAINT-GOBAIN, FR

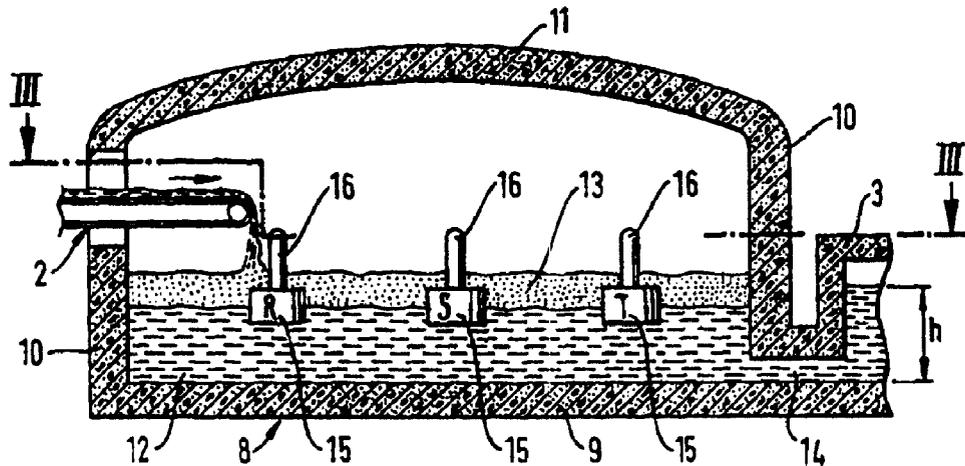
(51) Int.Cl.⁶ C03B 5/03, C03B 37/04

(30) 1997/07/22 (97/09302) FR

(30) 1998/05/19 (98/06323) FR

(54) **FOUR A VERRE ET INSTALLATION COMPRENANT LE FOUR**

(54) **GLASS FURNACE AND INSTALLATION COMPRISING SAME**



(57) L'invention concerne la technique de fusion électrique dans laquelle l'énergie de fusion est dissipée par effet Joule dans le bain de verre fondu par l'intermédiaire d'électrodes plongeant à travers la surface du bain. Selon l'invention, les électrodes plongent dans un bain de verre fondu d'une hauteur h inférieur à 800 mm et d'une surface S telle que le rapport h/S est inférieur à $0,5 \text{ m}^2$. Selon un autre aspect, la surface d'échange entre les électrodes et le bain est supérieure à $0,075 \text{ m}^2/\text{m}^3$ de verre. Application à la fabrication de produits à base de verre, tels que matériaux isolants à base de fibre de verre.

(57) The invention concerns the technique of electric melting wherein the melting energy is dissipated by Joule effect in the molten glass bath by means of electrodes dipping through the bath surface. The invention is characterised in that the electrodes are immersed into a molten glass bath from a height h less than 800 mm and from a surface S such that the ratio h/S is less than 0.5 m^2 . In another embodiment, the exchange surface between the electrodes and the bath is more than $0.075 \text{ m}^2/\text{m}^3$ of glass. The invention is useful for making glass-based products such as fibre glass insulating materials.

PCT

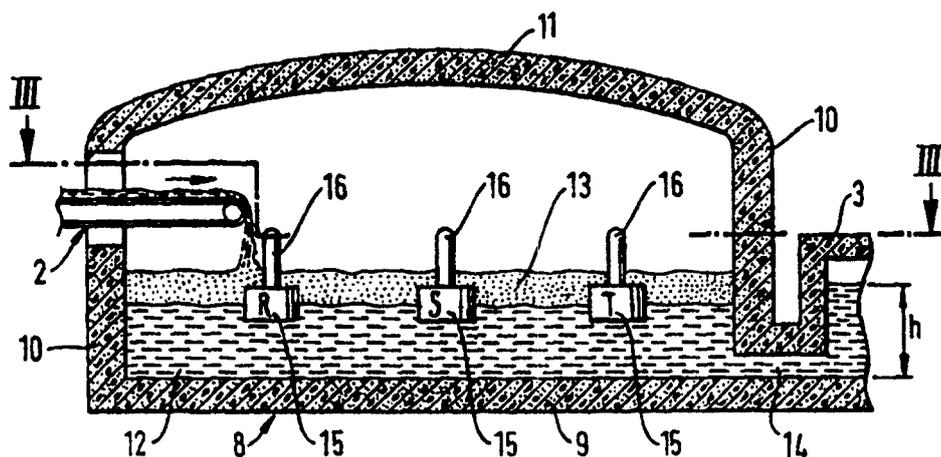
ORGANISATION MONDIALE DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE
Bureau international

DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITE DE COOPERATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(51) Classification internationale des brevets ⁶ : C03B 5/03, 37/08, 5/027, H05B 3/03	A1	(11) Numéro de publication internationale: WO 99/05068 (43) Date de publication internationale: 4 février 1999 (04.02.99)
<p>(21) Numéro de la demande internationale: PCT/FR98/01597</p> <p>(22) Date de dépôt international: 21 juillet 1998 (21.07.98)</p> <p>(30) Données relatives à la priorité: 97/09302 22 juillet 1997 (22.07.97) FR 98/06323 19 mai 1998 (19.05.98) FR</p> <p>(71) Déposant (pour tous les Etats désignés sauf US): ISOVER SAINT-GOBAIN [FR/FR]; "Les Miroirs", 18, avenue d'Alsace, F-92400 Courbevoie (FR).</p> <p>(72) Inventeurs; et (75) Inventeurs/Déposants (US seulement): MAUGENDRE, Stéphane [FR/FR]; 21, rue Gaston Wateau, F-60460 Precy sur Oise (FR). MASSART, Tanguy [FR/FR]; 35, rue Adam Ledoux, F-92400 Courbevoie (FR). SZALATA, François [FR/FR]; 21, rue des Lilas, Laigneville, F-60290 Rautigny (FR).</p> <p>(74) Mandataire: MULLER, René; Saint-Gobain Recherche, 39, quai Lucien Lefranc, F-93303 Aubervilliers (FR).</p>	<p>(81) Etats désignés: AU, BR, CA, CN, CZ, HU, IS, JP, KR, NO, PL, RU, SI, TR, US, brevet européen (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).</p> <p>Publiée Avec rapport de recherche internationale. Avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues.</p>	

(54) Title: GLASS FURNACE AND INSTALLATION COMPRISING SAME

(54) Titre: FOUR A VERRE ET INSTALLATION COMPRENANT LE FOUR



(57) Abstract

The invention concerns the technique of electric melting wherein the melting energy is dissipated by Joule effect in the molten glass bath by means of electrodes dipping through the bath surface. The invention is characterised in that the electrodes are immersed into a molten glass bath from a height h less than 800 mm and from a surface S such that the ratio h/S is less than $0.5 \text{ m}^2/\text{m}^2$. In another embodiment, the exchange surface between the electrodes and the bath is more than $0.075 \text{ m}^2/\text{m}^3$ of glass. The invention is useful for making glass-based products such as fibre glass insulating materials.

(57) Abrégé

L'invention concerne la technique de fusion électrique dans laquelle l'énergie de fusion est dissipée par effet Joule dans le bain de verre fondu par l'intermédiaire d'électrodes plongeant à travers la surface du bain. Selon l'invention, les électrodes plongent dans un bain de verre fondu d'une hauteur h inférieur à 800 mm et d'une surface S telle que le rapport h/S est inférieur à $0,5 \text{ m/m}^2$. Selon un autre aspect, la surface d'échange entre les électrodes et le bain est supérieure à $0,075 \text{ m}^2/\text{m}^3$ de verre. Application à la fabrication de produits à base de verre, tels que matériaux isolants à base de fibre de verre.

UNIQUEMENT A TITRE D'INFORMATION

Codes utilisés pour identifier les Etats parties au PCT, sur les pages de couverture des brochures publiant des demandes internationales en vertu du PCT.

AL	Albanie	ES	Espagne	LS	Lesotho	SI	Slovénie
AM	Arménie	FI	Finlande	LT	Lituanie	SK	Slovaquie
AT	Autriche	FR	France	LU	Luxembourg	SN	Sénégal
AU	Australie	GA	Gabon	LV	Lettonie	SZ	Swaziland
AZ	Azerbaïdjan	GB	Royaume-Uni	MC	Monaco	TD	Tchad
BA	Bosnie-Herzégovine	GE	Géorgie	MD	République de Moldova	TG	Togo
BB	Barbade	GH	Ghana	MG	Madagascar	TJ	Tadjikistan
BE	Belgique	GN	Guinée	MK	Ex-République yougoslave de Macédoine	TM	Turkménistan
BF	Burkina Faso	GR	Grèce	ML	Mali	TR	Turquie
BG	Bulgarie	HU	Hongrie	MN	Mongolie	TT	Trinité-et-Tobago
BJ	Bénin	IE	Irlande	MR	Mauritanie	UA	Ukraine
BR	B Brésil	IL	Israël	MW	Malawi	UG	Ouganda
BY	Bélarus	IS	Islande	MX	Mexique	US	Etats-Unis d'Amérique
CA	Canada	IT	Italie	NE	Niger	UZ	Ouzbékistan
CF	République centrafricaine	JP	Japon	NL	Pays-Bas	VN	Viet Nam
CG	Congo	KE	Kenya	NO	Norvège	YU	Yougoslavie
CH	Suisse	KG	Kirghizistan	NZ	Nouvelle-Zélande	ZW	Zimbabwe
CI	Côte d'Ivoire	KP	République populaire démocratique de Corée	PL	Pologne		
CM	Cameroun	KR	République de Corée	PT	Portugal		
CN	Chine	KZ	Kazakstan	RO	Roumanie		
CU	Cuba	LC	Sainte-Lucie	RU	Fédération de Russie		
CZ	République tchèque	LI	Liechtenstein	SD	Soudan		
DE	Allemagne	LK	Sri Lanka	SE	Suède		
DK	Danemark	LR	Liberia	SG	Singapour		
EE	Estonie						

FOUR A VERRE ET INSTALLATION COMPRENANT LE FOUR

5

La présente invention se rapporte aux techniques de fusion électrique du verre dans lesquelles la conductivité du verre fondu est utilisée pour développer par effet Joule l'énergie nécessaire à la fusion des matières premières.

10 Dans un premier type de four électrique de fusion de verre, l'apport d'énergie est réalisé par l'intermédiaire d'électrodes totalement immergées dans la masse de verre fondu (dénommée ci-après le bain), disposées verticalement sur la sole du four et/ou horizontalement sur les parois latérales du four, la composition à fondre étant introduite par le dessus de façon à entretenir une
15 couche de surface constituant à la fois une réserve permanente de matières premières et une protection du bain contre les déperditions calorifiques superficielles.

Le bain de verre fondu est le siège de mouvements de convection, dus aux modifications de densité du verre selon son degré d'échauffement, qui participent
20 au transport de la chaleur vers la couche de surface où doit avoir lieu la fusion ainsi que dans le reste du volume du bain. Ces mouvements sont particulièrement intenses le long de l'électrode en raison du gradient de température existant avec la masse de verre avoisinante.

Dans cette configuration où les électrodes sont totalement immergées, la
25 surface d'échange énergétique entre l'électrode et le bain est répartie sur presque toute la hauteur du bain. En conséquence, la différence de température du verre suivant la hauteur du bain n'est pas très prononcée et les mouvements de convection sont d'une très grande amplitude, le courant de verre chaud s'élevant le long de l'électrode puis longeant la couche de matières à fondre pour lui
30 apporter l'énergie de fusion. Cette circulation se traduit par un brassage continu du bain qui permet d'homogénéiser la masse de verre fondu tant en composition qu'en température.

De manière générale, les fours de ce type comportent une cuve en matériau réfractaire très profonde, habituellement de l'ordre d'au moins 1,5 m, dans laquelle une épaisseur de verre fondu de l'ordre d'au moins 1,2 à 1,4 m est prévue pour que les matières qui fondent sous la couche de surface disposent
5 d'un temps de séjour dans le bain suffisant pour atteindre un état de composition et de température homogène, et élaborer ainsi un verre satisfaisant.

L'immersion totale des électrodes considérée comme avantageuse car permettant un apport d'énergie assez uniforme dans tout le volume du bain, se révèle cependant contraignante car les mouvements de brassage violents dont il a
10 été question plus haut provoquent l'érosion de la sole et il faut prévoir des mesures pour protéger la sole contre cette usure qui peut aussi affecter les électrodes elles-mêmes.

Plus récemment, la technique de fusion électrique a connu une modification importante, consistant à faire plonger les électrodes dans le bain à travers la
15 surface libre de celui-ci, au lieu de les faire jaillir à l'intérieur du bain à partir de la sole. Cela a permis de résoudre les délicats problèmes de remplacement des électrodes usées et d'étanchéité liés au passage des électrodes à travers le réfractaire de la sole. L'usure des réfractaires a également pu être réduite car
20 l'utilisation d'électrodes plongeantes supprime le chauffage direct au niveau de la sole, les zones chaudes étant localisées dans une partie supérieure du bain fondu, et permet donc de limiter le développement de courants de convection au contact de la sole. Cette configuration a également permis d'augmenter les possibilités de réglage des paramètres de production. Pour plus de détails sur
25 cette technique et ses avantages, on pourra se référer notamment au document FR-A-2 599 734.

Le dimensionnement des fours n'a pas été sensiblement modifié avec l'utilisation des électrodes plongeantes, et un minimum de profondeur était jusqu'à
30 présent préconisé pour développer convenablement le gradient de température nécessaire à l'établissement au niveau de la sole de la température relativement basse souhaitée : le profil de température dans le bain est en effet tel que la température est plus élevée à proximité de l'électrode et décroît relativement doucement en direction de la sole. Ce minimum de profondeur était également considéré comme nécessaire pour l'élaboration d'un verre de bonne qualité.

L'invention a pour but de perfectionner la définition des fours de fusion électrique à électrodes plongeantes, de façon à optimiser les conditions de production notamment en réduisant, à production égale, le coût d'investissement et/ou de fonctionnement, pour une rentabilité améliorée.

5 De façon tout à fait surprenante, il est apparu aux présents inventeurs que, à capacité de production égale, le volume du bain de fusion et de façon équivalente le temps de séjour des matières dans le bain pouvaient être notablement réduits par rapport à l'art antérieur sans que les qualités du verre n'en soient sensiblement affectées. Ainsi, contrairement à l'idée reçue qu'une
10 hauteur de bain minimale est nécessaire pour élaborer un verre homogène en composition et en température, les inventeurs ont réussi à élaborer des verres tout à fait satisfaisants dans un four dont la profondeur a été réduite de façon très significative.

A cet égard, l'invention a pour objet un four pour la préparation de verre par
15 fusion électrique dans lequel l'énergie de fusion est dissipée par effet Joule dans la masse fondue, comprenant des moyens d'alimentation en matières vitrifiables déposant lesdites matières en couche à la surface d'un bain de verre fondu et des électrodes de fusion plongeantes immergées à partir de la surface du bain à travers la couche de composition à fondre recouvrant le bain en fusion,
20 caractérisé en ce que la hauteur h du bain fondu est inférieure à 800 mm et le rapport de la hauteur h à la surface S du bain est inférieur à $0,5 \text{ m/m}^2$.

Aux fins de la présente description, la hauteur h du bain fondu désigne en fait la hauteur utile du bain fondu, à savoir la hauteur entre le niveau supérieur de liquide dans la cuve et la sole du four, ou éventuellement dans certains cas où le
25 soutirage du verre se fait à un niveau plus élevé que celui de la sole, entre le niveau supérieur du liquide dans la cuve et le niveau inférieur de l'orifice de soutirage du verre. En effet, pour certaines raisons, notamment lorsque des polluants sont susceptibles de se déposer au niveau de la sole et souiller la masse de verre au fond du bain, il peut être préférable de soutirer le verre dans
30 une zone située un peu au dessus du niveau de la sole. Il est établi que la masse de verre ainsi isolée en partie basse du four ne participe pas à l'élaboration du verre et n'entre pas dans la masse utile du bain.

Il est en général difficile de mesurer avec précision le niveau exact où commence la phase liquide dans la cuve, en raison du fait que la couche superficielle de matières recouvrant le bain (dite « croûte ») est le siège d'équilibres entre plusieurs phases (solides, liquides, gaz) issues de la fusion de la composition. On procède en général à une mesure indirecte par le principe des vases communicants, en détectant le niveau supérieur de liquide dans un compartiment situé en aval de la cuve.

Contre toute attente, il a été constaté par les présents inventeurs qu'en réalisant la fusion électrique dans un four à électrodes plongeantes beaucoup moins profond qu'à l'accoutumée, toutes choses étant égales par ailleurs, on produit un verre complètement élaboré, ne contenant pas de particules solides, et présentant une homogénéité de composition satisfaisante, malgré un temps de séjour des matières dans le bain de fusion beaucoup plus faible que dans les techniques de fusion habituelles.

Comme avantage principal, la réduction de taille du four offerte par l'invention permet une économie substantielle sur la quantité de matériau réfractaire nécessaire à la constitution des parois latérales du four, et partant sur le coût d'investissement de l'installation. La réduction de la quantité de verre présente dans le bain de fusion permet d'autre part une utilisation plus rationnelle de l'énergie en limitant les déperditions énergétiques dans la masse de verre, d'où une économie sur les coûts de fonctionnement, en particulier lorsqu'il s'agit de fabriquer des verres peu conducteurs de la chaleur. D'autres avantages de l'invention apparaîtront dans la suite de cette description.

Le four selon l'invention présente un rapport d'aspect caractéristique avec une hauteur de bain limitée à une valeur inférieure à 800 mm et faible par rapport à la surface du bain. Dans une variante préférée, la hauteur h de verre fondu peut avantageusement être réduite à une valeur inférieure à 500 mm, notamment inférieure ou égale à 450 mm, avec une réduction très significative du coût du four. Des hauteurs inférieures ou égales à 400 mm, notamment de l'ordre de 300 mm ou moins, sont particulièrement préférées.

Dans un mode de réalisation particulier, le rapport h/S défini précédemment est d'ailleurs inférieur ou égal à 0,05, par exemple de l'ordre de 0,03 ou moins.

Suivant des variantes préférées où le four a une grande surface pour une capacité de production élevée, le rapport h/S peut même être inférieur ou égal à 0,02, voire 0,01 ou 0,005.

La hauteur de la cuve sera avantageusement limitée en conséquence, de préférence à une valeur supérieure à la hauteur du bain de 100 à 200 mm, notamment de l'ordre de 150 mm.

Aucune limite inférieure ne devrait théoriquement être posée pour la hauteur h de verre fondu et l'homme du métier devrait être libre de choisir des hauteurs aussi faibles que de l'ordre de quelques centimètres, sous réserve de préserver une surface de contact entre les électrodes et le verre fondu suffisante pour apporter l'énergie de fusion nécessaire. Il a en effet été observé par les inventeurs que, dès que l'on se place à plus de 2 à 3 cm sous le niveau supérieur de liquide dans la cuve (comme défini ci-dessus), il ne subsiste pas de particule solide dans le bain (c'est-à-dire que la fusion est réalisée) et le verre est complètement élaboré. A cet égard, on peut indiquer que toute hauteur de bain de 20 à 300 mm est comprise dans l'invention, les fours correspondants étant essentiellement des dispositifs de fusion, produisant des verres élaborés mais relativement moins affinés que les fours traditionnels.

L'invention a donc ceci de remarquable qu'elle permet de traiter la même quantité de matières qu'un four traditionnel avec la même tirée spécifique, mais dans un four de hauteur réduite : de fait, si les électrodes apportent la même quantité d'énergie, elles la transmettent à un volume de bain inférieur. En modifiant ainsi les conditions d'apport d'énergie dans le bain, le profil de température dans le bain est tel qu'il s'établit dans la masse de verre fondue des courants de circulation du verre propices à l'élaboration d'un verre homogène.

Ainsi, suivant un autre aspect de l'invention le four se caractérise par une hauteur de bain inférieure à 800 mm, notamment à 500 mm, en particulier à 450 mm, et par une surface d'échange entre les électrodes et le verre fondu (cette surface étant constituée par la surface latérale d'électrode immergée sous le niveau supérieur de liquide présent dans la cuve, par unité de volume de bain) supérieure à 0,075 m² d'électrode par m³ de verre.

Selon l'invention, la masse de verre dispose d'une surface d'échange énergétique plus élevée que d'ordinaire. Il y a par conséquent une quantité

relative de verre exposée aux électrodes plus importante que dans les fours traditionnels.

La surface d'électrode par unité de volume de bain est avantageusement supérieure à $0,1 \text{ m}^2 \text{ par m}^3$, de préférence supérieure ou égale à $0,15 \text{ m}^2 \text{ par m}^3$,
5 notamment de l'ordre de $0,2 \text{ m}^2 \text{ par m}^3$ ou plus.

La profondeur d'immersion des électrodes dans le bain fondu est nécessairement limitée à une valeur inférieure à la hauteur du bain pour éviter un contact entre l'électrode et la sole. Cette profondeur d'immersion doit toutefois être suffisante pour offrir la surface d'échange nécessaire pour dissiper la
10 puissance souhaitée.

En particulier pour limiter l'usure de la sole, notamment par érosion causée par les courants convectifs de verre dans le bain, il peut être préférable que la longueur immergée des électrodes soit inférieure ou égale aux deux tiers de la hauteur du bain, de préférence à la moitié de la hauteur du bain, la profondeur
15 d'immersion dépendant aussi de la hauteur du bain. Cela permet de localiser les zones les plus chaudes au voisinage de la surface du bain, l'énergie de fusion étant dissipée là où on en a le plus besoin. Cette précaution se révèle en outre favorable à une circulation des matières fondues suivant un trajet permettant l'élaboration et l'homogénéisation rapide du verre au sein du bain peu profond.

Avantageusement, la forme des électrodes peut être adaptée pour qu'elles
20 présentent une surface latérale très élevée pour un minimum de longueur. On utilisera donc avantageusement des électrodes, notamment de contour sensiblement cylindrique, dont les dimensions sont telles que leur surface latérale S_{el} et leur longueur immergée l sont dans un rapport S_{el} / l supérieur ou égal à
25 $0,45$, avantageusement à $0,6$.

Dans un mode de réalisation particulièrement avantageux, au moins une électrode peut comprendre au moins un élément conducteur sensiblement plan. En particulier, une telle électrode peut avoir la forme d'une plaque ou comprendre plusieurs plaques associées entre elles. Un élément conducteur sensiblement
30 plan peut néanmoins avoir également la forme d'un ruban ou être composé d'une pluralité de fils juxtaposés.

De préférence, de telles plaques sont carrées ou rectangulaires, notamment pour des raisons de facilité de fabrication, bien que toute autre forme

de plaque permette également d'alimenter le bain de verre en courant électrique pour la création d'un effet Joule.

Les électrodes de type cylindrique sont en effet moins préférées selon l'invention dès lors que la profondeur du bain de verre devient de plus en plus faible car, pour obtenir une surface latérale d'échange suffisante avec une faible longueur immergée, il faut utiliser un cylindre de grand diamètre, donc relativement lourd. Une solution peut consister à utiliser un cylindre creux, puisque seule la surface latérale de l'électrode participe à l'échange électrique, la partie intérieure étant totalement inerte à cet égard. Cette solution est cependant sans intérêt économique dans l'état actuel de la technologie des matériaux susceptibles de constituer les électrodes (tels le molybdène) car un cylindre creux ne peut être fabriqué que par fraisage, la matière éliminée, perdue, entrant quand même dans le coût de fabrication d'une telle électrode creuse.

L'utilisation d'électrodes plates ou constituées de plaques permet, par rapport aux électrodes conventionnelles en forme de barreau cylindrique, de réduire considérablement le poids de l'électrode, pour une surface latérale égale. Ce gain de poids est un atout majeur dans le four de l'invention où les électrodes sont plongeantes, c'est-à-dire suspendues à un élément support.

L'utilisation de plaques surmonte le handicap économique évoqué plus haut pour les cylindres creux.

Les dimensions des plaques sont choisies en fonction de la surface d'échange désirée, l'épaisseur étant choisie pour assurer à l'électrode une longévité suffisante en fonction de la cinétique d'usure par consommation du matériau conducteur constituant l'électrode dans les conditions de fonctionnement du four.

Avantageusement, lorsque la profondeur du four est très faible, l'électrode comprend au moins une plaque, notamment rectangulaire, disposée de telle façon que son côté de plus grande dimension soit orientée dans une direction sensiblement horizontale. Ainsi, l'élément support est relié au côté de plus grande dimension de la ou des plaques. L'épaisseur de la plaque peut être choisie pour assurer une fixation résistante lorsque l'élément support pénètre dans la plaque notamment par vissage.

Il est possible d'associer des plaques conductrices selon des configurations très variées :

- deux plaques carrées ou rectangulaires peuvent être disposées en L ;
- trois plaques carrées ou rectangulaires peuvent être disposées en U ;
- 5 - quatre plaques carrées ou rectangulaires peuvent être disposées pour former une électrode parallélépipédique creuse.

De préférence, les plaques associées par exemple comme ci-dessus sont assemblées entre elles, notamment par vissage ou tout autre moyen.

10 Des électrodes de configurations différentes peuvent être utilisées en combinaison dans un même four pour procurer une répartition particulière de lignes de courant. On peut ainsi installer dans un four par exemple, à la fois des électrodes cylindriques et des électrodes en forme de plaque(s), ou bien à la fois des électrodes en L et des électrodes en U.

15 Les électrodes constituées de plaque(s) peuvent en outre être munies de moyens pour régler l'orientation des surfaces d'échange électrique, notamment par pivotement autour d'au moins un axe, en particulier un axe horizontal et/ou un axe vertical, de façon à ajuster la répartition des lignes de courant dans le bain de verre fondu.

20 Comme on l'a dit précédemment, une particularité essentielle de la technique de fusion selon l'invention est le faible temps de séjour moyen des matières fondues dans le four au sein du bain, relativement au rythme de production qui s'exprime généralement par la tirée spécifique $T_{\text{spéc}}$ qui est la quantité de verre (en tonne) soutirée du four par jour rapportée à une surface de four de 1 m². En effet, pour une tirée spécifique constante, le temps de séjour des
25 matières dans le bain est proportionnel au volume du bain et la réduction de la hauteur du bain entraîne une réduction correspondante du temps de séjour.

A cet égard, l'invention a également pour objet un procédé de fusion électrique de verre dans lequel l'énergie est dissipée par effet Joule dans la masse fondue à partir d'électrodes plongeantes, comprenant les étapes
30 consistant à distribuer les matières constituant la composition à fondre en une couche à la surface du bain, immerger les électrodes à partir de la surface du bain à travers ladite couche de composition à fondre, alimenter les électrodes avec un courant électrique, les matières fondant et se combinant dans le bain pour former

le verre et soutirer le verre fondu avec un débit exprimé par la tirée spécifique $T_{\text{spéc}}$, caractérisé en ce que le temps de séjour moyen (en jour) des matières dans le bain entre la couche de surface et la zone de soutirage est inférieur à $\frac{2}{T_{\text{spéc}}}$, avantageusement à $\frac{1,2}{T_{\text{spéc}}}$, ou même à $\frac{0,8}{T_{\text{spéc}}}$.

- 5 A titre indicatif, dans des conditions de fonctionnement préférées, le temps de séjour moyen des matières dans le bain entre la couche de surface et la zone de soutirage est inférieur ou égal à 0,7 jour, avantageusement à 0,5 jour, par exemple de l'ordre de 0,25 à 0,4 jour, pour une tirée spécifique de l'ordre de 3 t/m²/j.
- 10 Le four selon l'invention se révèle particulièrement avantageux pour la production de verres « opaques » au rayonnement infrarouge, tels que par exemple les verres contenant une proportion d'oxyde de fer relativement élevée (par exemple de l'ordre d'au moins 0,60 % de Fe₂O₃, pouvant aller jusqu'à 10 - 12 % ou plus) dans lesquels le rayonnement se développe de façon limitée.
- 15 D'ordinaire dans les fours de taille habituelle, la faible conductivité du rayonnement crée des différences de température marquées entre les zones du bain, avec notamment des zones relativement froides au fond du bain où le verre a tendance à dévitrifier. En raison de sa faible profondeur, le four selon l'invention permet l'établissement d'un gradient thermique évitant la création de ces zones
- 20 froides et limitant les risques de dévitrification de ces verres particuliers.

La technique de fusion selon l'invention permet de produire, avec un appareillage moins coûteux et dans des conditions de fonctionnement plus économiques, du verre de bonne qualité utilisable pour de très nombreuses applications avec des résultats aussi satisfaisants que du verre élaboré dans des

25 fours traditionnels. Par exemple, le verre fondu suivant l'invention peut être transformé en laine de verre, en particulier pour la réalisation de produits isolants, de qualité équivalentes aux laines existantes.

En conséquence, l'invention a également pour objet une installation de fabrication de laine de verre comprenant un four de fusion de verre, un dispositif

30 de fibrage et des moyens pour alimenter le dispositif de fibrage avec du verre

fondue produit dans ledit four, caractérisée en ce que le four est un four à électrodes plongeantes de faible profondeur tel que décrit précédemment.

D'autres applications envisageables sont notamment la fabrication de fibres de renforcement ou de substrats en verre de formes diverses.

5 Pour des applications où l'on requiert un verre de très haute qualité, il est possible de coupler le four selon l'invention avec un dispositif complémentaire qui va réaliser une réhomogénéisation et/ou un affinage au dernier moment avant la transformation du verre fondu. Une telle installation peut être avantageuse par rapport à une installation comportant un four très profond calculé pour produire
10 directement en sortie de four le verre avec le degré d'homogénéisation et d'affinage très élevé souhaité : en plaçant ainsi un tel dispositif complémentaire juste en amont du dispositif final de transformation, on peut rattraper les éventuels défauts (inclusion de bulles gazeuses) susceptibles d'apparaître au sein du verre fondu au cours de son acheminement depuis le four vers le stade final de
15 transformation. L'utilisation de deux dispositifs distincts au lieu d'un four unique très performant reste en général économiquement avantageuse en raison du gain substantiel réalisé sur le coût de construction du four.

D'autres avantages et particularités de l'invention ressortiront de la description détaillée qui va suivre, faite en regard des dessins annexés, sur
20 lesquels :

- La **figure 1** : représente de façon schématique une installation de fabrication de laine de verre utilisant un four électrique selon l'invention ;
- La **figure 2** : représente une vue schématique en coupe longitudinale selon l'axe II-II du four de la figure 1 ;
- 25 - La **figure 3** : représente une vue schématique en coupe longitudinale selon l'axe III-III du four de la figure 1 ;
- La **figure 4** : représente une vue latérale et en coupe partielle d'une électrode en forme de plaque utilisable dans un four selon l'invention ;
- La **figure 5** : représente une autre vue latérale de l'électrode de la figure 4
30 ;
- La **figure 6** : représente une vue latérale et en coupe partielle d'une électrode constituée d'un assemblage de plaques utilisable dans un four selon l'invention ;

- La **figure 7** : représente une vue en élévation de l'assemblage de plaques représenté à la figure 6.

On notera que les figures sont des représentations schématiques sur lesquelles n'apparaissent pas tous les détails de réalisation à la portée de l'homme du métier et sur lesquelles l'échelle n'est pas nécessairement respectée, à moins qu'il n'en soit spécifié autrement par la suite.

L'installation représentée sur la figure 1 est destinée à produire de la laine de verre pour la réalisation de matériaux d'isolation thermique. Elle comprend essentiellement un four 1 de fusion de verre alimenté en mélange de matières vitrifiables par un système d'alimentation 2, un canal 3 de transport du verre fondu élaboré dans le four 1 et une machine de fibrage 4 alimentée en verre fondu par le canal 3. Dans la machine de fibrage, le verre fondu tombe dans une assiette de fibrage 5 dont la paroi latérale est percée d'une multitude d'orifices, mue en rotation autour d'un axe vertical 6, de façon à éjecter de façon centrifuge le verre fondu à travers lesdits orifices sous forme de filaments de verre 7 solidifiant par refroidissement.

La constitution du four 1 apparaît en détail sur les deux vues en coupe des figures 2 et 3. Le four comporte une cuve 8 en matériau réfractaire constituée par une sole 9 et des parois verticales 10, et surmontée d'une voûte 11. La cuve représentée a une sole 9 horizontale. La cuve 8 du four selon l'invention peut revêtir toutes les formes générales traditionnelles, mais se distingue des fours traditionnels par la faible hauteur des parois 10. A titre d'exemple la cuve représentée a une surface d'environ 10 m² pour une hauteur de 0,4 m.

Comme représenté sur la figure 2, la cuve 8 contient une masse de verre fondue 12 constituant le bain de fusion, recouvert d'une couche 13 de matières premières solides distribuées en continu par le système d'alimentation 2. Cette couche aussi uniforme que possible peut être plus ou moins épaisse selon le régime de fonctionnement. En régime, on maintient de préférence une épaisseur d'au moins 100 mm pour isoler thermiquement le bain en fusion de l'atmosphère. De préférence, cette épaisseur ne devrait pas dépasser environ 300 mm car cela n'apporte pas d'avantage pour la fusion et surchargerait donc inutilement la surface du bain.

La hauteur h du bain est calculée en mesurant la différence entre le niveau de verre libre dans le canal de transport 3 et le niveau de la sole 9. Dans le mode représenté, elle est d'environ 300 mm ; le rapport h/S est donc de 0,03 (en m/m^2).

5 Dans le mode représenté, le matériau fondu est évacué par une gorge 14 située sur un côté de la cuve 8 et au même niveau que la sole 9, cette gorge communiquant avec le canal 3.

Des électrodes de fusion 15, au nombre de six dans cet exemple, sont disposées dans la partie supérieure du four, portées par des supports 16 de type traditionnel. Leur disposition, du type décrit dans EP-A-0 140 745, est plus
10 particulièrement adaptée à une alimentation en courant triphasé, la distribution des phases (R, S, T) étant telle qu'indiquée sur la figure 3. Cette disposition permet un bon équilibrage des phases. Tout autre mode d'alimentation habituel est toutefois envisageable dans le cadre de l'invention.

Les électrodes 15 traversent la couche superficielle de matières premières
15 et pénètrent dans le bain fondu. On préfère une profondeur d'immersion la plus faible possible, sous réserve d'offrir la surface d'échange nécessaire. En pratique, une profondeur d'immersion inférieure aux 2/3 de la hauteur du bain et même de préférence à la moitié de cette hauteur sera généralement avantageuse.

Dans le mode de réalisation représenté, les électrodes sont de forme
20 cylindrique, courtes mais de diamètre relativement élevé pour offrir une surface d'échange importante. Avec un diamètre de 200 mm environ et une longueur utile l de 150 mm environ, la surface latérale d'échange S_{ei} est d'environ $0,095 m^2$ par électrode et le rapport S_{ei} / l vaut 0,63. En fonctionnement, les électrodes sont immergées sur toute leur longueur utile 150 mm, soit la moitié de la hauteur du
25 bain, la surface d'échange par unité de volume de bain étant donc de $0,190 m^2$ par m^3 de bain.

En général, ce four peut être alimenté avec une densité de courant sur l'électrode de l'ordre de 1 à 3 A/cm^2 .

Dans un exemple particulier de fonctionnement, le four alimenté avec une
30 densité de courant de 2 à 2,5 A/cm^2 , permet de produire du verre avec une tirée spécifique de l'ordre de 3 $t/j/m^2$, soit une tirée totale de 30 t/j : avec un verre dont la masse volumique est de 2,4 t/m^3 , le volume de verre produit est de 12,5 m^3 par jour. Sachant que le volume du bain est de 3 m^3 , le temps de séjour des matières

dans le bain est d'environ 0,25 jour avec une température de sole dans la gamme habituelle.

Pour comparaison, par rapport à un four à électrodes plongeantes standard comportant une cuve profonde renfermant un bain de verre de 1 m de haut, le four selon l'invention présente un coût de construction réduit d'environ 40 % correspondant à la réduction de la hauteur des parois latérales. Par ailleurs, en fonctionnement dans les mêmes conditions de production (même tirée spécifique), la répartition avantageuse de l'énergie dans le bain selon l'invention permet de réduire la consommation énergétique de 5 % environ.

Les figures 4 et 5 représentent une électrode 19 en forme de plaque utilisable dans le four 1 à la place d'au moins une des électrodes cylindriques 15.

L'électrode proprement dite est constituée par une plaque 20 rectangulaire en molybdène reliée à une allonge 21 en acier par vissage. La plaque 20 est pourvue d'un taraudage 22 pratiqué dans l'épaisseur de la plaque au milieu du côté de plus grande dimension (longueur). L'allonge 22 est pourvue d'une extrémité filetée correspondante 23.

L'allonge 21 est le moyen de liaison entre l'électrode et le bras support de l'ensemble : elle a pour fonction de supporter l'électrode et d'amener le courant électrique jusqu'à l'électrode. En fonctionnement, elle traverse la couche 13 de matières premières surmontant le bain, la portion inférieure avec le filetage 23 inséré dans la plaque 20 se trouvant approximativement à un niveau correspondant à la moitié de l'épaisseur de la couche superficielle 13.

Pour éviter la fusion de la fixation entre l'électrode et l'allonge en acier, et pour éviter l'usure du molybdène dans la zone de fixation en partie supérieure de la plaque 20, on a disposé en outre un système de refroidissement 24 du type « water-jacket » intégré dans l'allonge 21.

Ce système comprend un circuit 25 de circulation d'eau de refroidissement à l'intérieur de l'allonge entre un orifice d'entrée 26 et un orifice de sortie 27.

L'allonge 21 munie du système de refroidissement 24 est équipée d'une plaque 28 de raccordement à un élément (bras) support non représenté pénétrant à travers les parois latérales du four.

A titre d'exemple, une électrode plaque 19 fonctionnellement équivalente à l'électrode cylindrique 15 décrite précédemment a une longueur de 300 mm, une hauteur de 150 mm et une épaisseur de 45 mm.

Le diamètre du taraudage 22 devrait de préférence être le plus grand possible pour avoir une fixation de l'électrode la plus solide possible. Il en résulte en outre un meilleur refroidissement de toute la zone d'électrode supportée puisque l'extrémité filetée 23 de l'allonge 21 renfermant l'extrémité du système de refroidissement 24 apporte un débit d'eau plus élevé.

Dans ces circonstances, il est préférable que l'épaulement 29 sur l'allonge 21 soit tel qu'il déborde au-delà de l'épaisseur de plaque 20. En effet, c'est sur cette surface de contact frontal que se fait le contact électrique alimentant l'électrode. Il est donc avantageux que cette surface de contact soit la plus grande possible pour éviter des densités de courant trop importantes sur cette surface de connexion de l'électrode.

Avec les dimensions indiquées plus haut, la surface latérale de la plaque 20 est de 0,103 m² par électrode, ce qui est très proche de la surface latérale S_{el} de l'électrode 15.

En revanche, le poids de la plaque 20 n'est que de 21 kg environ au lieu de 50 kg environ pour le barreau cylindrique 15.

Pour une même capacité d'apport de courant, l'électrode plaque 19 est plus de 2 fois moins lourde que l'électrode cylindrique 15.

La réduction du poids de l'électrode conduit à une diminution du bras de levier sur le support de l'électrode et permet donc une simplification de la construction du four.

Cette électrode 19 a été testée dans les mêmes conditions de fonctionnement que celles décrites précédemment avec l'électrode 15 avec une densité de courant à l'électrode d'environ 2 A/cm².

Dans ces conditions, la fusion présente les mêmes qualités avec les deux types d'électrodes. Alors que l'électrode cylindrique 15 s'use avec une perte de 3,1 grammes de molybdène par tonne de verre produite, l'électrode 19 s'use avec une perte de 2,9 grammes de molybdène par tonne de verre produite. Grâce au refroidissement de l'extrémité filetée de l'allonge 21, l'usure de la plaque se fait à partir des faces rectangulaires externes sans préjudice du contact électrique.

L'épaisseur de 45 mm de la plaque 20 suffit pour assurer une longévité satisfaisante de l'électrode. Cela pourrait s'expliquer notamment par le fait que, à perte de masse égale, la surface d'une plaque diminuerait moins vite que la surface d'un cylindre.

5 Les figures 6 et 7 représentent une électrode 30 creuse à section carrée, constituée de l'assemblage de quatre plaques 31, 32, 33, 34 en molybdène fixées à une plaque support 35 en molybdène par des vis 36 également en molybdène.

La plaque support 35 est pourvue d'un taraudage 37 permettant de fixer l'électrode sur une allonge non représentée, qui peut être de structure analogue à
10 l'allonge 21 munie d'un système de refroidissement.

Par rapport à l'électrode plaque 19 des figures 4 et 5, l'électrode carrée 30 permet la diffusion de courant électrique dans quatre directions perpendiculaires au lieu de deux directions opposées.

Dans un exemple particulier, les dimensions des plaques 31, 32, 33 et 34
15 sont telles que chaque face de l'électrode mesure 160 mm de large sur 150 mm de haut, ce qui donne une surface latérale totale d'échange de 0,096 m², c'est-à-dire de l'ordre de celle de l'électrode 15.

Avec un poids total de 32 kg, l'électrode 30 est également deux fois plus efficace que l'électrode cylindrique 15.

20 Les électrodes 19 et 30 peuvent être munies de moyens pour régler leur orientation, notamment par pivotement autour d'un axe vertical ou d'un axe horizontal, pour ajuster la répartition des lignes de courant dans le bain fondu.

Ces moyens peuvent notamment être portés par l'allonge 21 ou bien par l'élément porteur auquel est suspendue l'allonge.

25 Sur les figures 4 et 5, l'électrode 19 comporte de tels moyens d'orientation autour d'un axe vertical, sous la forme du raccord-union 40 entre l'allonge 21 et le support 28.

Le verre élaboré dans le four 1, une fois conduit à la machine de fibrage 4, est transformé en laine de verre avec une proportion d'infibrés aussi faible
30 qu'avec les verres issus de fours traditionnels.

L'étape de transport du verre fondu vers le dispositif de transformation peut avantageusement être mise à profit pour homogénéiser et affiner le verre. Toutefois, même si les conditions d'acheminement n'étaient pas optimales ou si le

verre élaboré dans le four 1 n'était pas suffisamment homogène ou affiné en raison de variations incontrôlées des paramètres de production, il a été observé que le produit fibré présente néanmoins des qualités satisfaisantes.

5 L'association du four selon l'invention avec un dispositif de transformation tel qu'une machine de fibrage à centrifugation interne se révèle particulièrement avantageuse vraisemblablement parce que la force centrifuge appliquée au verre fondu au sein de la machine de fibrage, confère au verre un degré d'homogénéité supérieur, cette homogénéisation ultime améliorant l'aptitude du verre à être transformé en laine.

10 Les fours de très faible hauteur selon l'invention, notamment dans lesquels la hauteur h de verre fondu peut aller de 20 à 300 ou 400 mm, de préférence de 200 à 300 ou 400 mm, trouvent donc une application particulièrement avantageuse dans ce type d'installation, dont ils réduisent considérablement les coûts (investissement et fonctionnement).

15 L'invention, qui vient d'être décrite dans le cadre d'une installation de fabrication de matériaux d'isolation à base de laine de verre, n'est nullement limitée à ce mode de réalisation particulier, et d'autres produits verriers peuvent être fabriqués en utilisant le dispositif de fusion selon l'invention, couplé avec les moyens de transformation appropriés.

20

REVENDEICATIONS

1. Four pour la préparation de verre par fusion électrique dans lequel l'énergie de fusion est dissipée par effet Joule dans la masse fondue, comprenant des moyens d'alimentation en matières vitrifiables déposant lesdites matières en
5 couche à la surface d'un bain de verre fondu et des électrodes de fusion plongeantes immergées à partir de la surface du bain à travers la couche de composition à fondre recouvrant le bain en fusion, **caractérisé en ce que la** hauteur h du bain fondu est inférieure à 800 mm et le rapport de la hauteur h à la surface S du bain est inférieur à $0,5 \text{ m/m}^2$.
- 10 2. Four selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** le rapport h/S est inférieur ou égal à 0,05, notamment à 0,03.
3. Four pour la préparation de verre par fusion électrique dans lequel l'énergie de fusion est dissipée par effet Joule dans la masse fondue, comprenant des moyens d'alimentation en matières vitrifiables déposant lesdites matières en
15 couche à la surface d'un bain de verre fondu et des électrodes de fusion plongeantes immergées à partir de la surface du bain à travers la couche de composition à fondre recouvrant le bain en fusion, caractérisé en ce que la hauteur h du bain fondu est inférieure à 800 mm et la surface d'électrode immergée par unité de volume de bain est supérieure à 0,075, avantageusement
20 à 0,1, notamment à 0,15.
4. Four selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la hauteur h du bain est inférieure à 500 mm, notamment inférieure ou égale à 450 mm, en particulier de l'ordre de 200 à 400 mm.
5. Four selon l'une quelconque des revendications précédentes,
25 **caractérisé en ce que** les électrodes sont immergées dans le bain sur une hauteur inférieure ou égale aux deux tiers, avantageusement à la moitié de la hauteur h du bain.
6. Four selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** les électrodes ont une forme telle que leur surface latérale
30 S_{el} et leur longueur utile l sont dans un rapport S_{el} / l supérieur ou égal à 0,45, avantageusement à 0,6.

7. Four selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** au moins une électrode (19, 30) comprend au moins un élément conducteur sensiblement plan (20 ; 31, 32, 33, 34).

8. Four selon la revendication 7, **caractérisé en ce que** l'électrode (19) a la forme d'une plaque (20) ou comprend plusieurs plaques (31, 32, 33, 34) associées entre elles.

9. Four selon la revendication 7 ou 8, **caractérisé en ce que** l'électrode comprend au moins une plaque, notamment rectangulaire (20), ayant son côté de plus grande dimension disposé sensiblement horizontalement.

10. Four selon l'une quelconque des revendications 7 à 9, **caractérisé en ce que** au moins une électrode (19, 30) est munie de moyens pour régler l'orientation des surfaces d'échange électrique, notamment par pivotement autour d'au moins un axe.

11. Procédé de fusion électrique de verre dans lequel l'énergie est dissipée par effet Joule dans la masse fondue à partir d'électrodes plongeantes, comprenant les étapes consistant à distribuer les matières constituant la composition à fondre en une couche à la surface du bain, immerger les électrodes à partir de la surface du bain à travers ladite couche de composition à fondre, alimenter les électrodes avec un courant électrique, les matières fondant et se combinant dans le bain pour former le verre et soutirer le verre fondu avec un débit exprimé par la tirée spécifique $T_{\text{spéc}}$, caractérisé en ce que le temps de séjour moyen des matières dans le bain entre la couche de surface et la zone de soutirage est inférieur à $\frac{2}{T_{\text{spec}}}$, avantageusement à $\frac{1,2}{T_{\text{spec}}}$, ou même à $\frac{0,8}{T_{\text{spec}}}$.

12. Procédé selon la revendication 11, **caractérisé en ce que** le temps de séjour moyen des matières dans le bain entre la couche de surface et la zone de soutirage est inférieur ou égal à 0,7 jour, avantageusement à 0,5 jour, pour une tirée spécifique de l'ordre de 3 t/m²/j.

13. Installation de fabrication de laine de verre comprenant un four de fusion de verre, un dispositif de fibrage et des moyens pour alimenter le dispositif de fibrage avec du verre fondu produit dans ledit four, **caractérisée en ce que** le four est un four selon l'une quelconque des revendications 1 à 10.

14. Installation selon la revendication 13 , **caractérisé en ce que le**
dispositif de fibrage est du type à centrifugation interne.

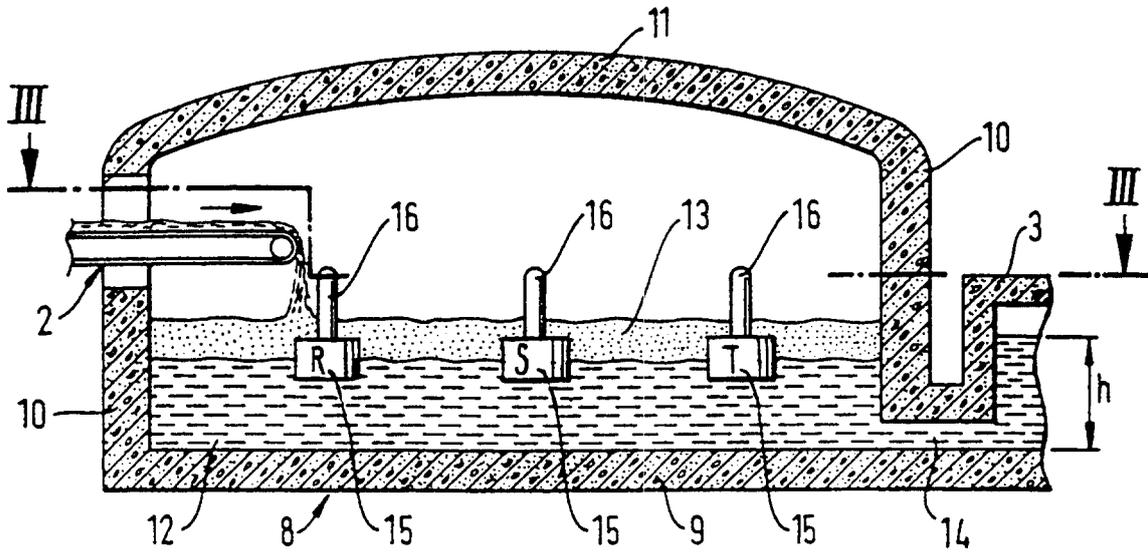


Fig. 2

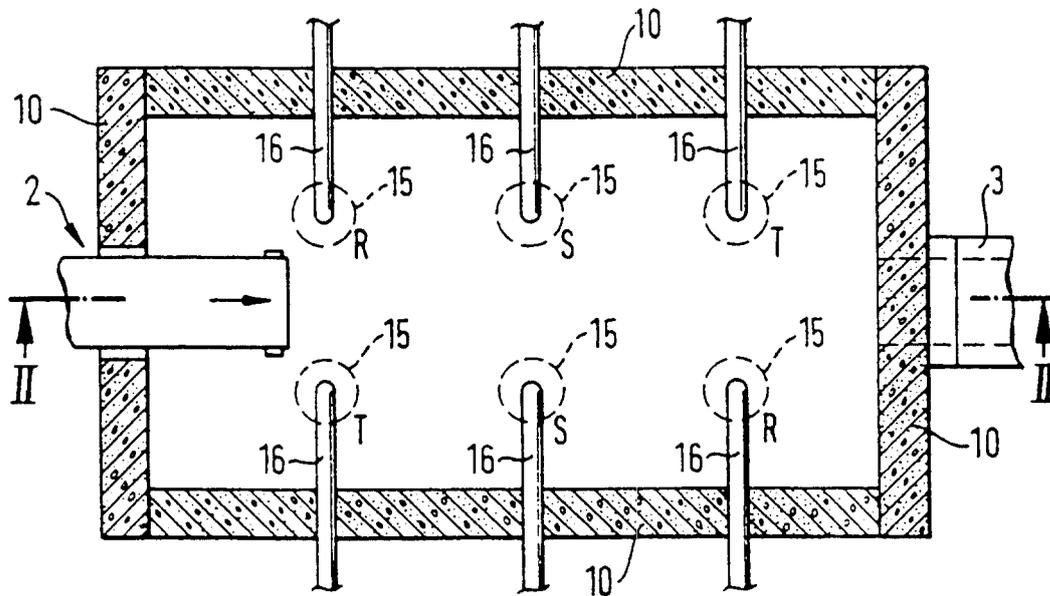


Fig. 3

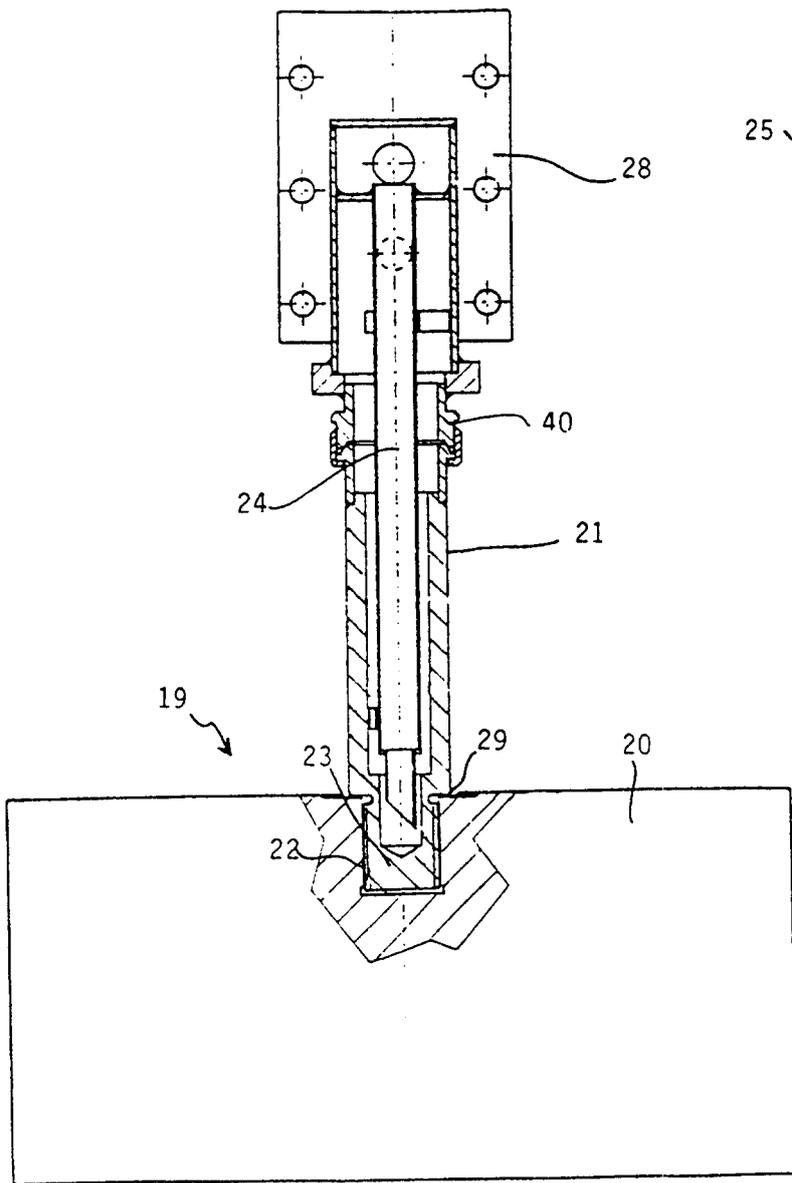


Fig 4

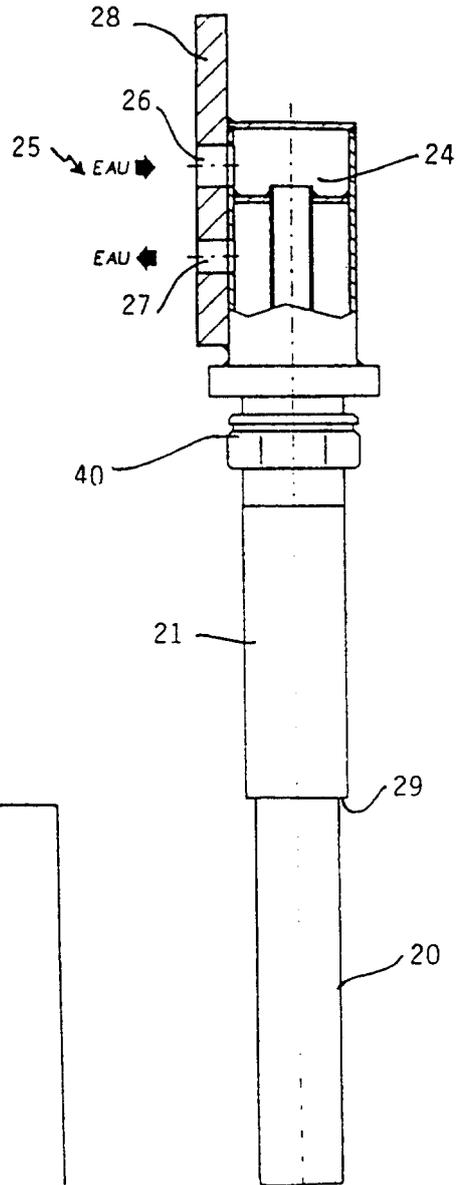


Fig 5

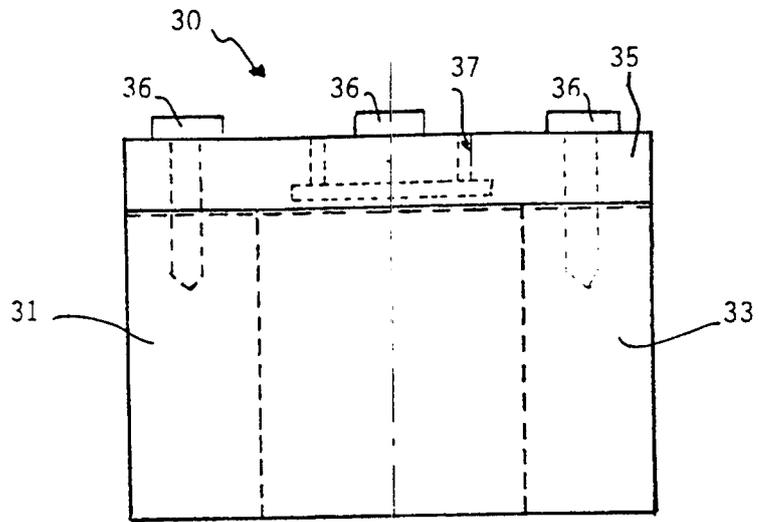


Fig 6

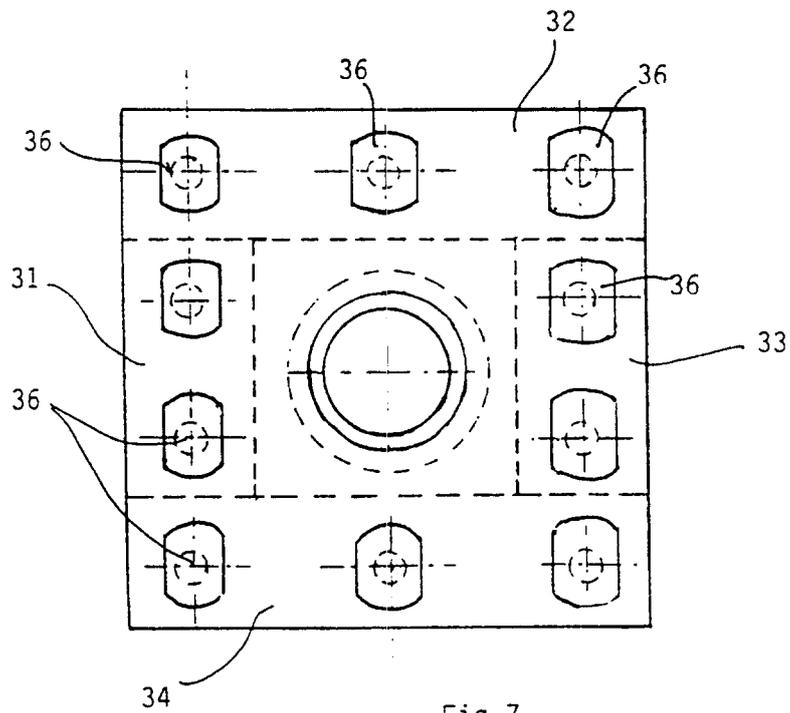


Fig 7

