chercher un autre emplacement, en matière de travaux hydrauliques, notamment, où cet emplacement est commandé, pour le barrage, par le resserrement des berges, pour l'usine, par la situation qui permettra un accès facile et donnera la possibilité de créer en aval un bassin compensateur, sans parler encore d'autres considérations secondaires.... Puis, si l'on envisage la conduite de dérivation, accrochée au flanc d'un coteau, ou enfoncée dans un rocher, (aussi dur quelquefois en apparence extérieure que riche en poches intérieures), quel aléa ne trouve-t-on pas pour l'avenir ?

L'article 1792, néanmoins, est formel. Et la jurisprudence l'a commenté, en disant qu'il subsiste, avec tous ses effets, à l'encontre de l'entrepreneur, même lorsque celui-ci, ayant prévu le danger, a prévenu le propriétaire, « l'homme de « l'art ne devant pas, ainsi que l'a fort bien dit la Cour « suprême, exécuter les travaux qui lui sont proposés quand « ils doivent être exécutés de manière que leur solidité soit « compromise » (Dalloz, 1889, I, page 90-91) (1). Il suffirait, en effet, que l'entrepreneur ait pris une précaution, qui ne tarderait pas à revêtir, en pratique, le caractère d'une simple formalité, pour couvrir sa responsabilité, ce qui lui permettrait de toucher les bénéfices quand l'affaire réussirait, en éludant toute crainte pour l'avenir. Il faudrait, pour qu'il en fût autrement, qu'en passant son marché il spécifiât, d'une façon formelle, la non garantie de la solidité du sol, car il y aurait évidemment entre les deux contractants une contrepartie à stipuler.

Mais qu'on le remarque bien : Il n'y a dans l'article 1792 qu'une *présomption*, et qui dit : *présomption*, indique par là-même : *preuve contraire*.

Si, notamment, l'entrepreneur prouve que, s'étant aperçu du caractère dangereux des ouvrages qu'il accomplissait à cause du sol, où à cause des matériaux qui lui étaient imposés, il a pris toutes les précautions humainement possibles, pour diminuer les risques et donner à une fondation la plus grande solidité, s'il prouve que lui, travaillant à forfait, ayant par conséquent intérêt à être aussi économe que possible, n'a rien ménagé pour accomplir tout ce que son devoir lui commandait; s'il peut donner des exemples techniques, par lesquels il sera démontré que, dans d'autres travaux de pareille nature, les précautions prises ont suffi pour assurer la solidité, il est certain que la présomption de faute s'écroulera, et que l'entrepreneur pourra sortir du débat avec une responsabilité réduite à zéro, ou au moins considérablement diminuée.

En tout cas, tout le monde reconnaît que l'entrepreneur ne saurait être responsable de ce qu'il était humainement impossible de prévoir, notamment si, par une circonstance naturelle ou accidentelle, le terrain se trouvait excavé au-dessous des couches jusqu'auxquelles on creuse généralement les fondations, et sans qu'il y ait lieu de penser que l'architecte ou l'entrepreneur aient pu en avoir connaissance (Dalloz, Supplément, V° Louage d'ouvrage d'industrie, n° 111).

(1) Bien que cet arrêt soit relatif à la question des matériaux, il nous paraît avoir une portée générale extrêmement intéressante sur l'article 1792, qui y est seul visé. — Voir aussi Code civil annoté. Dalloz, article 1792, n°s 207 et suivants.

2°). Si l'on se trouve en présence de l'article 2270, (défectuosité survenant a un gros ouvrage fait a prix de série), le propriétaire doit faire la preuve de la faute de l'architecte,

Cette preuve résultera des faits de la cause : à notre avis, comme dans le cas précédent, il ne faudra pas admettre que l'entrepreneur pourra s'exempter de toute responsabilité par cette simple considération qu'il a simplement prévenu le propriétaire, ce moyen étant, comme nous l'avons indiqué trop commode. La jurisprudence — à bon droit — refuse à l'entrepreneur le droit de conclure à son exonération complète, par ce seul fait que le propriétaire se serait immiscé dans ses travaux. Mais, cependant, la responsabilité de l'entrepreneur pourra en être certainement diminuée. Il est impossible de donner des règles exactes et inflexibles pour savoir le point où cette responsabilité commence et celui où elle finit ; mais l'essentiel, à notre avis, serait de bien déterminer ce à quoi les parties ont entendu s'engager. C'est ce qui a été fort bien dit par un arrêt assez récent de la Cour d'appel de Paris, rendu sur une affaire où le mouvement des terrains avait eu une importance capitale : que, pour déterminer la responsabilité survenant après la confection de l'ouvrage, « il faut s'attacher à préciser les conditions de « fait dans lesquelles le mandat a été accepté et débattu, et « celles dans lesquelles les travaux ont dû, à raison de leur « nature, être entrepris et exécutés » (D. 1894, 2, 522).

***

On pourrait dire, tout aussi élégamment, que, lorsqu'un industriel et un entrepreneur passent entre eux un marché pour la construction d'une usine ou une installation intérieure, il y aurait lieu, dans l'intérêt des deux, à savoir exactement ce à quoi les parties s'engagent réciproquement. Les responsabilités seraient alors, en cas d'avarie, plus rapidement jugées. Cela ne supprimerait peut-être pas complètement *le procès*, parce que celui qui se sentirait obligé de payer le ferait souvent pour éloigner l'heure douloureuse, mais, soustrait à l'arbitrage du juge, on aurait au moins le plaisir de ne gagner que les bons procès, et de ne perdre que les mauvais.

Paul Bougault,
Avocat à la Cour d'Appel de Lyon.

LE VERRE

et sa Fabrication au Four électrique

(Suite et fin.)

IV. PROCÉDÉS RÉCENTS DE FABRICATION

La fabrication du verre au moyen du four électrique est une des plus récentes applications de ce dernier ; dans cette opération, il est, en effet, nécessaire de posséder une source d'énergie calorifique considérable, et d'utiliser des dispositifs permettant d'empêcher les impuretés de la combustion de se mélanger à la masse fondue, afin d'obtenir un produit doué d'une transparence parfaite, au moins lorsqu'il s'agit de verres de bonne qualité ; le four électrique produisant une quantité de chaleur beaucoup plus considérable que celle que l'on peut obtenir par n'importe quel autre procédé (3.500°), il était tout indiqué pour la préparation du verre. Les découvertes de Nernst sur la conductibilité des terres chauffées à un certain degré de température ont

Article published by SHF and available at http://www.shf-lhb.org or http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1907006

permis de développer et de perfectionner les procédés de fabrication du verre par l'électricité que nous allons étudier. L'utilisation des chutes d'eau permettant, en outre, d'installer des usines dans des conditions économiques et dans des régions éloignées de centres producteurs de combustible, donne de plus à cette importante question un véritable intérêt.

D'après M. Weight, l'idée première de la fabrication du verre au moyen de l'énergie électrique est originaire d'Allemagne, où elle fut brevetée par S. Reich et Cie, en 1881. Dans le brevet qu'il prit à Berlin, il spécifiait que son procédé consistait à faire tomber le mélange des matières premières à travers un tamis de fils de platine portés au rouge par le passage d'un courant électrique ; le four qu'il employait était ainsi du type à résistance et comprenait principalement un creuset de charbon ouvert à sa partie inférieure et garni intérieurement d'un réseau de fils de platine ; le mélange qui traversait le creuset était fondu par la chaleur développée et tombait dans des récipients disposés à la partie inférieure de l'appareil. Ce four n'a reçu, jusqu'ici, aucune application véritablement industrielle ; il possédait, du reste, l'inconvénient de dépenser une grande quantité d'énergie électrique pour une faible production de verre et, en outre, le liquide fondu venait, à chaque instant, obstruer les espaces destinés à son écoulement, rendant ainsi la marche irrégulière et défectueuse. Par contre, le verre produit dans ces conditions possédait la qualité importante d'être clair et transparent, aucune impureté ne venant le souiller au moment de sa fusion et de son écoulement dans les auges d'affinage.

Le procédé Askenasy, qui date de 1896, repose sur un principe différent et avait comme but principal de former une sorte de couverte sur les briques et les tuiles en les soumettant à l'action de l'arc électrique ; la chaleur développée par ce procédé faisait, en effet, fondre une certaine épaisseur de la couche externe de la brique en la transformant en une masse vitreuse plus ou moins homogène, mais suffisamment imperméable pour empêcher l'entrée de l'eau dans les cavités de la brique et pour lui donner l'aspect de la porcelaine.

Quelques années plus tard, en 1899, une Société du nom de Becker se constitua à Cologne dans le but de préparer et de travailler le verre par l'électricité, d'une façon pratique ; l'appareil qui fut mis en essai était constitué par un four électrique à arc, tel que celui qui est représenté par la figure 5. Les matières premières, préalablement mélangées, sont introduites dans l'appareil par une trémie de chargement *b* et tombent ensuite sur une succession de trois arcs situés à des étages différents. Sous l'action de la chaleur ainsi développée, le mélange entre en fusion et tombe dans une auge *a* où il est affiné et recueilli pour être travaillé.

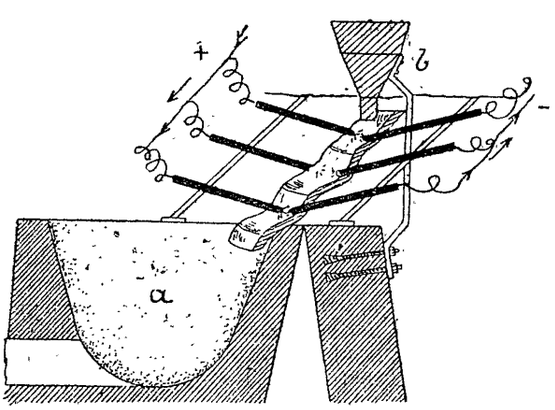

Fig. 5. — Four Becker (premier type de four)

Il est essentiel, dans cette préparation, que l'auge d'affinage soit à une température assez élevée ; au début, on utilisait un foyer auxiliaire pour la chauffer ; dans un brevet plus récent, on a utilisé comme agent de chauffage, des résistances parcourues par un courant qui, elles-mêmes, avaient succédé à l'emploi d'arcs supplémentaires. Mais on s'est bien vite aperçu qu'il y avait, dans ce procédé, une dépense de chaleur inutile et qu'on pouvait facilement remplacer ce foyer par la chaleur perdue de l'appareil ; au moyen d'un dispositif convenable, l'appareil pouvait, de plus, fonctionner sans arrêt.

Comme la masse du verre fondue renfermait toujours une certaine quantité de grumeaux, ne permettant pas de l'employer telle quelle, on lui faisait subir une recuisson dans une deuxième auge, et le verre, une fois purifié, pénétrait dans la troisième auge. Les trois paires d'électrodes étaient constituées par des charbons ayant un diamètre de 35 millimètres et une longueur de 40 centimètres. Il arrivait très souvent, par ce système, qu'un arc était interrompu pour une cause ou pour une autre ou que deux électrodes d'un même arc venaient à se toucher. Comme conséquence inévitable mais en même temps regrettable, l'alternateur subissait de fortes variations de charge et, par suite, il était nécessaire qu'il possédât une puissance supérieure à celle qui était régulièrement utile, afin de résister aux à coups qui, à chaque instant, venaient modifier sa marche.

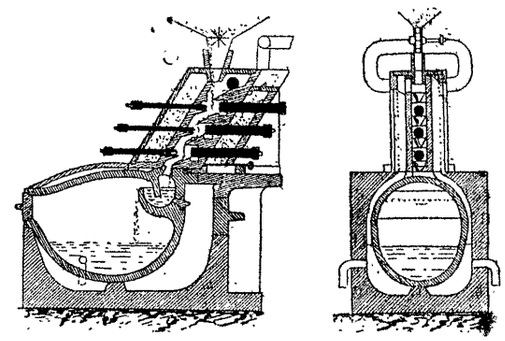

Fig. 6 et 7. — Four Becker (deuxième type de four : coupes longitudinale et transversale).

Différentes améliorations ont été successivement apportées à ce four qui, comme on le voit, présentait de nombreux inconvénients. On chercha d'abord à réduire autant que possible l'usure des électrodes, en diminuant l'accès de l'air dans l'appareil et en ne laissant qu'une seule ouverture pour permettre aux gaz de la réaction de se dégager. Comme on peut s'en rendre compte par les figures 6 et 7, les arcs occupent la même position que précédemment, et le mélange arrive dans l'appareil au moyen d'une trémie disposée semblablement ; mais le canal destiné au passage du verre est beaucoup plus étroit et l'air ne peut que difficilement y pénétrer. Pour augmenter l'isolement des électrodes, on les fait glisser au milieu d'une masse très réfractaire, de manière à les maintenir en même temps dans une position invariable.

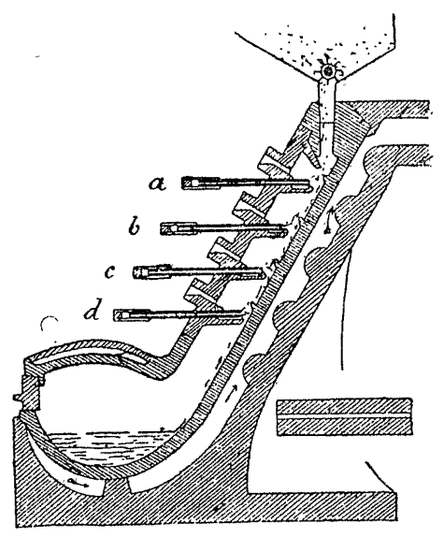

Fig. 8. — Four électrique à bougies Jablochkoff, pour la fabrication du verre.

Plus tard, on substitua à l'arc constitué par deux électrodes opposées celui formé par toute une série de bougies Jablochkoff (figure 8), celles-ci *a*, *b*, *c*, *d*, étaient disposées de bas en haut, de telle sorte que l'arc éclatant entre les deux pointes d'une même bougie, venait prendre le mélange au passage et en provoquer la fusion ; le verre liquide s'écoulait ensuite dans une auge circulaire comme dans les appareils précédents. Mais, comme on devait s'y attendre, le rendement était toujours très mauvais, la marche du four très défectueuse et le fonctionnement des arcs constamment irrégulier, ceux-ci éclatant tantôt au sein même du mélange, tantôt en dehors. On abandonna donc rapidement ce système et l'on en revint aux fours ordinaires à arcs en s'attachant surtout à les perfectionner par un bon rendement.

C'est ici qu'il faut placer les importants essais effectués par Bronn et Vœlker qui permettent d'espérer pour bientôt une heureuse solution. Bien que ces expériences de laboratoire, faites sur une grande échelle, n'aient pas encore donné de résultats assez satisfaisants pour qu'ils soient immédiatement applicables à la production industrielle du verre, elles méritent cependant d'être étudiées par suite de l'intérêt qu'elles présentent et de l'avenir qui semble leur être réservé.

L'usine électrique dont une faible partie seulement de l'énergie

était destinée aux essais de fusion possède deux alternateurs triphasés de 500 chevaux, excités chacun par une dynamo à courant continu de 120 volts ; le laboratoire d'essai comprend un tableau amenant le courant à trois transformateurs abaissant la tension à 120 volts ; un second tableau sert à la mise en marche des fours électriques, chaque appareil n'utilisant qu'une phase de l'alternateur.

Le four (fig. 9 à 11) se compose d'une succession d'arcs voltaïques E dans lesquels s'opère la fusion du mélange des matières premières ; cette masse une fois à l'état liquide, s'écoule goutte à goutte dans une auge en terre réfractaire A chauffée par les procédés ordinaires. Le moufle dans lequel s'opère cette fusion possède un fond disposé en gradins ; les matières premières s'y déversent lentement et régulièrement par la partie supérieure à l'aide d'un entonnoir de chargement T et, au contact de la haute température des arcs, elles entrent peu à peu en fusion ; les arcs sont produits par trois séries d'électrodes introduites de part et d'autre dans les parois verticales du moufle. L'opérateur peut suivre la marche de l'essai au moyen de deux regards pratiqués dans ces parois qui sont fermées en temps ordinaire par des bouchons en terre réfractaire.

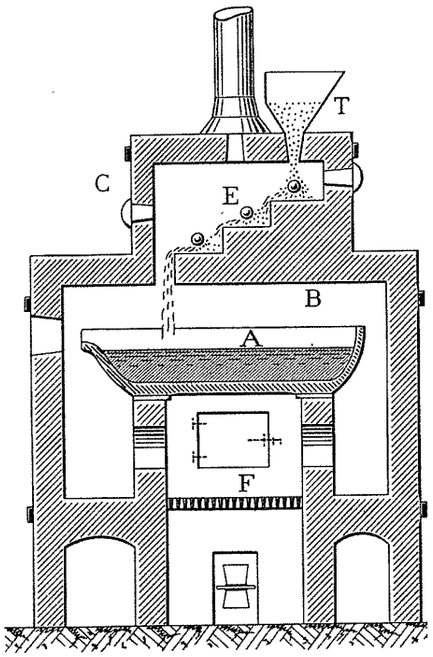

Fig. 9. — Four Becker, type 1901 (coupe verticale)

Le réglage des arcs s'y fait à la main. Sous le moufle, se trouve l'auge destinée à recevoir le mélange lorsqu'il est complètement fondu ; elle est complètement enfermée dans la maçonnerie B du four et elle est chauffée soit par du charbon, soit par la flamme du gaz ordinaire. La mise en marche présente certains inconvénients car, avant de faire l'essai, il faut chauffer pendant environ deux heures la cuve d'affinage, ce qui occasionne une grande perte de temps et une dépense supplémentaire de combustible.

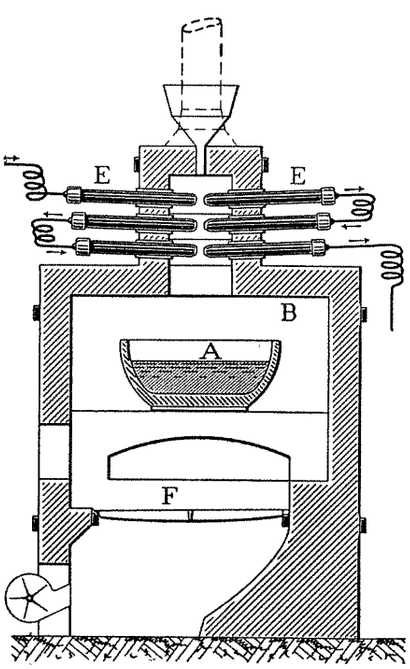

Fig. 10. — Four Becher, type 1901 (conpe transversale)

Les principaux defauts de cet appareil sont les suivants : tout d'abord, le verre que l'on obtient dans ces conditions n'est constitué, d'après M. du Welz, que par un agglomérat amorphe, inutilisable dans l'industrie ; la quantité obtenue en est, de plus, beaucoup trop faible (quelques grammes seulement en un quart d'heure) et les variations de puissance pendant la marche y sont grandes et fréquentes : elles tiennent au réglage fort primitif des électrodes et au mode d'introduction des matières premières, formant un amoncellement au voisinage de l'arc et modifiant ainsi la résistance du circuit et l'intensité du courant, enfin aux interruptions de courant et aux courts-circuits se produisant accidentellement.

D'après les chiffres qui résultent de ces essais, on trouve que, par kilogramme de verre fondu, il faut une puissance de 7,5 chevaux environ aux bornes du four. En admettant un rendement de 95 °/o pour les canalisations, transformations, connexions, un rendement de 85 °/o pour l'alternateur en marche, une consommation de 8 kilogrammes de vapeur par cheval effectif et une quantité d'eau vaporisée par kilogramme de charbon égale à 8 kilogrammes, on trouve que la consommation de charbon par kilogramme de matière fondue est de 9 kg. 3. Dans les fours ordinaires de verrerie, la consommation de combustible ne varie que de 0 kg. 5 à 2 kg. 8 par kilogramme de verre fondu. Les inventeurs prétendent cependant qu'avec leurs appareils qui, au début, avaient un très mauvais rendement, on pourrait arriver à obtenir la fusion de 1 kilogramme de verre avec une dépense de 1 ou 1 kg.5 de charbon seulement.

Les perfectionnements à apporter à ce four se résument de la manière suivante : il convient tout d'abord de modifier la construction des appareils, quant à la position respective des arcs, puis de supprimer le chauffage par le coke ou par les gaz hydrocarburés, la température et la quantité de chaleur nécessaires devant pouvoir être obtenues électriquement. En plaçant la verrerie à proximité des chutes d'eau, on pourrait aussi réaliser une économie notable et actionner les broyeurs, chargeurs et mélangeurs par des moteurs électriques.

Afin de supprimer toute action électrolytique du courant sur le verre fondu, il faut éviter l'emploi du courant continu et donner la préférence au courant alternatif *triphasé*, celui-ci étant aujourd'hui beaucoup plus utilisé que le courant alternatif simple pour actionner les différents moteurs de l'usine. Il faut également bien prendre garde au dépôt de cendres dû à la combustion des charbons, qui amène toujours une coloration plus ou moins accentuée de la masse vitreuse. Il faut enfin pouvoir régler automatiquement la position des charbons et la longueur des arcs et obtenir une température assez élevée pour provoquer l'épuration du verre et la précipitation des grumeaux, sans qu'elle agisse cependant pendant un temps très long, ce qui aurait pour grave inconvénient de dévitrifier partiellement et peut-être même totalement la masse.

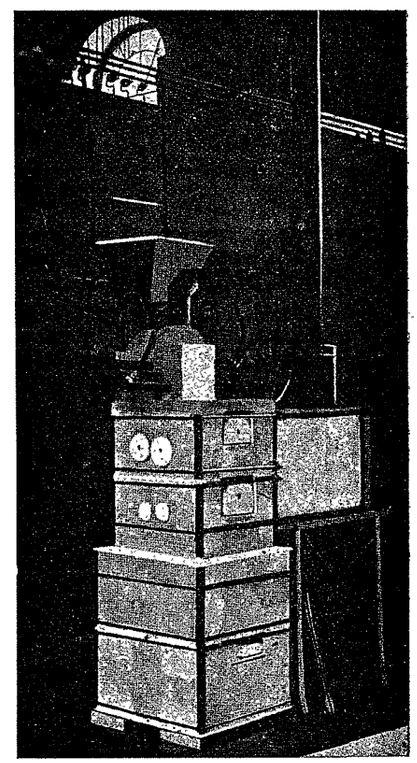
Fig. 11. — Four Becker, type 1901 (Vue extérioure)

En construisant des appareils basés sur la mise en pratique de ces considérations et perfectionnés grâce aux modifications que chaque industriel peut apporter lui-même aux modèles antérieurs, il y a lieu d'espérer que les difficultés rencontrées jusqu'ici s'aplaniront peu à peu et qu'on arrivera rapidement à d'excellents résultats.

Le docteur Vœlker a également construit un four électrique pour la fabrication du verre représenté en coupe par les figures 12 et 13. Les matières premières, une fois mélangées et réduites en poudre sont amenées à la partie supérieure de l'appareil par un transporteur ; ce mélange rencontre sur son trajet des couloirs qui le laissent descendre dans les canaux *a* ; de là, il pénètre dans un autre canal et débouche par l'orifice *c*. Une série d'arcs se produisent à l'extrémité des bougies Jablochkoff *j* et entre les charbons D, et dégagent la quantité de chaleur nécessaire pour opérer la fusion des matières destinées à la fabrication du verre. Une fois fondu, le mélange tombe dans la cuve I qui sert à l'affiner ; dans ce but, deux électrodes *e* plongent dans la masse liquide et y amènent le courant ; le verre ainsi affiné, passe dans un récipient annulaire C qui entoure la cuve I ; lorsqu'il est rempli, le

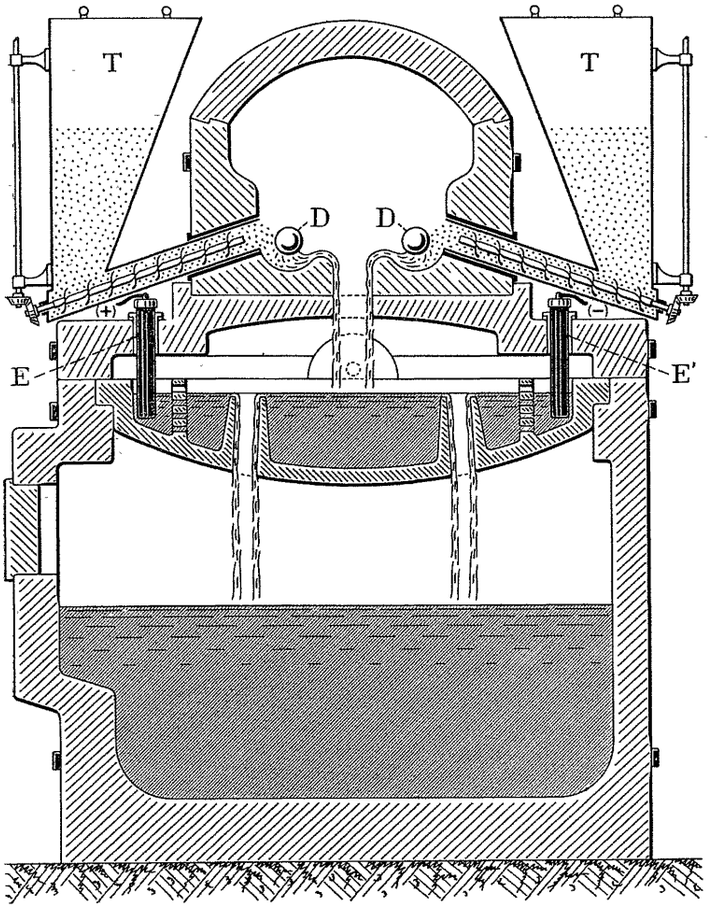

Fig. 12. — Four Vœlker (coupe verticale).

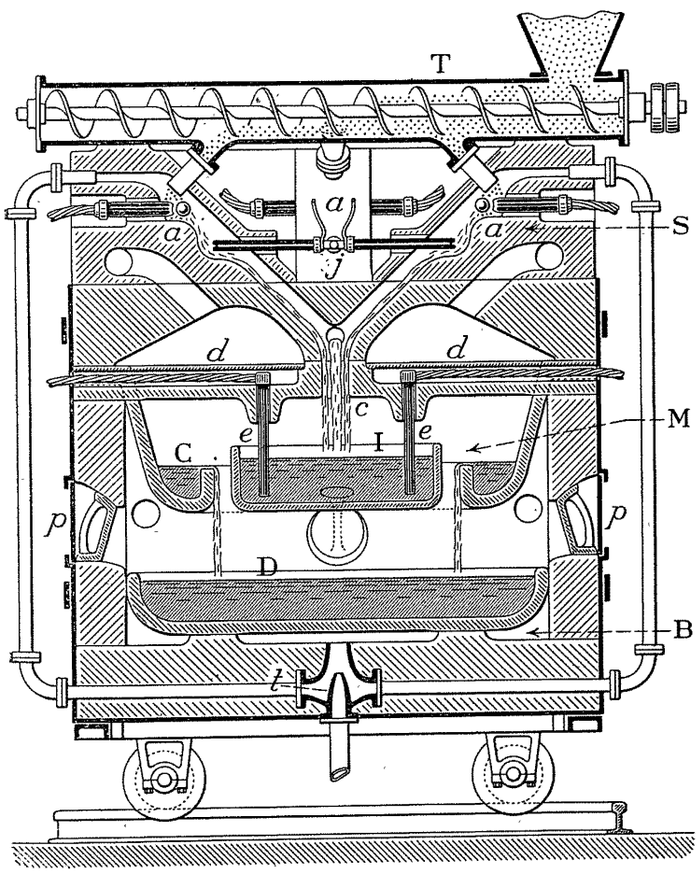

Fig. 13. — Four Vœlker (coupe transversale).

liquide s'écoule dans un bassin situé à la partie inférieure du four, dans lequel on peut le puiser à l'aide de cannes pénétrant par les ouvertures *q* qui sont fermées pendant la marche de l'opération.

Dans un système de four présentant à peu près les mêmes données théoriques que le précédent, le Dr Vœlker a cherché à réduire la dépense de courant, en rendant meilleure conductrice de l'électricité la masse de verre qui, à la température ordinaire, est un isolant presque parfait. Pour cela, il ajoute au mélange habituel (sable fondant et sel de calcium), une substance conductrice, telle que du graphite ou de la poudre de charbon, dans la proportion de 10 °/₀ environ. De cette façon, la masse vitreuse devient semi-conductrice, laisse passer faiblement le courant et s'échauffe en vertu de loi de Joule, de sorte que le verre exige, pour sa formation, une quantité de calories beaucoup plus restreinte. Mais il est bien évident que ce procédé n'est applicable que lorsqu'il s'agit de la fabrication du verre noir, tel celui qui sert à la confection des bouteilles.

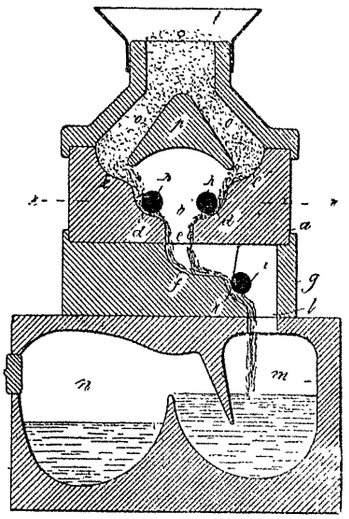

Fig. 14. — Four à « arc auxiliaire »

On doit au même inventeur un autre système de four, que nous appellerons « four à arc auxiliaire », pour le distinguer des précédents, et qui se compose essentiellement (figure 14) d'un massif en maçonnerie, à la partie supérieure duquel s'effectue le chargement des matières premières à l'aide d'une trémie *l* ; le mélange s'écoule ensuite de chaque côté d'une pièce *p*, par les couloirs *o*, et se chauffe au moyen de deux arcs *h* ; la figure ci-jointe représente une coupe verticale du four ; la masse fondue s'écoule en *l* et ensuite dans le réservoir *m*, où elle se réchauffe au moyen d'un *arc auxiliaire*, qui a également pour mission de maintenir la partie inférieure de l'appareil à une température suffisamment élevée ; après avoir rempli le réservoir *m*, le verre passe en *n*, où il est complètement clair. Il faut, dans ce four, comme dans les précédents, échauffer l'appareil avant de le mettre en fonctionnement, et la mise en marche n'a lieu que lorsque le creuset est assez chaud pour qu'un fragment de verre puisse s'y maintenir à l'état fondu ; l'appareil comporte, du reste, différentes dispositions non représentées sur la figure, qui ont précisément pour but d'arriver à ce résultat.

M. Bronn, qui a entrepris de nombreux essais tenant à la fois du laboratoire et l'industrie pour la fabrication électro-thermique du verre, a imaginé un grand nombre d'appareils que nous n'entreprendrons pas de décrire tous en raison de leurs nombreux points communs de ressemblance, mais que nous étudierons en résumé, à cause de l'intérêt pratique qu'ils présentent, au point de vue pratique.

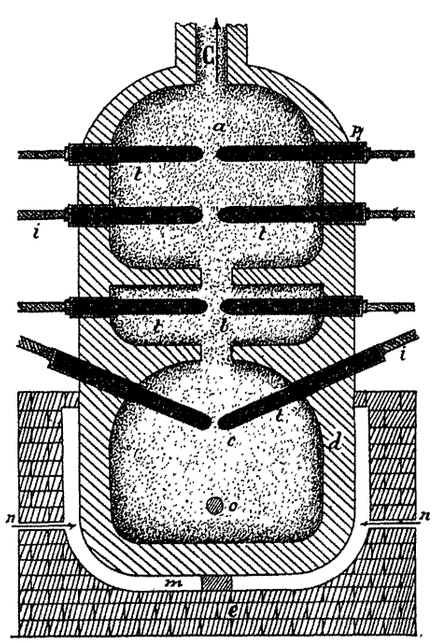

Fig. 15. — Four Bronn (premier type de four)

Un de ses premiers appareils (fig. 15) se composait de deux creusets, *a* et *b*, en terre réfractaire, placés l'un au-dessous de l'autre. Dans le premier, venaient pénétrer deux paires de charbons, tandis que le second n'en contenait qu'une seule. Le verre, qui était introduit à l'état de mélange par la partie supérieure du

four, tombait d'abord dans le premier creuset, où il subissait une fusion plus ou moins complète, amenant la combinaison des éléments, et de là, arrivait en *b*, où le second arc l'amenait complètement à l'état liquide. A la partie inférieure, se trouve l'auge d'affinage *c*, qui peut, à la rigueur, être maintenue à une température suffisamment élevée, au moyen d'un quatrième arc. Dans ses essais, M. Bronn préférait subsistuer à cette paire d'électrodes deux ou trois brûleurs pénétrant par les ouvertures *n* et destinés à maintenir le verre à l'état liquide ; une fois clarifié, celui-ci s'écoulait du four par l'ouverture *o*, fermée en temps ordinaire par un bouchon en terre réfractaire.

Au moyen de regards convenablement disposés, il est toujours facile de se rendre compte des différentes phases de la fusion des matières premières, et de leur enrichissement en substance vitreuse; de même, pour observer les arcs, il suffit de disposer, sur la partie extérieure du four, un certain nombre de cadres métalliques portant deux lames de verres superposées, dont l'une est de couleur violette et l'autre verte. Par cette précaution, on évite complètement l'influence toujours pernicieuse des lumières trop vives qui produiraient sur la rétine des picotements de longue durée, amenant parfois un malaise complet.

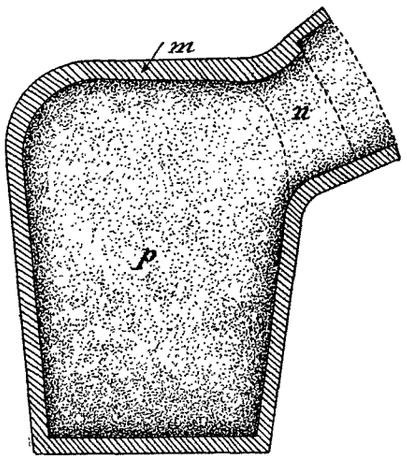

Fig. 16. — Creusel en terre réfractaire pour la fabrication du verre.

L'inconvénient principal de ce four consiste en ce que le verre fabriqué est presque toujours coloré par les impuretés poussiéreuses, provenant du tuyau C, et qui, en s'échappant dans l'atmosphère, rencontrent le verre; de plus, le tirage entraînant la flamme des arcs vers le haut, sa chaleur est ainsi très mal utilisée. Aussi, un premier progrès a-t-il consisté à établir un système dans lequel les arcs étaient déviés de haut en bas, c'est-à-dire vers le mélange à faire fondre; au moyen d'électro-aimants convenablement disposés, on pouvait, de plus, diriger la flamme dans n'importe quelle direction, et utiliser la chaleur produite de la manière la plus avantageuse. On sait, en effet, qu'un champ magnétique influence l'arc électrique en cherchant à souffler celui-ci, ou tout au moins en dirigeant sa flamme, comme un jet d'air ou d'oxygène agit vis-à-vis de celle d'un chalumeau.

Ces essais ont montré à l'inventeur Bronn que la qualité du verre obtenu par fusion électrique est indépendante de la masse soumise à l'opération. En effet, en effectuant la fusion d'un mélange comprenant 100 parties de sable (silice), 10 de soude, 25 d'azotate de sodium, 15 de carbonate de chaux et quelques centièmes d'oxyde d'antimoine, de bioxyde de manganèse et d'oxyde de cobalt, on obtient toujours un verre fortement coloré, lorsque l'opération est effectuée au moyen du four électrique, alors que les procédés ordinaires donnent une matière douée d'une parfaite transparence et complètement blanche. Il est donc naturel de penser que cette coloration persistante et irrégulière de la masse. dans le cas de l'emploi d el'ar célectrique comme agent de chaleur, n'est due qu'à la nature des électrodes utilisées dans ces fours, c'est-à-dire à la présence de poussières de charbon dans le verre liquide, se maintenant dans sa masse après solidification de celle-ci.

Une addition de salpêtre au mélange donne bien un verre plus clair, parfois même très blanc, mais le produit obtenu contient alors de nombreux grains de sable non fondus, disséminés irrégulièrement dans le verre. Il faut donc, à tout prix, chercher à supprimer la chute des poussières charbonneuses dans le liquide : étant donné que la quantité de poussières augmente avec la longueur de l'arc et avec la petitesse des électrodes, on chercha d'abord à diminuer le frottement de celles-ci dans les ouvertures *p* des creusets, en les introduisant dans un anneau de porcelaine, où en induisant leur surface d'un mélange de silicate de soude et d'amiante.

L'emploi des électrodes métalliques (cuivre et cuivre-fer) a de même été tenté, mais il est difficile, sinon impossible, d'empêcher la fusion rapide des baguettes ainsi constituées, même si un courant d'eau froide est utilisé pour les maintenir à une basse température ; les pointes entre lesquelles jaillit l'arc, sont rapidement volatilisées, les interruptions de courant sont fréquentes et la température produite peu élevée, par suite du faible point d'ébullition des métaux, comparativement à celui du carbone (3.600°).

La préparation d'un verre riche en silice paraît avantageuse lorsqu'on emploie le four électrique pour la préparation de cette substance, et dans tous ces appareils, il convient de faire un choix judicieux du système d'accouplement à adopter. On peut, en effet, comme le montrent les figures 17, 18 et 19, disposer deux paires

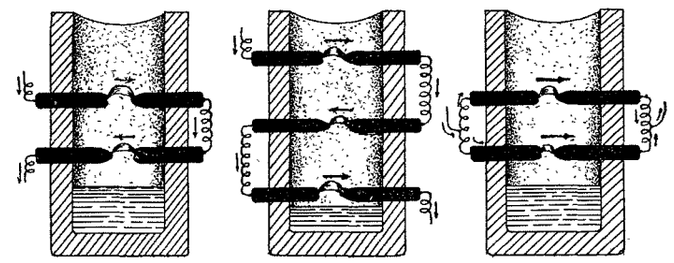

Fig. 17, 18 et 19.
Différents groupements affectés aux électrodes de charbon dans la fusion du verre au moyen de l'arc électrique.

de charbons l'une au-dessus de l'autre, les deux arcs étant en série, ou bien adopter une disposition semblable avec trois arcs au lieu de deux, ou enfin placer directement chaque paire de charbons sur une dérivation indépendante des autres. Dans le premier cas, on a deux arcs dirigés en sens inverse, comme le montrent les flèches indiquées sur la figure; dans le second, trois arcs alternés qui rendent ainsi l'opération plus régulière, et, dans le troisième cas, deux arcs dirigés dans le même sens. La meilleure disposition à adopter est toujours en relation étroite avec les résultats que l'on désire obtenir, la régularité de la marche et la qualité des produits ayant, comme facteurs indispensables, la bonne distribution de la chaleur et la pureté des électrodes utilisées pour produire les arcs.

Dans un autre type de four du même auteur, les matières premières sont mélangées, après avoir été pulvérisées, à une substance capable de lier convenablement le mélange ; cette substance, qui peut être du silicate de soude, de la chaux hydraulique ou même du plâtre, ne nuit pas à la pureté du verre ni à sa

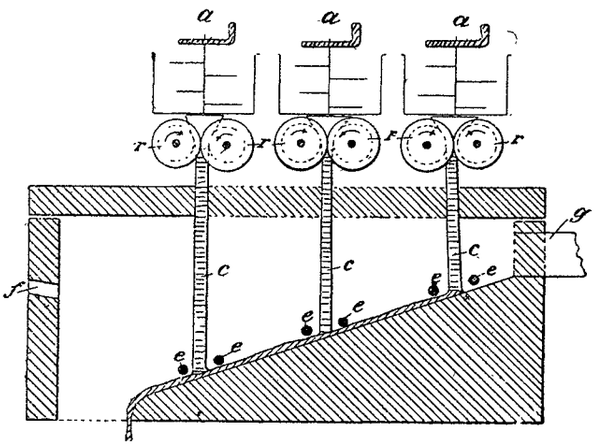

Fig. 20. — Four Bronn (deuxième type de fours)

transparence. Le mélange, ainsi préparé, arrive entre deux rouleaux de compression qui le laminent, pour ainsi dire, et le réduisent en feuilles ou tiges homogènes et pâteuses, passant ensuite sur un second rouleau chauffé, dans le but de lui enlever l'humidité qu'il pourrait contenir. Un plan incliné forme la plaque du four électrique, qui comprend plusieurs arcs à électrodes de charbon et reçoit les feuilles; celles-ci peuvent traverser l'appareil à une vitesse déterminée par la rapidité de fusion et par suite de formation du verre.

Ce four peut fonctionner sans interruption; la tige continue de matière brute est desséchée avant de pénétrer dans l'appareil, par

l'intermédiaire de plaques chauffées. Comme on le voit sur la figure 20, l'appareil destiné à effectuer le mélange des matières premières est en *a* ; celles-ci, une fois comprimées, passent entre les rouleaux *r* sous forme de rubans *c*, et arrivent enfin entre les électrodes *e* ; le four est muni en *f* d'une ouverture destinée à permettre à l'ouvrier de suivre la marche de l'opération ; lorsque le verre est complètement clarifié et prêt à être travaillé, il s'écoule de l'appareil par une ouverture ménagée à sa partie inférieure pour être ensuite recueilli dans des récipients appropriés.

Grâce à cet appareil, on peut presque annuler les variations d'intensité du courant électrique et supprimer tout contact entre les matières fondues et les électrodes de charbon ; on obtient ainsi un verre tout à fait incolore et d'une grande pureté.

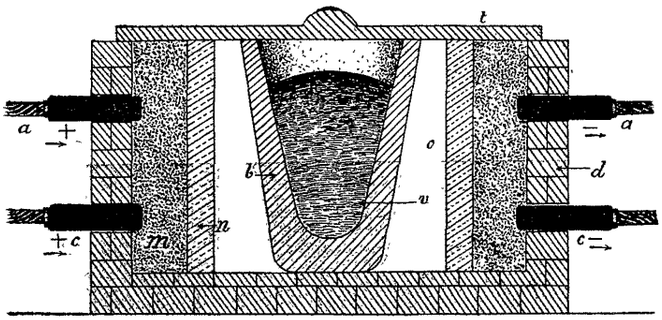

Fig. 21. — Chauffage électrique d'un creuset sans emploi du semi-conducteur.

On doit enfin à M. Bronn une série d'études sur le chauffage électrique des creusets, rendu pratique au moyen de résistances métalliques portées à une température élevée par le passage d'un courant. Parmi les appareils présentant le plus d'intérêt, nous citerons d'abord celui qui est représenté par la fig. 21, et qui se compose essentiellement d'une enceinte extérieure *d*, en matière réfractaire, renfermant le creuset *b*, garni d'un couvercle *t* de même nature. Quatre électrodes de charbon *a* et *c*, traversent le mur *d* et viennent prendre contact avec des grains de charbon très serrés les uns contre les autres, mais jouant cependant le rôle d'une résistance moyenne comparativement à celle des électrodes. Il est toujours indispensable, si l'on veut obtenir de bons résultats, de faire le remplissage aussi uniformément que possible, et surtout de n'exercer aucune pression sur sa masse. La paroi *n* a pour but de tenir le charbon dans une position fixe, en même temps qu'elle sert à transmettre au creuset, à travers l'espace annulaire *o*, vide de substance, la chaleur fournie par le courant au charbon *m*.

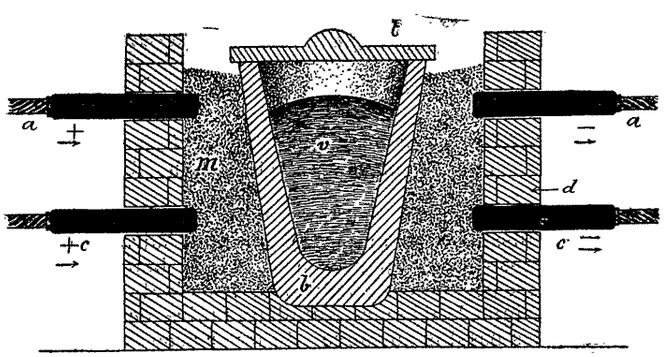

Fig. 22. — Chauffage électrique d'un creuset avec emploi du semi-conducteur.

Avec ce système, on peut retirer le creuset du four lorsque la matière *v* qu'il contient est fondue, et le remettre ensuite en place pour une nouvelle mise en marche. Mais il n'en est plus de même dans le cas du dispositif indiqué par la fig. 22. Le creuset est, en effet, noyé complètement dans la masse pulvérulente semi-conductrice *m*, et fait presque corps avec l'enceinte extérieure *d* par sa base, de sorte que la marche de l'opération y est plus délicate ; par contre, la transmission de la chaleur s'y effectue plus complètement, la couche d'air entourant le creuset ayant disparu. Le verre fondu doit être directement prélevé dans le creuset, lorsqu'on désire le travailler ou le mouler dans des récipients appropriés.

M. Gabreau, maître verrier à Paris, a breveté un procédé de fusion électrique du verre par l'arc, qui n'est pas sans intérêt, mais qui ne paraît pas avoir beaucoup de chances, à notre avis, de devenir un jour applicable à l'industrie. Son appareil se compose (fig. 23) d'un creuset *m* en terre réfractaire contenant les substances destinées par leur fusion à former le verre et pouvant être élevé ou abaissé au moyen d'un cylindre *i* supportant un plateau non-conducteur. Le mouvement de montée ou de descente peut être communiqué au creuset, soit au moyen d'une manivelle ordinaire, soit à l'aide d'un système à engrenage. Le chauffage s'effectue au moyen d'une ou plusieurs paires de charbons *c c'* et l'arc jaillit extérieurement au creuset afin de ne pas agir sur la masse de verre autrement que par la quantité de chaleur qu'il lui fournit. Comme le creuset peut être placé, ainsi que nous venons de le voir, dans toutes les positions verticales, le chauffage peut s'y exercer parfaitement et la fusion du mélange y être complète. Le dégagement des gaz et leur mouvement ascendant s'y opèrent au moyen des canaux *t*, *t'*, *t''*, *t'''*, ménagés au-dessous et à la partie supérieure du creuset et à l'intérieur même de l'enceinte *d* qui, par sa nature réfractaire, s'oppose à la déperdition inutile de la chaleur par rayonnement.

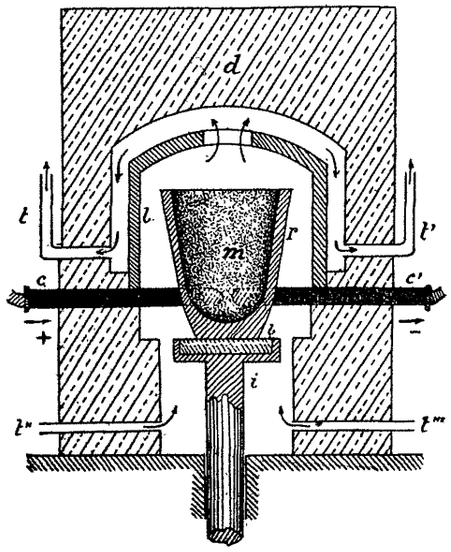

Fig. 23. — Four Gabreau.

Dans le four Lühne, qui est très récent et d'origine allemande, l'arc est combiné à un système de résistances et le four comprend trois parties ; la partie supérieure constitue, en réalité, un four à arc pour fondre les matières premières, la partie intermédiaire contient des résistances de chauffe destinées à affiner la masse, et le verre coule enfin dans un réservoir ou bassin placé à la partie inférieure de l'appareil.

Pratiquement, le four se compose d'un récipient A (fig. 24) dont l'enveloppe extérieure *a* est inclinée vers le bas et doublée intérieurement d'une couche de terre réfractaire *c* ; entre ces deux enveloppes se trouve un espace *b* que l'on remplit de substances très mauvaises conductrices de la chaleur, telles que le verre pulvérisé, par exemple. L'arc électrique jaillit à la partie inférieure du four entre deux électrodes positives et une négative ; l'électrode négative 1 est placée à angle droit des deux positives *2* et *3* ; en général, les extrémités des charbons sont reliées entre elles afin de former un seul groupe que l'on réunit électriquement au pôle positif d'une dynamo ; l'intensité du courant peut être réglée au moyen de résistances, et l'ensemble des électrodes est disposé de telle façon que les matières premières puissent passer entre les parois *c* et les électrodes *1* et *2* d'un côté et entre les électrodes *1* et *3* de l'autre, pour venir en contact avec les arcs qui jaillissent entre elles. Une ouverture *g* est pratiquée à la partie inférieure du four, et en dessous, l'espace *B* présente un fond incliné dans lequel sont fixés les semi-conducteurs *4* et *5* ayant pour mission de maintenir la masse de verre liquide à une température assez élevée, pour qu'elle puisse conserver toute sa limpidité ; ces

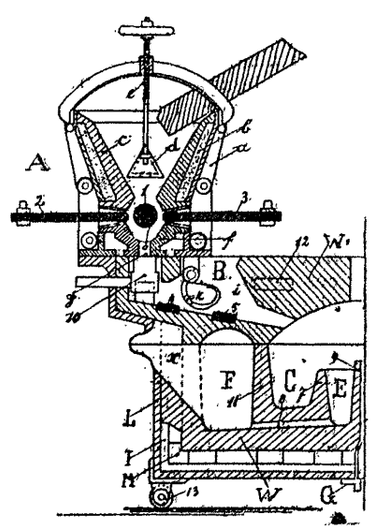

Fig. 24. — Four Lühne (coupe verticale)

semi-conducteurs métalliques communiquent avec les pôles d'une machine dynamo.

L'électrode négative *1* peut être creuse et disposée de telle façon que ses arêtes opposées longitudinalement soient en face des pointes des charbons positifs, de manière à faciliter la formation des arcs. Une pièce prismatique *d*, maintenue par une tige et une vis à manette *e*, sert à régler l'introduction des matières dans le four au fur et à mesure qu'elles y arrivent par le plan incliné situé à la partie supérieure de l'appareil.

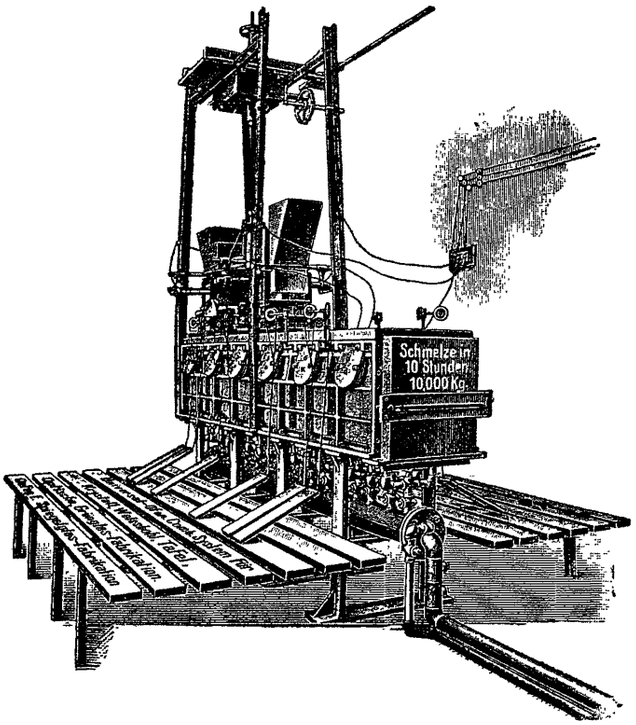

Fig. 25. — Four Lühne (vue extérieure)

Ce four fonctionne de la manière suivante : le mélange solide, après avoir pénétré dans la chambre de fusion A glisse entre la pièce *d* et les parois *c*, et vient fondre entre les électrodes de charbon ; un mélange d'air et d'hydrogène pénétrant dans le four par l'électrode négative *1* s'enflamme au contact de l'arc et maintient ainsi cette électrode à une température très élevée, en même temps qu'il provoque une plus grande longueur d'arc. Après avoir traversé l'espace *g*, la masse liquide arrive dans la chambre *B*, où elle se réchauffe grâce aux semi-conducteurs *4* et *5*. Puis elle passe successivement dans les chambres *C*, *E* et *F*, où elle se purifie, et finalement, elle s'écoule en *x*, d'où elle est évacuée lorsqu'elle est en quantité suffisante. La fig. 25 représente une vue extérieure de ce four.

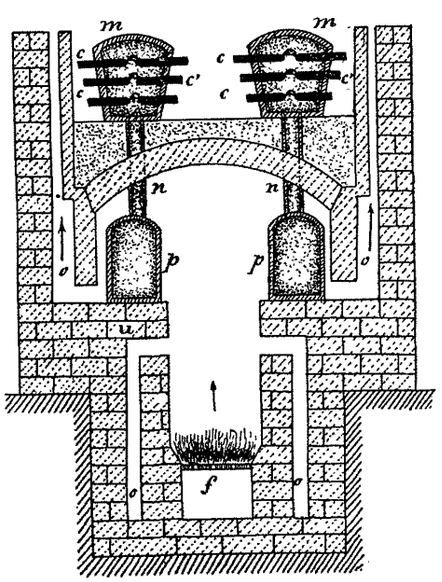

Fig. 26. — Four Styzinski-Eusskirchen (coupe verticale)

Pour terminer cette longue nomenclature de fours, nous dirons quelques mots rapides de l'appareil de H. Styzinski-Eusskirchen, dans lequel l'inventeur a principalement cherché à maintenir le verre à l'état fondu, une fois sa préparation effectuée. Le four représenté par la figure 26 se compose d'une grande chambre à parois réfractaires, à la partie inférieure de laquelle se trouve une grille contenant du charbon qui porte à une température assez élevée la région *npnp* ; le tout est du reste chauffé accessoirement au moyen des conduits *o,o,o,o,* qui servent au passage de l'air préalablement porté à une haute température par son contact avec la flamme du foyer *f*. Les bassins *p*, qui peuvent contenir chacun de 80 à 100 litres de matière liquide sont enveloppés par les gaz de la combustion, tandis que les creusets *m* placés tout à fait à la partie supérieure de l'appareil sont chauffés électriquement au moyen de trois paires de charbons dont les arcs jaillissent intérieurement dans la cavité du creuset. Le verre une fois fondu s'écoule par les conduits *n* dans les bassins *p* qui sont divisés en deux parties par une cloison et dans lesquels le verre est puisé pour être travaillé.

Dans les expériences qui ont été effectuées avec ce four, le mélange comprenait 1.000 parties de sable, 400 de soude, 200 de carbonate de chaux (marbre pulvérisé) et 2 de nitrate de soude ; le produit obtenu possédait une teinte jaune clair ou légèrement brune et contenait parfois quelques grains n'ayant subi qu'une fusion partielle.

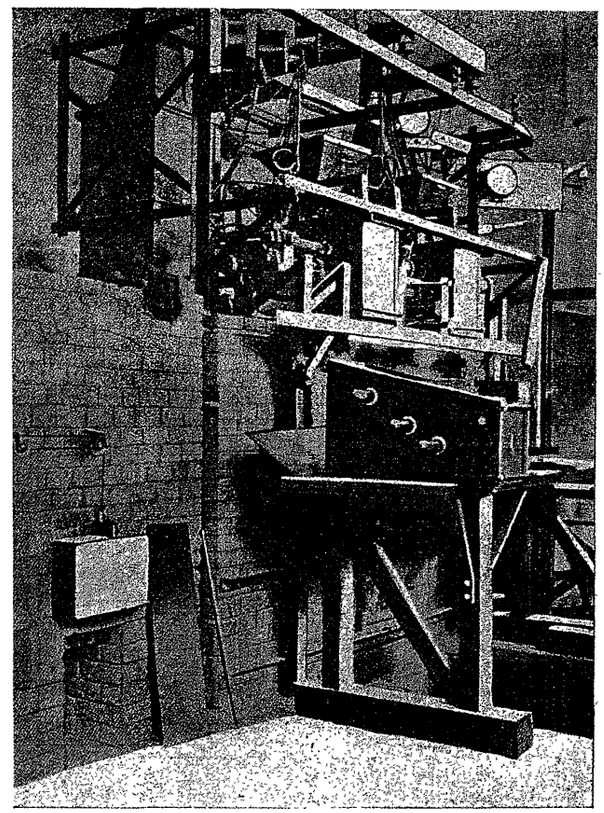

Fig. 27.— Four électrique Styzinski Eusskirchen avec chauffage accessoire à la houille.

A l'aide d'un courant continu de 140 volts environ et une intensité suffisante (200 ampères), on peut faire fondre environ 8 kilogrammes de verre par creuset et par heure ; mais si l'on travaille dans de bonnes conditions, les résultats peuvent être doublés, quoique la dépense supplémentaire occasionnée par le chauffage des bassins au moyen du foyer accessoire *f* occasionne toujours une élévation sensible du prix de revient des produits obtenus.

Comme on le voit par ce qui vient d'être dit, la fabrication électro-thermique du verre réalisée au moyen de four électrique semble avoir dépassé aujourd'hui la période d'expériences et être entrée ces derniers temps dans la voie de la pratique. Mais dans l'état actuel de cette industrie, une question se pose et il nous paraît qu'elle n'est pas sans intérêt : étant donné qu'aujourd'hui les chutes d'eau sont nombreuses et que peu à peu le prix de l'énergie électrique tend à diminuer de plus en plus, ne pourrait-on pas substituer au verre ordinaire, au moins dans une grande partie des applications de celui-ci, le quartz ordinaire du cristal de roche, qui, comme on le sait, fond à une température qui n'est pas très élevée, quoique dépassant beaucoup celle du verre et qui donne des produits de qualité supérieure ? Le quartz

pur ou mélangé à des matières terreuses abonde dans certaines régions où il forme parfois des filons d'une grande puissance ; en réservant à la fabrication des objets de choix les variétés les plus pures et en utilisant pour la production des verres colorés les variétés communes, il nous semble qu'on réaliserait là un grand progrès dans l'industrie déjà si perfectionnée du verre.

L'idée n'est du reste pas nouvelle, car plusieurs auteurs ont déjà mentionné la fusion facile du quartz dans le four électrique. En 1893, Moissan a étudié attentivement les propriétés et la votilisation de la silice dans le four qu'il avait inventé un an auparavant : en plaçant des fragments de cristal de roche dans un creuset de charbon soumis à l'action d'un arc de 350 ampères sous 70 volts, il remarqua que la silice entrait en fusion et ne tardait pas à se volatiliser. Les expériences de Gabreau ont de même montré que le quartz fondait facilement dans un creuset chauffé extérieurement par une série d'arcs disposés circulairement.

Bronn lui-même, en vue d'étudier cette fusion, se servit comme matière première de sable du Rhin, dit « sable cristallisé », qui donnait comme produit fondu une substance blanchâtre, à arêtes transparentes, et dont l'opacité ne semblait due qu'à l'inclusion d'un grand nombre de petites bulles gazeuzes dans la masse liquide. Le quartz ainsi préparé possède l'excellente qualité de se laisser travailler et tirer facilement en fils longs et fins, lorsqu'il est à une température suffisamment élevée. Un de ses plus grands avantages est son insensibilité aux changements brusques de température ; en outre de cela, le quartz possède une dureté très supérieure à celle du verre ordinaire et même à celle du cristal et il peut, par suite, être utilisé dans un grand nombre de cas où le verre serait un produit bien imparfait.

Comme on peut s'en rendre compte, l'avenir nous réserve bien des chances de réussite dans la fabrication électro-thermique d'un produit, qui, soit de même nature que le verre, soit ayant toutes ses qualités et présentant sur lui les avantages précités, viendrait rendre à l'industriel de grands services en réduisant à une valeur presque négligeable la main d'œuvre et les frais d'extraction de la matière première.

Une solution très avantageuse, et qui mérite également d'être mentionnée, serait peut-être aussi celle qui a été proposée récemment par M. Côte et qui est la suivante : utilisation de l'oxygène de l'air par la liquéfaction de ce dernier gaz (procédés G. Claude) avec transformation partielle des fours actuels, et installation hydro-électrique comprenant, par exemple, une série de fours à carbure de calcium et appareils à liquifier l'air pour la production de la flamme oxyacétylénique, devenue, par ce procédé, économique et pratique.

Nous laissons aux industriels actifs et compétents le soin de juger par eux-mêmes quel sera le meilleur parti à prendre à la suite de cette étude en vue d'une fabrication large et méthodique du verre, espérant que les discussions qu'elle pourra soulever amèneront une solution efficace de ce problème.

Jean ESCARD, *Ingénieur Civil,*
Ancien Elève du Laboratoire Central de la Société Internationale des Electriciens.

Traction électrique des Chemins de fer Suisses

Suite du Rapport de la Commission Suisse d'Etudes pour la traction électrique des Chemins de fer

Par le Secrétaire général, Professeur Dr WYSSLING (*)

Les calculs précédents montrent que, sur les 1 200 000 chevaux-heures qui sont nécessaires pour le trafic d'un jour d'été, un sixième au plus, soit 200 000 chevaux-heures environ, serait récupérable et cela dans le cas d'un système de traction parfait sous ce rapport. Cela représenterait une économie sensible. Mais il y a lieu de remarquer que cette récupération n'aurait pas partout la même importance. Sur la ligne de Brünig, sur les chemins de fer rhétiens, sur le Gothard, l'énergie ainsi disponible, théoriquement, se monte à un tiers du travail total, tandis que, sur l'ensemble des chemins de fer fédéraux, la proportion est de un huitième, et tombe à un treizième dans le IIIe arrondissement. Si l'on tient compte, en outre, du fait que la récupération amène toujours des complications et qu'elle ne peut jamais donner des résultats complets, on reconnaît que le souci de la récupération ne doit influencer que secondairement, ou seulement pour certaines lignes, la question du système de traction à appliquer ; le bénéfice à réaliser de ce fait sera en tous cas relativement minime.

La *diminution de dépense en hiver* est importante. Comme on l'a vu plus haut, l'énergie nécessaire aux chemins de fer a été calculée non seulement pour un jour d'été, mais aussi pour une journée d'hiver. Le résultat est beaucoup plus faible dans ce dernier cas ; il y a lieu, par contre, d'ajouter la dépense d'éclairage et de chauffage.

Comme on le voit, le travail de traction proprement dit ne s'élève en hiver qu'aux trois quarts environ du total de l'été ; ce rapport tombe pour quelques lignes à 50 pour 100 (sur le Brünig à 25 pour 100) ; par contre, il s'élève plusieurs fois à 90 pour 100.

Si l'on ajoute à cela le chauffage et l'éclairage, qui montent en moyenne à 13 pour 100 de la dépense de traction, on constate que la dépense d'hiver est, en moyenne, les 77 pour 100 de celle de l'été. Remarquons que cette valeur n'est pas un minimum, car on a choisi un *jour ouvrable* (le minimum se produit le dimanche, le service des marchandises étant supprimé ce jour-là).

Nous supposerons désormais que les forces hydrauliques disponibles sont munies de réserves d'eau suffisantes pour parer aux différences d'énergie qui se présentent en hiver et en été. La constitution de ces réserves s'imposera d'elle-même pour obvier *aux variations de puissance* qui seront nécessaires, ainsi que pour compenser la variabilité des cours d'eau dans les différentes saisons.

Du moment que ces réserves sont supposées exister, il n'y a plus à tenir compte que de la *moyenne annuelle de l'énergie journalière* nécessaire, plus brièvement, de l'*énergie annuelle*. Voici de quelle façon cette quantité a été déterminée. On s'est basé sur le trafic réel exprimé en tonnes-kilomètres par an, obtenu en prenant la moyenne entre le trafic d'un jour ouvrable d'été et d'un jour ouvrable d'hiver, et en déduisant 7 pour 100 pour la suppression du service des marchandises le dimanche (le trafic des marchandises étant estimé à 50 pour 100 du trafic total). L'énergie dissipée par le chauffage et l'éclairage a été comptée pour un tiers de sa valeur réelle d'un jour d'hiver, ce qui correspond à admettre par an 20 jours complets de chauffage et d'éclairage.

Le *travail moyen de traction*, exprimé en tonnes-kilomètres, représente, pour les voies normales, le 78 pour 100 ; pour les voies étroites, le 68 pour 100 du travail d'un jour d'été.

Le *travail journalier moyen* exprimé en chevaux-heures s'élève à 80 pour 100 de celui d'un jour d'été et à 105 pour 100 de celui d'un jour d'hiver.

L'énergie moyenne nécessaire par jour, pour la traction, le chauffage et l'éclairage, a été trouvée égale à 966 000 chevaux, ce qui représente, en calculant par excès, 2 400 000 chevaux-heures à fournir par les turbines des stations centrales, ce qui correspond à une *puissance permanente* de 100 000 chevaux aux turbines.

LA PUISSANCE NÉCESSAIRE, ET EN PARTICULIER SON MAXIMUM. — La détermination de la puissance exigée par les divers réseaux et tronçons n'est pas utile seulement pour l'étude des centrales hydrauliques, mais encore pour celle des canalisations électriques. Nous ne nous occuperons ici, pour le moment, que des forces hydrauliques.

Voici de quelle façon il a été procédé :

Un *barème des vitesses d'après les rampes* fut établi, cor-

(*) D'après le *Bulletin technique de la Suisse Romande*. Pour la première partie de cette étude, voir le n° de décembre de *La Houille Blanche*.