

LA HOUILLE BLANCHE

Revue générale des Forces Hydro-Electriques et de leurs applications

6^e Année. — Janvier 1907. — N^o 1.

*La Houille noire a fait l'Industrie moderne ;
la Houille blanche la transformera.*

LE VERRE

et sa Fabrication au Four électrique

Bien que le verre ait été connu et utilisé dès la plus haute antiquité, les moyens de l'obtenir et de le façonner n'ont pas cessé de subir de nombreux perfectionnements à travers les âges, et les résultats auxquels on est arrivé aujourd'hui, dans sa fabrication, nous montrent nettement quel est le haut degré de perfectionnement auquel a abouti son industrie.

Mentionner ici toutes les phases par lesquelles a passé cette dernière, et retracer son histoire, serait à la fois hors de notre sujet et contraire à l'attente du lecteur. Cette étude, qui a pour but d'établir le bilan des derniers progrès réalisés dans la fabrication industrielle du verre, aura un rôle plus restreint, mais non moins évident, celui de permettre aux industriels de se rendre compte des résultats que permet d'espérer l'introduction de l'énergie électrique comme agent de chaleur dans cette fabrication, et de constater les bienfaits qu'elle apporte dans les produits qu'elle met au jour. Pour cela, nous débiterons par quelques considérations générales sur les différentes variétés de verres et sur les propriétés de chacune d'elles, qui nous permettront d'aborder plus facilement la préparation électro-thermique du verre et en meilleure connaissance de cause.

I. GÉNÉRALITÉS SUR LE VERRE

L'époque de la première fabrication du verre et de son emploi pour la confection de vases ou d'objets de luxe, n'est qu'imparfaitement déterminée, mais on sait avec certitude que les Phéniciens connaissaient ce composé et l'employaient à toutes sortes d'usages. Pendant longtemps, ils conservèrent même le monopole de sa fabrication par la réunion, dans leur localité, du sel de soude (natron), du sable et de divers combustibles. Pline et Strabon mentionnent, du reste, comme très florissantes, les verreries d'Alexandrie et de Sidon ; les ouvriers qui y travaillaient, gravaient et doraient admirablement le verre, et beaucoup d'entre eux s'y occupaient à lailler des verres colorés, à l'imitation des pierres précieuses. Les Romains se servaient de même de ce composé et, d'après les découvertes que l'on fait chaque jour dans les restes de leurs habitations, on peut juger combien devait être active cette industrie ; c'est ainsi que, dans les ruines d'Herкулanum, on a trouvé des vitres qui ne peuvent avoir été obtenues que par un procédé de soufflage.

Les différentes méthodes de fabrication utilisées en Phénicie gagnèrent peu à peu l'Europe Occidentale, furent ensuite transportées à Venise, au dixième siècle, où cette industrie est encore très prospère et, enfin, arrivèrent en France, par l'intermédiaire de Colbert. Depuis cette époque, nous voyons tour à tour des industriels, des alchimistes et des ingénieurs s'efforcer, soit isolés, soit en commun, de réaliser de multiples progrès dans les différentes parties de l'art de la verrerie, et arriver aux résultats que nous connaissons aujourd'hui.

Les verres sont, comme on le sait, des corps transparents, doués d'un éclat bien caractéristique que l'on a appelé, pour cette raison, *éclat vitreux*, assez durs, très résistants à la pression et à l'écrasement, mais, par contre, très facilement divisés par le choc : ils sont, en effet, très cassants. La chaleur exerce sur eux une action très sensible ; elle les ramollit à des degrés différents, suivant la température et leur composition, et peut ainsi les faire passer par tous les états possibles de viscosité. A la température du rouge cerise et au-dessus, la plupart des verres ordinaires se

ramollissent et éprouvent ensuite une fusion complète ; les verres riches en plomb sont d'autant plus fusibles qu'ils renferment dans leur composition une plus forte proportion de cette substance, et les verres ordinaires, d'autant moins fusibles que les qualités de chaux et d'alumine combinées y sont plus grandes. C'est ainsi que le verre à bouteilles est généralement plus difficile à fondre que le verre ordinaire (verre à vitres), qui est lui-même moins fusible que le strass et le flint-glass.

Si l'on maintient, pendant un temps assez long, les verres ordinaires à une température voisine de leur point de fusion, ils perdent peu à peu leur caractère transparent, deviennent plus ou moins translucides, ou opalescents, et ont une tendance à prendre ensuite une cristallisation confuse : on dit qu'ils se dévitrifient, et ce phénomène porte le nom de *dévittrification*. C'est à Réaumur que l'on doit la découverte de cette particularité, laquelle paraît s'appliquer à presque toutes les espèces de verres, mais plus spécialement à celles qui renferment des bases terreuses et des oxydes de manganèse et de fer ; les variétés riches en plomb, ainsi que celles qui contiennent de la soude ou de la potasse, sont moins sujettes à cette transformation.

Pelouze a montré que le verre ayant perdu sa transparence et son homogénéité, par suite de la dévittrification, conserve néanmoins la même composition chimique que le verre transparent qui lui a donné naissance lorsque l'analyse porte sur l'échantillon pris en masse naturellement. Si l'on chauffe pendant vingt-quatre ou quarante-huit heures un fragment de glace de St Gobain, par exemple, sur la sole d'un four à recuire, celui-ci se dévittrifie sans changer de poids et sans varier de composition. Lorsqu'on fait l'expérience dans des conditions un peu plus précises, on voit apparaître, dans la masse transparente du verre, des cristaux enchevêtrés, blancs et opaques, qui ne sont autres que de la *woïlastonite* ou silicate de calcium, lorsque l'échantillon étudié est à base de chaux et de soude. Avec le verre à bouteille, il se produit des cristaux de *pyroxène*, foncés et plus ou moins ferrugineux, suivant la richesse du verre en bases de ce métal. Si l'essai dure longtemps, toute la masse subit cette action, la transparence disparaît complètement et l'on obtient une substance opaque, blanchâtre et très dure qui porte alors le nom de *porcelaine de Réaumur*.

Au point de vue de leur composition chimique, les verres peuvent être considérés comme des silicates doubles, formés par l'union d'un silicate alcalin et d'un silicate de calcium ou de plomb. Le silicate alcalin est généralement à base de potassium ou de sodium ; le silicate de calcium s'emploie pour la fabrication des verres ordinaires, et celui de plomb pour le cristal et certains verres à indice de réfraction élevé.

La raison de cette union de deux silicates de nature si différente est la suivante : si l'on se contentait d'utiliser, dans cette préparation, un silicate alcalin, on obtiendrait un verre très altérable, par suite de sa solubilité facile dans l'eau et, par conséquent, de très courte durée ; si, au contraire, on employait seul le silicate de calcium, le produit obtenu serait bien insoluble et, par suite, résistant à l'action de l'eau ou de l'air humide, mais il ne serait jamais transparent, à cause de la tendance à cristalliser du silicate de calcium.

Mais les résultats sont complètement différents si l'on fait fondre le mélange bien homogène de ces deux silicates, l'un vitreux et soluble, l'autre cristallisé et insoluble : on obtient un très bon verre, bien fusible, et qui ne possède plus la solubilité du silicate alcalin ni la tendance à la cristallisation du silicate de calcium.

Il est bien évident que les nombreuses industries qui nécessitent aujourd'hui l'emploi du verre, ont apporté des exigences nouvelles

dans les qualités physiques et chimiques de ces substances et en ont fait, par suite, varier la composition. Aussi, cette matière peut-elle être considérée, de la façon la plus large, comme formée d'un ou plusieurs silicates à base de potasse, de soude, de chaux, de baryte, d'alumine, de fer, de plomb, de zinc, de bismuth, dans lesquels on peut remplacer l'une de ces bases par l'autre, voire même supprimer certains silicates, suivant les résultats à obtenir, pourvu qu'il reste toujours une base alcaline dans le mélange définitif, et que la chaux ou l'oxyde de plomb accompagne la soude ou la potasse, afin que le verre ne soit pas sensiblement attaqué par l'eau de lavage ou l'eau météorique. En principe, on peut même remplacer en partie l'acide silicique par l'acide borique, ce qui a pour effet de donner au verre certaines qualités spéciales qui facilitent le travail des ouvriers chargés de le manipuler dans les usines de fabrication.

Les silicates de potasse et de soude sont à peu près les plus fusibles que l'on puisse rencontrer pour la fabrication du verre. On préparait autrefois un bon verre soluble en mélangeant, dans un creuset, 15 parties de quartz (silice), 10 de carbonate de potasse et 1 de charbon; après une chauffe de six heures environ, la fusion est à peu près complète, et l'on obtient un liquide vitreux que l'on coule sur une plaque de fonte; pour le conserver, on le concasse et on le maintient dans un vase clos. Lorsqu'on veut s'en servir, on le pulvérise et l'on opère ainsi plus facilement sa dissolution. On l'utilisait jadis, en Angleterre, pour la fabrication des pierres artificielles, en vue de silicifier à froid les pierres calcaires, ou pour la préparation de certaines peintures contenant également du sulfate de baryte; mais il ne paraît pas que ces tentatives aient abouti à de bons résultats, car elles n'ont pas été suivies ni même perfectionnées par les industriels et les chimistes.

Les silicates de chaux sont beaucoup moins fusibles que les silicates alcalins, et il en est de même des différents silicates d'alumine. Ceux de protoxyde de fer et de manganèse fondent assez facilement: la température des fourneaux de laboratoire suffit pour les faire passer à l'état liquide; un refroidissement régulier et lent produit dans leur masse des cristaux plus ou moins enchevêtrés. Le silicate de protoxyde de fer possède une couleur vert foncé; on peut lui faire perdre cette teinte en le faisant passer à l'état de silicate du sesquioxyde; il suffit, pour cela, d'ajouter au mélange une petite quantité de bioxyde de manganèse. Les silicates à base de plomb ne manifestent que très faiblement la présence de cristaux même par un refroidissement lent de la masse fondue; il en est de même des silicates d'oxyde de zinc.

Tous ces silicates ayant des propriétés différentes, réagissent les uns sur les autres au moment de la vitrification de la masse liquide et se modifient réciproquement; ils deviennent surtout plus stables, et sont moins portés à la cristallisation; on comprend ainsi combien peut être variée la composition initiale du mélange à introduire dans les fours au début de l'opération.

L'acide borique possède l'excellente qualité d'être un très bon fondant et il intervient en donnant naissance à des composés borosilicatés qui facilitent la fusion du mélange, en rendant le verre plus ductile et plus facile à travailler, tout en abaissant la proportion des déchets à une valeur presque nulle. Rappelons, en passant, que l'on donne généralement le nom de fondant, en chimie et en matière d'industrie, à toute substance capable de dissoudre des substances insolubles dans l'eau ou dans les dissolvants habituels. Dans la fabrication du verre, cette qualification conviendra à tout ce qui, au cours de l'opération, dissoudra ou facilitera la dissolution du sable. « On peut être étonné, dit M. Payen, d'entendre dire par les ouvriers verriers qu'un sable a plus de fondant qu'un autre; mais leurs observations sont précises sur les doses d'alcali et de sable qui se vitrifient ensemble. Cela s'explique facilement en faisant attention que la durée de la fonte des matières vitrifiables indique, sous le rapport de l'économie, la fusibilité de ces matières; l'action des alcalis est d'autant plus rapide et leur déperdition d'autant moindre, que la surface du sable est plus étendue » Le sable le plus fin qui, sous un poids donné, présente la plus grande surface, est donc celui qui a le plus de fondant; comme certains sables contiennent du carbonate de chaux ou craie (CO₂Ca), on comprend que leur fusibilité soit plus grande et, pour ainsi dire, proportionnelle à la quantité de cette substance qu'ils renferment.

La nature chimique des verres a une grande influence sur leur densité; celle-ci augmente généralement avec le poids spécifique des bases utilisées; c'est ainsi que les verres alcalins sont les plus légers; ceux qui renferment des oxydes de plomb sont, au contraire, doués d'une forte densité; le verre à bouteilles, qui contient du fer, possède un poids spécifique moyen. La nomen-

clature suivante donne, du reste, les résultats de quelques essais effectués dans ce but, avec des matières différentes de composition et d'origine:

Verre à bouteilles.....	2,732
Verre à vitres.....	2,612
Glaces de Saint-Gobain.....	2,488
Crown-glass.....	2,487
Verre de Bohême.....	2,396

La différence qui existe dans la composition chimique des verres et leurs propriétés physiques porte à les diviser en deux grandes classes, les *verres ordinaires* et les *verres à base de plomb*, auxquels on peut ajouter, par suite des nombreux progrès réalisés depuis quelque temps dans cette industrie, les *verres spéciaux* qui comprennent certains composés associés à la masse vitreuse et dont l'emploi se généralise de plus en plus dans les arts de l'optique ou de la construction.

Les verres ordinaires comprennent principalement: le verre à vitres, le verre de Bohême, le verre à gobeletterie, le crown-glass, le verre à bouteilles et le verre à glacés.

Le *verre à vitres* est un silicate double de sodium et de calcium composé, ainsi que cette formule l'indique, par de la silice, de la soude et de la chaux. Lorsque la préparation des matières servant à sa fabrication est convenablement effectuée, l'acide silicique, ou silice, doit contenir environ quatre fois la quantité d'oxygène renfermée dans les bases; on peut, du reste, utiliser, dans cette préparation, le sulfate de sodium et même une faible quantité de cendres qui augmentent les qualités du produit obtenu. Certains variétés de verres à vitres ont donné, à l'analyse, de 70 à 72 % de soude, 13,4 à 13,6 % de chaux, 0,5 à 1,5 % d'alumine, 0,1 à 0,4 % d'oxyde de fer et des traces d'oxyde de manganèse.

On distingue généralement deux sortes de verres à vitres: le *blanc* et le *demi-blanc*; le premier sert à toutes sortes d'applications, tandis que le second ne peut être utilisé que pour les objets ayant une faible épaisseur. Le *picadit*, qui est la matière vitreuse écoulée pendant l'opération vers la partie inférieure du creuset, et qui est salie par son contact avec les briques du fourneau, peut être utilisé avec avantage dans la fabrication du *demi-blanc* lorsqu'il ne s'est pas formé en grande quantité au cours des opérations précédentes.

Le verre à vitres a de nombreux usages et il est, parmi toutes les variétés de verres, celui dont on fait en France la plus grande consommation; il sert à la confection des vitres proprement dites, des cylindres employés à couvrir les vases ou les pendules, à encadrer les estampes, à garnir les portières de voiture. On l'emploie de même avantageusement pour la construction des serres chaudes et tempérées, pour les devantures de boutiques et de magasins et les grandes galeries d'expositions qui en font une consommation se chiffrant, chaque année, par plusieurs centaines de mille mètres carrés de surface.

Le *verre de Bohême* diffère du verre à vitres ordinaire par la substitution de la potasse à la soude. Il est remarquable par sa légèreté, sa faible fusibilité et sa presque parfaite inaltérabilité; en plus de cela, il est complètement incolore et transparent, et possède un magnifique aspect. C'est l'ensemble de ces multiples qualités qui lui a toujours valu sa renommée; elles le rendent très propre à la fabrication des objets de gobeletterie, des vases à boire, des carafes et des flacons de laboratoire. On l'emploie également dans les instruments d'optique pour achromatiser le flint-glass. La beauté de ce verre est, du reste, telle, que les anciens auteurs l'ont pendant longtemps confondu avec le cristal dont il se différencie cependant beaucoup par son poids spécifique. Sa grande limpidité permet, en outre, d'en façonner des tables épaisses sans que leur couleur devienne sensible, car elles conservent toujours une transparence parfaite. Certaines analyses de ce verre ont donné, comme composition immédiate, 76 % de silice, 15 % de potasse, 8 % de chaux et 1 % d'alumine, cette dernière substance étant due au contact de la masse vitreuse avec le creuset servant à la fusion du mélange.

Le *crown-glass*, qui est principalement utilisé dans les instruments d'optique, est plus riche en potasse et en chaux que le verre de Bohême; il peut contenir également, parfois, de très faibles quantités d'alumine, ainsi que des oxydes de fer et de manganèse. Lorsqu'on veut lui donner des qualités convenables pour les besoins de l'optique, il est de toute nécessité qu'il possède une limpidité parfaite, et qu'il soit assez peu coloré pour qu'une lentille de grande épaisseur ne présente pas de coloration sensi-

blé; enfin, il doit être exempt de bulles d'air, de nébulosités faibles et de stries, qui troubleraient la marche des rayons lumineux le traversant.

Le verre à bouteilles se compose d'argile marneuse, de sable très ferrugineux, de calcaire, de sulfate de sodium et de déchets de verre de toute nature, sa composition est, du reste, très variable quant aux proportions des matières qui le constituent, mais celles-ci offrent peu de différence quant à leur nature. On y rencontre généralement de la silice, de l'alumine, de l'oxyde de fer, une faible proportion d'oxyde de manganèse, de la chaux, de la potasse, de la soude ou seulement une de ces deux dernières. L'oxyde de fer a la propriété de colorer en vert et de le rendre plus fusible que les précédents; les acides et le bitartrate de potassium renfermés dans le vin l'altèrent plus ou moins rapidement.

Le verre à gobeleterie peut être à base de soude ou de potasse, mais on préfère généralement le second à cause de sa teinte plus claire et de sa transparence; du reste, ce verre ne présente pas de différence sensible avec le verre à vitres. Les fils de verre fondu sont presque toujours assez souples pour pouvoir être tissés à la manière du fil commun, ou du fil d'amiante, et utilisés dans l'art de l'ornementation; les verres jaunes et orangés donnent des tissus brillants imitant la soie ou l'or. On comprend facilement comment la différence de densité, qui existe entre le verre et l'air interposé dans ces tissus, puisse détruire la transparence en multipliant l'éclat des surfaces jusqu'à leur donner un brillant métallique.

Le verre à glaces, qui est à base de soude et de chaux, possède une grande transparence; il doit être exempt de bulles et de nœuds. La proportion de la soude, relativement à celle de la chaux, doit être plus forte que dans le verre à vitres, afin de rendre le mélange plus fluide et plus facile à travailler. Une vitrification bien homogène, et un affinage parfait, sont donc nécessaires; on obtient ces qualités au moyen d'un feu vif et soutenu. Une analyse d'un verre à glace a donné les résultats suivants:

Silice.....	75,90 %
Alumine.....	2,80
Chaux.....	3,80
Soude.....	17,50

Les premières glaces fabriquées à Venise possédaient un grand nombre de défauts, lesquels n'ont pu disparaître que par l'invention des procédés de coulage aujourd'hui utilisés dans les usines.

Le cristal est principalement composé de silice, de potasse et d'oxyde de plomb, auxquels on ajoute parfois de l'acide borique et de l'oxyde de zinc pour augmenter son éclat. Une analyse de cristal commun a donné 58 % d'acide silicique, 2,6 % de chaux,

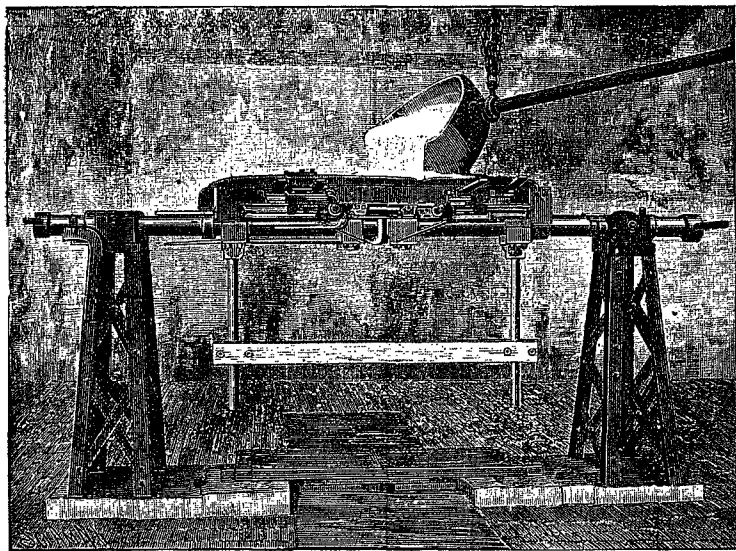


Fig. 1. — Coulage du verre fondu.

32,5 % d'oxyde de plomb et 8,9 % de potasse. Autrefois, on désignait indifféremment sous le nom de cristal, toutes les variétés de verre incolore, quelle que fût leur composition. Aujourd'hui, on réserve exclusivement ce nom au verre formé par un silicate double de potassium et de plomb, obtenu en fondant ensemble 30 parties de sable fin et pur, 20 de minium (oxyde salin de plomb) et 10 de carbonate de potassium.

Le cristal est incolore lorsqu'il a été convenablement préparé; il doit son caractère brillant, sa transparence et sa forte densité au silicate de plomb; mais ce dernier étant lui-même coloré en jaune-rouge, il donne une teinte jaunâtre au cristal lorsque sa proportion augmente dans le mélange. On doit éviter, pour un autre motif, d'employer trop de minium dans cette fabrication; le silicate de plomb étant plus tendre, c'est-à-dire plus facile à rayer que les silicates alcalins, il en résulte qu'un excès de ce sel diminue la dureté du cristal et le rend ainsi rapidement altérable par les poussières de l'air. La silice employée doit être parfaitement blanche, exempte d'oxydes de fer et de manganèse qui coloreraient le verre et, autant que possible, soigneusement lavée à l'acide chlorhydrique et à l'eau. On ne peut se servir du silicate de soude, car celui-ci, en proportion un peu forte, donne un verre bleuâtre ou verdâtre dont la couleur est sensible dans les objets ayant une forte épaisseur. Toutefois, on peut préparer un très beau cristal en fondant un mélange de silice, de soude, d'acide borique et d'oxyde de zinc, qui donne naissance à un boro-silicate de soude et de zinc; il doit sa beauté, sa transparence et sa dureté à la proportion affaiblie de la soude ou de la potasse, dont l'excès rend les verres ordinaires nébuleux, tendres et hygroscopiques.

Le flint-glass diffère du cristal par la proportion des éléments qui le composent, c'est-à-dire par l'état de saturation des substances mélangées au début, et par les rapports entre les silicates de plomb et de potasse. Voici la composition d'un échantillon provenant de Guinand:

Silice.....	42,5 %
Alumine.....	1,8
Oxyde de plomb.....	43,5
Chaux.....	0,5
Potasse.....	11,7

Il est donc plus riche en oxyde de plomb que le cristal et est généralement obtenu par la fusion d'un mélange contenant 30 parties de sable fin pur, 9 de carbonate de potassium et 30 de minium; sa densité est comprise entre 3,1 et 3,2 et il peut contenir également, en très faible quantité d'ailleurs, du borax, du nitre, de l'arsenic et du manganèse. Il possède une grande réfringence et il est, pour cette raison, très avantageusement employé dans la construction des instruments d'optique de précision, où il forme, associé au crown-glass, des lentilles achromatiques de premier choix.

Le strass, qui est la variété la plus riche en plomb, est à la fois le plus dense et le plus réfringent de tous les verres; lorsqu'il est taillé en facettes, il possède un magnifique éclat, jette des feux étincelants de toutes les couleurs et sert, grâce à ces qualités, à imiter le diamant. Malheureusement, il est loin de posséder la dureté de ce dernier; à la longue et surtout s'il est longtemps maintenu au contact de l'air, il finit par perdre sa teinte brillante, par suite d'une usure partielle, mais non moins évidente, de sa surface.

L'émail peut être considéré comme un cristal rendu opaque par la fusion dans sa masse d'une plus ou moins grande proportion de bioxyde d'étain ou de phosphate de calcium; on le colore par des oxydes métalliques.

Parmi les verres spéciaux, c'est-à-dire ceux qui ne peuvent se rattacher à aucun des groupes précédents, nous devons signaler tout d'abord l'opaline, qui est un verre non transparent, comme son nom l'indique, mais seulement translucide. On l'obtient par une surchauffe amenant une dévitrification peu avancée de certains verres de bonne qualité. Il est très dur, raye facilement le verre à vitres, s'altère très difficilement à l'air et entre facilement en fusion, ce qui permet de le couler en grandes surfaces. On l'emploie pour toutes sortes d'usages, soit pour la fabrication d'objets de papeterie (coupe-papiers, encriers) ou d'ornementation, soit pour la préparation de carreaux décorés, destinés au revêtement intérieur et extérieur des habitations, des salles de bains, car il possède une teinte brillante et supporte facilement le lavage. La différence qu'il présente avec le verre ordinaire résulte plutôt d'une modification physique et interne de sa masse que d'une transformation chimique.

Il n'en est pas de même du verre silt-chromé, fabriqué pour la première fois à la cristallerie de Choisy-le-Roi, et qui possède un point de fusion beaucoup plus élevé que le verre ordinaire et le cristal; il est surtout remarquable par sa grande dureté, due

sans doute à la présence du chrome. Mais sa principale qualité consiste dans son insensibilité aux variations brusques de température : il peut, en effet, être chauffé assez fortement, et soumis ensuite à un courant d'air froid sans éclater ni être sujet à des gerçures ; si, par hasard, celles-ci se produisent, elles ne s'agrandissent pas et s'arrêtent d'elles-mêmes, sans amener de fissures longitudinales ou curvilignes. Le verre sili-chromé est très transparent, un peu moins dense que le verre ordinaire (2,27) et parfaitement homogène. Son seul inconvénient est de ne pouvoir se roder ni se travailler facilement à cause de sa grande dureté.

Le verre trempé résulte de la transformation presque subite du verre ordinaire en verre dur et résistant par une chauffe et un abaissement de température rapides. Il possède l'avantage d'être moins sujet aux variations de température que le verre ordinaire et au choc des corps pesants ; un coup de marteau a beaucoup de mal à le fragmenter, tandis que le verre à vitres ordinaire vole en mille éclats par le moindre choc. Au lieu de se servir, pour cette trempe, de corps gras, comme on le fait bien souvent, on peut utiliser avantageusement l'action de la vapeur d'eau : en effet, cette dernière, injectée soigneusement et avec rapidité sur le verre surchauffé, le mouille complètement, tandis que sa masse se refroidit rapidement ; on n'arrive généralement pas au même résultat lorsque c'est la pièce elle-même que l'on introduit dans un bain froid, le contact ne s'effectuant pas aussi régulièrement. On peut tremper de cette façon toutes sortes de verres et même le cristal, mais cette opération n'est avantageuse que lorsqu'il s'agit d'en faire bénéficier les qualités de verre inférieures, le cristal et les verres à bases de plomb ayant déjà acquis ces propriétés pendant leur fabrication et par leur nature elle-même.

On donne, dans la construction, le nom de *verre armé*, à celui qui a été solidifié autour d'un treillis métallique et qui présente, de ce chef, des qualités inappréciables de résistance et de solidité ; sa rupture est moins à craindre qu'avec le verre ordinaire et, en tout cas, elle ne se produit jamais sur une grande échelle, les fragments séparés étant retenus par le treillis au lieu de se disperser. On le fabrique aujourd'hui en assez grande quantité, soit en introduisant un réseau métallique entre deux couches de verre laminées successivement, soit en prenant dans la masse vitreuse du fil de fer sous forme de toile métallique.

On emploie le verre armé, non seulement comme vitrage, mais aussi dans la grosse construction ; on en fait des colonnades, des plaques épaisses et même des marches d'escaliers ; sa ténacité est telle, qu'il ne peut être coupé par aucun des moyens ordinaires ; sa résistance à l'écrasement est de 550 à 650 kilogrammes par centimètre carré, c'est-à-dire de deux à trois fois plus considérable que celle du verre ordinaire ; il en est de même de sa résistance à l'échauffement.

Terminons maintenant cette première partie par l'exposé rapide des propriétés chimiques des verres, qui nous permettra de passer ensuite plus aisément à l'étude de leur fabrication actuelle.

L'air ou l'oxygène secs, froids ou chauds, n'exercent aucune action sur les verres, mais il n'en est pas de même de l'air humide : celui-ci agit sur lui à la longue, ainsi que le prouve l'altération des vitres dans les vieux bâtiments. La plupart des corps désoxydants peuvent agir, à l'aide de la chaleur, sur les verres qui contiennent des oxydes de fer et de manganèse et surtout de l'oxyde de plomb. Ainsi, lorsqu'on chauffe des verres riches en plomb avec du charbon, ou dans un courant d'hydrogène, on constate rapidement une altération profonde de ce verre ; l'oxyde est réduit, et le plomb métallique communique au verre une teinte noirâtre. Cette action est si nette qu'il est difficile, sinon impossible, de travailler à la lampe le cristal sans le noircir.

L'eau froide agit lentement sur le verre en lui enlevant de l'alcali ; si l'on pulvérise dans un mortier en verre des fragments de même substance, avec de l'eau et quelques gouttes de phénol, on voit celle-ci prendre presque aussitôt la teinte rouge violacée que lui communiquent les alcalis. L'eau bouillante agit beaucoup plus rapidement, surtout sur les verres à vitres, en les décomposant en silicate alcalin soluble et silicate terreux, accompagnés de silicate insoluble ; aussi est-il facile de constater une réaction alcaline dans l'eau qui a bouilli un certain temps avec du verre réduit en poudre. La plupart des verres qui sont ainsi attaqués sont presque toujours hygroscopiques, au point de se recouvrir d'une couche d'eau ou de solution alcaline lorsqu'ils sont exposés à l'air humide.

Les alcalis en solution dissolvent lentement le verre des flacons

qui les renferment. A la température du rouge, les carbonates et les bases de la première section réagissent de même sur lui, de manière à augmenter sa basicité. Les acides tendent pareillement à le décomposer en s'emparant des bases et en mettant la silice en liberté ; c'est ainsi que les acides nitrique, chlorhydrique et sulfurique donnent naissance à des sels de chaux, de fer ou d'alumine. L'acide fluorhydrique doit être classé à part, car son action est telle, qu'un flacon de verre serait rapidement mis hors d'usage et même complètement dissous, si on le remplissait de ce liquide rougeur ; cette propriété est du reste utilisée avec avantage dans la gravure sur verre.

Quant aux colorations données aux différentes variétés de verre, il ne nous importe pas de les décrire ici ; rappelons seulement que la théorie de ces opérations repose sur la propriété que présentent les matières vitreuses de dissoudre différents oxydes métalliques sans perdre sensiblement leur transparence ; les oxydes de chrome Cr_2O_3 et de cuivre CuO donnent une coloration vert pomme ; l'oxyde de fer FeO , une teinte vert sombre ; l'oxyde de cobalt CoO , de très belles nuances bleues ; le sesquioxyde de manganèse Mn_2O_3 , une magnifique teinte rose ou violacée, et ainsi de suite.

II. ANCIENS PROCÉDÉS DE FABRICATION

La fabrication industrielle du verre, c'est-à-dire l'union des substances qui doivent entrer dans sa composition, a été successivement obtenue, soit par la fusion des matières premières dans des creusets ou dans des bassins chauffés au bois ou au charbon, soit au moyen du gaz et même du pétrole. Les essais les plus récents ont trait à la fabrication du verre, et de ses composés similaires, à l'aide de l'énorme chaleur produite au sein de l'arc électrique.

Le premier appareil qui ait été construit à l'effet de l'utilisation méthodique de la chaleur spécifique du charbon est dû à Boetius. Dans ce four, qui est encore utilisé dans quelques milieux industriels, la chaleur nécessaire à la fusion du verre est produite par la combustion incomplète de la houille, donnant naissance à des gaz qui sont ensuite brûlés par une certaine quantité d'air, amenée de l'extérieur dans le four, et qui s'échauffe en traversant des carneaux ménagés dans la maçonnerie, tandis que les parties du four devant rester à la plus basse température possible se refroidissent par le passage de ce courant gazeux.

M. Appert a ajouté à cet appareil certains perfectionnements, dont le principal consiste à placer des chicanes le long des parois verticales des foyers et dans les régions de l'appareil les plus proches du siège du four, afin de faire parcourir à l'air le plus long circuit possible. Cela est un grand avantage, car ce gaz, qui vient de l'extérieur à une température voisine de 20° , se trouve rapidement porté à celle de 500° à 600° , en réduisant la dépense de combustible de 12 % environ.

Le four Siemens, qui a subi un grand nombre de transformations avant de rendre tous les services que l'on attendait de lui, est l'un des premiers dans lesquels on ait vu nettement apparaître l'idée d'utiliser avantageusement la chaleur perdue, tout en opérant une bonne combustion et en réduisant au minimum la dépense de combustible. Le procédé consiste à substituer à l'action directe de la houille celle des principes gazeux qui proviennent de sa combustion incomplète. Le combustible n'est donc plus du charbon, mais un mélange de vapeurs inflammables, résultant d'une gazéification d'un corps solide, et composé principalement d'hydrogène plus ou moins carburé et d'oxyde de carbone. On conçoit aisément qu'une entrée d'air convenable activant cette combustion, la distribution de la chaleur puisse s'opérer régulièrement.

Vers 1850, Fickentscher eut l'idée de chauffer les fours de verrerie au moyen du gaz et il en fit pratiquement l'essai. Mais c'est à Ch. Siemens que l'on doit d'avoir le mieux réussi dans ce sens, en se servant d'un système de fours régénérateurs à gaz, ce dernier étant préparé dans des appareils séparés. Un grand nombre d'inventeurs se sont depuis inspirés de ce four. Groebe-Lürmann, Putsch, Emmel, ont imaginé de nombreux systèmes ayant des relations étroites avec celui de Siemens. Aussi, dès 1877, c'est-à-dire vingt-sept ans seulement après les premiers essais, les deux tiers des fours allemands étaient chauffés au gaz, tandis que les autres cherchaient, en vain, à maintenir le chauffage au moyen d'un foyer direct.

Tel qu'il est employé aujourd'hui, le four Siemens possède un très bon rendement ; les types les plus récents sont, il est vrai,

accompagnés de gazogènes qui diffèrent avec chaque usine, mais le principe reste le même. Un des modèles les plus en vogue aujourd'hui est le gazogène Wilson, dont la cuve a la forme d'un tronc de cône. Le charbon qu'elle contient y est mis en mouvement au moyen d'hélices en fonte, qui ont pour but d'empêcher l'encrassement du combustible qui nuirait à la bonne utilisation de la chaleur produite. L'air sous pression y arrive chargé d'humidité, de sorte que le mélange gazeux formé contient de l'hydrogène, gaz éminemment combustible, comme on le sait. Dans le système imaginé par Faggé, le foyer est disposé à la partie inférieure du gazogène et celui-ci fonctionne alors à combustion renversée, le mélange gazeux inflammable étant dirigé de haut en bas. Une grille rotative à axe horizontal supporte le combustible, qui ne peut dès lors brûler qu'à la partie supérieure.

Comme modification importante de ce système, nous devons signaler le remplacement du gaz artificiel par le chalumeau oxyhydrique. Bien que cette solution ait pu paraître extraordinaire à une époque où l'industrie de la verrerie n'aurait su en tirer parti, elle n'en est pas moins très judicieuse, car on conçoit qu'une usine installée non loin des chutes d'eau, et munie d'électrolyseurs à bon rendement, puisse avantageusement soutenir la concurrence des procédés habituels.

D'après M. Albert Granger, on peut distinguer deux sortes de fours, relativement à la direction de la flamme. Dans les fours où, comme celui de Siemens, la flamme change alternativement de direction, on dit qu'il y a *recupération*. Par contre, on appellera appareils *régénérateurs* ceux qui n'ont pas de changement à effectuer périodiquement, et dont la flamme possède toujours une marche régulière et uniforme; les gaz froids y sont portés à une haute température par leur passage dans des conduits disposés à cet effet et chauffés extérieurement. Le four de Derval, qui est dans ce cas, possède une forme circulaire et est pourvu d'une colonne centrale autour de laquelle sont disposés les creusets de fusion. Les gaz y sont amenés par une conduite latérale qui vient s'ouvrir à la partie supérieure du four, au-dessus de l'arrivée des gaz chauds. Le four Ponsard est un peu différent, quant à sa construction, et la surface de chauffe y est de 23 mètres carrés par mètre cube.

Afin d'obtenir une meilleure utilisation de la chaleur, on a même installé, il y a quelques années, dans la verrerie Rublaud, un four à creusets d'une forme spéciale, composé de deux fours accolés n'utilisant qu'un seul foyer.

Il est évident que, lorsque la quantité de verre produite doit être considérable, l'emploi des creusets séparés n'a plus de raison d'être: il est de toute rigueur d'avoir un bassin pouvant contenir une grande masse de liquide, afin que la consommation n'ait pas à en souffrir. Dans le four à bassin de Siemens, on peut effectuer facilement la fusion, l'affinage et le travail du verre; ce bassin y est divisé en trois compartiments dans le sens de la largeur par deux murs verticaux. Le premier compartiment sert à la fusion du mélange, tandis que le verre, une fois liquide, passe sous le premier mur et va s'affiner dans le second compartiment. Il se dirige enfin dans la troisième partie du four où on va le recueillir pour le travailler.

Le four Siemens est aujourd'hui l'un des plus répandus dans la verrerie, car sa construction est relativement très simple, et sa conduite facile; celle-ci s'effectue du reste régulièrement et l'appareil peut fonctionner admirablement si l'on a soin de nettoyer les récupérateurs en fonction toutes les cinq ou six semaines environ. La réparation presque complète du four, c'est-à-dire le remplacement des briques détériorées et la remise en état des parties défectueuses, doit s'effectuer tous les ans environ. De cette manière, un même four peut fonctionner pendant trois ou quatre ans de suite sans interruption; mais, au bout de cette période d'activité, il est presque toujours nécessaire d'effectuer une réparation complète du four et d'interrompre la marche des opérations pendant deux mois environ. C'est là un des inconvénients de cet appareil, sans parler de la grosse dépense occasionnée par la remise en état.

Avec un four Siemens de bonne construction et un travail régulier, chaque kilogramme de verre correspond à une dépense de charbon égale à 1,3 ou 1,5 kilogramme, le bassin pouvant contenir environ cinquante mètres cubes de verre.

La pratique ayant démontré ce fait, que le verre est d'autant plus clair qu'il a parcouru un plus long chemin depuis son entrée dans l'appareil jusqu'au point où l'ouvrier le puise, on préfère généralement, aux systèmes précédents, le modèle à développement de flamme, dans lequel la construction est, du reste, beau-

coup simplifiée. Au lieu d'avoir une forme rectangulaire et elliptique à l'une de ses extrémités, le nouveau four possède un bassin long et étroit, dont la longueur est à peu près le double de la largeur; le modèle ordinairement employé a environ 10 mètres de longueur sur 5 m. 10 de largeur. L'avantage principal de l'appareil consiste dans sa plus longue durée et sa moindre dépense d'entretien, les frais de réparation pouvant être parfois réduits de moitié. La consommation de charbon y est d'environ 1,3 à 1,5 kilogramme de charbon par kilogramme de verre, mais la manœuvre y est assez compliquée, et les brûleurs ne donnent de bons résultats que s'ils sont constamment surveillés et maintenus dans un parfait état de propreté.

Le four imaginé par Lürmann présente cette particularité de posséder un bassin de fusion complètement séparé de celui où l'on vient puiser le verre pour le travailler. Le gaz combustible est produit par la distillation de la houille dans des cornues, comme cela s'opère dans la fabrication industrielle du gaz d'éclairage, mais ces cornues sont chauffées par la chaleur perdue du four. Celui-ci se compose essentiellement d'une cuve rectangulaire ayant 5 mètres de largeur sur 10 à 12 de longueur et 1 mètre de profondeur; le réchauffeur d'air est placé à la partie inférieure du bassin. Le gaz, après avoir traversé un mur perforé, rencontre l'air du réchauffeur qui est à une température assez élevée, et s'échappe après sa combustion par les ouvertures ménagées dans la paroi opposée. La marche des gaz y est invariable et leur combustion s'y opère à l'endroit même où le verre entre en fusion. Il paraît que sa forme actuelle permet de rendre la dépense de charbon inférieure à celle des fours précédents pour une même quantité de matière fondue.

Le four inventé par Boucher (fig. 2), et qui est principalement destiné à la fabrication du verre à bouteille, fonctionne pendant un temps assez long sans réparation; il demande, il est vrai, un réglage soigné, au moment de la mise en marche, mais une fois ce travail préparatoire effectué, il rend de grands services par sa

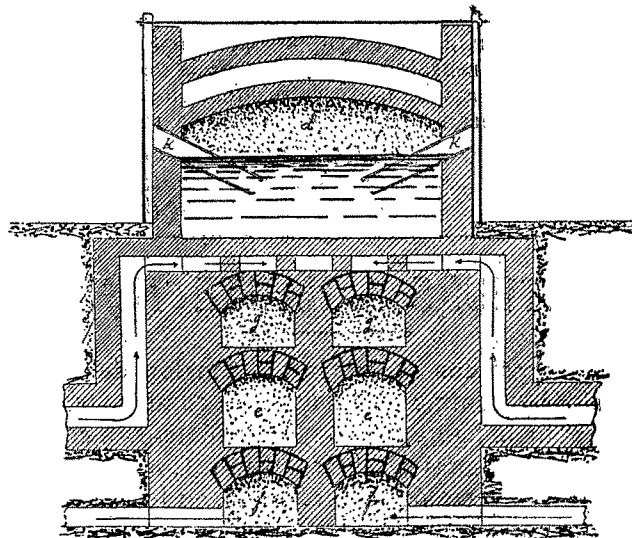


Fig. 2. — Coupe du four à bassin de Boucher.

f Carneau inférieur à air. c Carneau conduisant la flamme à la cheminée
g Carneau supérieur à air. d Bassin de fusion.

grande souplesse et sa simplicité. Les regards n'y sont plus constamment ouverts, ce qui a pour avantage d'éviter les pertes de chaleur inutiles et de soustraire les ouvriers à la mauvaise influence d'une chaleur trop forte. Le verre y est recueilli dans de longs tubes d'argile plongeant dans le verre liquide et l'isolant par suite, au moins dans sa masse, du contact de l'air extérieur.

Parmi les fours à creusets, nous citerons ceux qui sont plus spécialement utilisés aux Etats Unis, dans la région du Pittsburg, et qui utilisent le gaz naturel; les brûleurs y sont au nombre de deux dans chaque four, afin d'en faciliter les réparations, et le gaz arrive à la partie inférieure de l'appareil par une conduite; il débouche dans le four à l'aide d'un tube recourbé en demi-cercle, ce qui répartit ainsi plus régulièrement la chaleur. Le four Anderson se signale par l'entrée de l'air dans l'appareil, effectuée au moyen de tubes latéraux traversant la maçonnerie, et débouchant au-dessus des ouvertures par où sort le gaz. Le four Allenberg qui est également à gaz naturel, est surtout utilisé pour la fabri-

cation du cristal. Le gaz, au lieu de s'échapper librement, vient buter sur une sorte de chapeau qui étale circulairement le jet en lui donnant la forme d'un cône renversé.

Enfin, nous devons signaler, à la suite des fours à gaz ci-dessus mentionnés, les appareils plus ou moins récents qui utilisent le pétrole comme combustible. Ce liquide, lorsque sa densité est de 0,85 environ, possède, en effet, un pouvoir calorifique très satisfaisant et, d'après M. Granger, on peut compter que 41 kilogrammes de combustible correspondent à environ 100 kilogrammes de houille de bonne qualité. Les résultats qui ont été obtenus par l'application de ce procédé ont toujours été très satisfaisants et les verres ainsi préparés, de très bonne qualité.

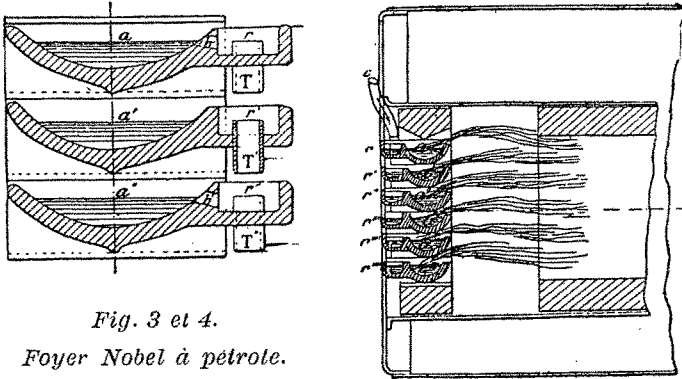


Fig. 3 et 4.

Foyer Nobel à pétrole.

Le foyer Nobel se compose de récipients superposés r' , en forme d'auges, fixés dans une ouverture de la paroi du four et renfermant le pétrole a' . Un espace assez grand existe entre ces capsules pour la circulation de l'air, et c'est cette série de vases qui est destinée au chauffage du four. Ce dispositif, qui est à la fois simple et pratique, permet de brûler environ 113 kilogrammes de pétrole par heure et par mètre carré de grille. Les fours Kroupsky et Malicheff, employés en Russie, diffèrent un peu de ce dernier par la manière dont s'effectue la combustion du pétrole et par le chauffage de l'appareil, mais le principe reste la même. D'après les renseignements qui nous ont été donnés à ce sujet, la dépense correspondant à la production de 4 000 kilogrammes de verre n'y serait que de 130 tonnes de résidus de pétrole.

(A suivre.)

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

ISOLATEURS A HAUTE TENSION (1)

Il y a quatorze ans seulement, la tension de 3 000 volts était considérée comme très élevée. Au commencement, on a employé, pour la haute tension, les isolateurs à cloche, déjà utilisés pour les lignes à basse tension. Comme matériaux, on employait le verre ou la porcelaine, ou les deux à la fois. Les résultats économiques des transports d'énergie à haute tension restèrent douteux jusqu'à ces dernières années. Chaque ingénieur s'occupa de la résolution de ces questions et d'innombrables formes de cloches, de couleurs différentes, avec tiges en bois ou en fer, avec dispositifs d'arrêt du fil, virent le jour. En 1890, des isolateurs en verre à double cloche de 76 mm de diamètre furent très employés et avec succès, en Amérique, pour la tension de 3 000 v. En Europe, on adopta l'isolateur à huile; cette forme devait être employée pour le transport à 10 000 v. de Pomona et San Bernardino en Californie, mais, bientôt, on s'aperçut de l'inutilité de l'huile. C'est alors qu'apparurent les triples cloches de verre ou de porcelaine. On avait employé, en Suisse, en 1895, une tension de 13 000 v. sur la ligne Hochfelden-Oerlikon et, en 1896, en Amérique, la tension de 16 000 v.; on était encouragé par la réussite des essais de

(1) Communication de M. A. Converse au Congrès international d'électricité de Saint-Louis.

Lauffen-Francfort à 3 000 v., en 1891. C'est en 1897 que l'on reconnut que la résistance à la tension disruptive doit résider à la surface vernie de l'isolateur, et non dans sa masse, ce qui conduisit à la forme de plusieurs cloches superposées.

En 1898, le transport d'énergie de Provo, dans l'Utah, à 40 000 v. était déjà en service. L'isolateur employé (fig. 1) portait trois anneaux à la partie supérieure, afin d'augmenter la résistance superficielle. En 1900, les Compagnies de Bay County et de la Standard Electric, employèrent la tension de 60 000 v. et les isolateurs dits en forme de champignon (fig. 2) avaient un diamètre de 305 mm. Une rigole circulaire, adaptée à la cloche plate, faisait déverser de part et d'autre l'eau de pluie sur la traverse portant l'isolateur, tandis que la tige tout entière était protégée par un

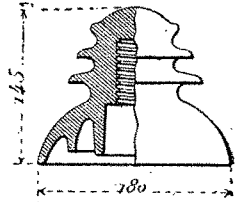


FIG. 1.
Isolateur de Provo
à 40 000 volts.

fourreau de verre. A l'origine, les deux parties étaient reliées au moyen de soufre, plus tard au moyen de ciment.

Beaucoup de types d'isolateurs se comportent très bien au commencement, puis, ensuite, des dérangements interviennent jusqu'à ce que l'on ait éliminé la partie défectueuse. Il y a, en effet, des installations où les isolateurs ne sont abîmés que par suite de circonstances extérieures, et pour lesquelles la question

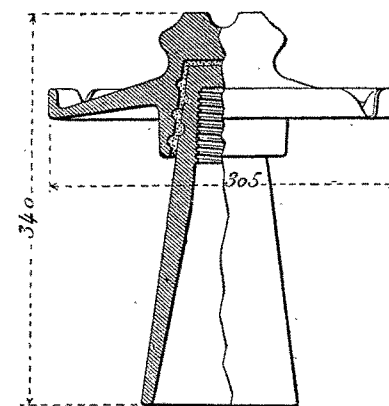


FIG. 2.
Isolateur de la Bay County Co
à 60 000 volts.

d'isolateurs à 40 000 volts est parfaitement résolue.

La figure 3 représente un isolateur en deux parties de la Missouri River Power Co, à Montana, pour 55 000 volts employé depuis 1901, la partie inférieure protège la tige en bois.

La Compagnie de Shawinigan Falls emploie, pour une tension de 50 000 volts, l'isolateur représenté sur la figure 4.

La figure 5 représente un isolateur en plusieurs parties employé récemment à Guanajuato (Mexique) pour 60 000 volts. Le diamètre est de 360 mm, et la tige en acier est creuse, les diverses parties sont reliées au moyen de ciment.

Quelques installations, à 50 000 et 60 000 volts, ont adopté la forme représentée figure 6, qui a également un diamètre de 360 mm et pèse 11,5 kg. Certaines Sociétés en ont même exagéré les dimensions.

Les isolateurs ont donc passé d'un diamètre de 76 mm à celui de 360 mm, et d'un poids de 0,5 kg à celui de 11,5 kg, et leur prix d'achat a passé de quelques centimes à quelques francs. Peut-être arrivera-t-on, pour 80 000 v., à 500 mm de diamètre et à un poids de 20 à 25 kg. La tendance à employer de très grandes portées avec des poteaux métalliques

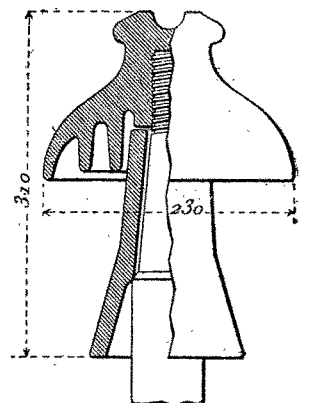


FIG. 3. — Isolateur de la
Missouri River Power Co
à 55 000 volts.