

## Sur l'état actuel des industries du four électrique,

par le Prof. G. Flusin,

Directeur de l'Institut d'Electrochimie et d'Electrometallurgie  
de l'Université de Grenoble.

(8. VII. 36.)

Le Comité d'Organisation de la Douzième Conférence internationale de Chimie m'a fait l'honneur de me demander de vous exposer la situation actuelle des industries du four électrique. C'est là une tâche qui n'est pas sans m'effrayer, car j'ai moins d'une heure pour la remplir et qu'en un aussi court laps de temps, en partie consacré à des projections, je devrai me borner à esquisser un tableau d'ensemble des industries électrothermiques, à synthétiser leurs tendances et à dégager les progrès essentiels accomplis en ces derniers temps.

La première usine électrothermique qui vit le jour avait pour objet la fabrication du cupro- et du ferro-aluminium; elle fut créée par les frères Cowles en 1886. C'est donc le cinquantenaire de l'électrochimie et de l'électrometallurgie que nous pourrions célébrer aujourd'hui; cinquantenaire qui évoque une période de recherches ardentes, de découvertes sensationnelles, réalisées parfois simultanément, qui se succédaient en tout cas à un rythme extraordinairement rapide, puisqu'en moins de quinze ans, toutes les grandes applications de l'électrolyse et de l'électrothermie étaient connues.

L'énumération est courte et suggestive. Cette même année 1886, marquée par l'apparition du procédé Cowles, voit naître le magnésium, puis l'aluminium, par électrolyse ignée. En 1887, se fonde l'industrie électrolytique des chlorates; en 1891, apparaissent le chlore et les alcalis électrolytiques, ainsi que le phosphore et le carborundum; en 1892, le sodium; en 1893, le graphite et le carbure de calcium; en 1895, la cyanamide calcique; en 1898, le corindon et les ferro-alliages (ferrochromes, ferrosiliciums, ferrotungstènes, etc.); en 1900, Héroult fait ses premières coulées d'acier électrique à la Praz.

Les causes d'un renouveau industriel si rare sont complexes. En tout premier lieu, les progrès accomplis dans la production de l'électricité et permettant l'application à l'industrie de l'électrolyse et de l'électrothermie. L'emploi de ces techniques si précieuses donnait, aussi bien dans l'ordre des décompositions chimiques que dans le champ des hautes températures, des possibilités nouvelles aux savants et aux ingénieurs. Ceux-ci et ceux-là s'empressèrent

d'explorer les domaines à peu près vierges qui s'offraient à leur activité. Les professeurs Borchers, en Allemagne, Lorenz, en Suisse, Moissan, en France, ont été, à cette époque, les pionniers de la science. Enfin des hasards heureux ont été parfois mis à profit par des observateurs sagaces. Sans parler du carborundum se formant à la place du diamant et de la cyanamide calcique prenant naissance à la place du cyanure, il faut lire le récit, plein d'humour, fait par Eimer, de la découverte du carbure de calcium par son ingénieur Willson.

Depuis la période héroïque de leur naissance, les industries du four électrique, les seules dont je vous parlerai ici, ont eu à faire face à de sérieuses difficultés, non point seulement pour conquérir sur le marché économique une situation qui leur permit de subsister, mais aussi pour mettre au point et finalement perfectionner les appareils et les procédés de fabrication.

Les perfectionnements réalisés dans l'appareillage sont d'ordre extérieur, de nature électrique ou mécanique. Ils sont considérables, ainsi que vous en jugerez tout à l'heure ; mais, de plus, ils sont visibles, ils sautent aux yeux du visiteur. Au contraire, les améliorations de procédés sont souvent d'ordre intérieur, de nature chimique ; elles passent facilement inaperçues, d'autant que l'on ne cherche généralement pas à les rendre apparentes. C'est ce qui a pu faire croire à certains qu'il n'y avait pas eu de progrès accomplis dans le fonctionnement même des appareils. Il n'en est rien et le temps n'est plus où le four électrique était un serviteur indocile et capricieux. Les bilans actuels de marche et la pureté des produits obtenus en sont une preuve évidente.

Les trois avantages essentiels du four électrique sont la possibilité d'atteindre, au besoin, des températures extrêmement élevées, la facilité du réglage de la température et la réalisation d'un milieu chimiquement neutre. Ces qualités expliquent le succès de ce mode de chauffage pour certaines opérations purement physiques.

C'est ainsi qu'il existe maintenant de nombreux fours électriques destinés au traitement thermique des métaux et des alliages ; une aciérie française a monté un four vertical de 2000 KW., pouvant chauffer jusqu'à 1000° des pièces d'acier de 70 tonnes et de 30 mètres de longueur.

*Fusion des métaux et des oxydes.* — La fusion des bronzes et des laitons, des aciers spéciaux, des métaux précieux s'effectue aujourd'hui, avec les meilleures garanties de qualité et de rendement, dans des fours de types variés : à chauffage indirect par résistance ou par arc, à induction haute fréquence ou basse fréquence ; tous ces appareils sont devenus d'une construction presque classique.

Le four électrique sert également à fondre des oxydes réfractaires, tels que la silice, l'alumine et la magnésie; mais, à ces températures de 2000° à 2700°, des précautions particulières sont indispensables pour éviter la contamination ou la réduction des produits par les matériaux du four ou par les électrodes. On est arrivé à obtenir industriellement des oxydes fondus, parfaitement blancs, dont la pureté dépasse 99,4% et atteint souvent 99,7%.

Ces résultats exigent, bien entendu, que l'on prenne comme matières premières des oxydes purs. Mais on peut aussi partir d'oxydes naturels impurs et réaliser simultanément la fusion et un affinage, consistant dans une réduction plus ou moins complète des impuretés.

C'est ainsi que l'ancienne et délicate industrie du corindon électrothermique a pour base la fusion réductrice de la bauxite. Au début, la teneur en  $Al_2O_3$  du corindon synthétique oscillait entre 80 et 90%. La richesse normale est aujourd'hui 95%; le produit riche titre 96/98%. Il n'est pas opportun de chercher à aller plus loin; on introduit alors des impuretés nouvelles, telle que la chaux, qui limitent l'affinage. En outre, la volatilisation et la réduction de l'alumine, ainsi que la consommation d'énergie deviennent considérables.

*Silicium et silico-alliages.* — Les ferrosiliciums sont au nombre des premiers alliages qui aient été fabriqués au four électrique. Pendant quelques années, on produisit surtout les deux types à 25% et 45/50% de Si; on mit ensuite progressivement au point la fabrication des ferrosiliciums riches à 70/80% et à 90% Si. En 1914, la richesse maxima, rarement atteinte, était 95%, teneur à partir de laquelle le produit commercial prenait le nom de silicium.

Cette fabrication n'a pas subi de modifications essentielles; on peut dire qu'Helfenstein avait déjà posé, il y a vingt ans, les principes de construction et de fonctionnement des grands fours à ferrosilicium. Cependant des perfectionnements de détails et des soins spéciaux dans le choix des matières premières et dans la conduite des appareils ont permis, depuis peu, de produire régulièrement du silicium à 98%, certaines usines atteignant 99% Si. Ces dernières teneurs sont indispensables pour l'élaboration, à partir de l'aluminium et du silicium, des alliages de fonderie à 13% Si.

Les électrométallurgistes utilisent d'ailleurs de plus en plus le silicium et les ferrosiliciums riches comme réducteur plus économique que l'aluminium, pour obtenir des métaux ou des ferro-alliages de basse teneur en carbone. Ainsi s'est créée une silicothermie analogue à l'aluminothermie, avec cette différence que la réduction par le silicium nécessite généralement le concours du four électrique.

Les usines électrothermiques produisent, outre les ferrosiliciums, un certain nombre de silico-alliages, pouvant contenir aussi du fer et dont les plus importants sont les silico-manganèses, les silico-chromes, les silico-aluminiums et mangano-silico-aluminiums, le silico-calcium et le silico-zirconium.

Ces alliages se préparent en général en réduisant simultanément par le carbone la silice et un oxyde métallique ( $MnO$  ou  $Cr_2O_3$  par exemple). Si l'on se souvient que, dans un silico-alliage, la teneur en carbone est automatiquement limitée par la richesse en silicium, on voit qu'il est possible d'obtenir, avec le carbone comme réducteur et pour une richesse en silicium suffisante, des silico-manganèses et des silico-chromes très pauvres en carbone. Il suffira ensuite d'oxyder, en laitier calcique, le silicium par l'oxyde de manganèse ou l'oxyde de chrome, pour produire des ferromanganèses ou des ferrochromes affinés, de très basse teneur en carbone.

Certains silico-alliages, tels que les silico-chromes, ne sont ainsi utilisés que comme produits intermédiaires, servant seulement à la préparation des ferro-alliages affinés. D'autres, tels que les silico-manganèses, ont des emplois variés; ils sont employés notamment en sidérurgie comme désoxydants ou comme agents d'addition.

Il a fallu, pour un certain nombre de ces alliages, créer des types commerciaux distincts, dans lesquels les teneurs des constituants fussent appropriées aux diverses applications. Il a fallu aussi tenir des garanties très strictes de pureté et de stabilité; par là, l'électrometallurgie a dû évoluer vers les méthodes de la métallurgie de précision.

La fabrication de ces alliages est souvent délicate, d'autant que les allures optima de réduction de la silice et de l'oxyde métallique sont parfois très différentes. Elles ont paru longtemps presque incompatibles, comme dans le cas des silico-manganèses, où cependant le rendement en manganèse est actuellement meilleur que dans le cas des ferro-manganèses.

Plus délicate encore est la fabrication des silico-aluminiums riches à 65/70% Al, 20/30% Si, 1% Fe et moins de 0,5% C; une usine française a réussi à produire cet alliage dans des conditions de régularité et de rendement (96%) qui me paraissent faire de ce produit le type le plus remarquable de la technique moderne du four électrique.

Bien que le silico-calcium à 30/33% Ca soit resté un produit à débouchés restreints, il mérite une mention particulière, en raison des difficultés que l'on rencontre à le préparer par la méthode ordinaire, c'est-à-dire par réduction de la silice et de la chaux au moyen du carbone. Ces difficultés ne sont pas, il est vrai, insurmontables; mais elles expliquent la supériorité du procédé de Bozel: réduction

de la silice par le carbure de calcium et par l'appoint de carbone nécessaire pour arriver à la composition  $\text{CaSi}_3$ .

*Métaux et alliages.* — La fabrication électrothermique des ferro-alliages, des métaux réfractaires et des aciers s'est développée vers 1900; elle a été la conséquence de la crise qui sévissait alors sur le carbure de calcium. Mais la préparation, au four électrique, des métaux réfractaires, étude entreprise systématiquement par Moissan en 1893, avait précédé l'industrie du carbure. C'est même en produisant du chrome en laitier calcique, à l'usine de Laval, que Chaplet fabriqua pour la première fois en France du carbure de calcium, dont l'existence avait été signalée un an auparavant par Moissan. L'origine du carbure français n'est pas, vous le voyez, sans analogie avec celle du carbure américain.

Sous la dénomination générique de ferro-alliages, on comprend les alliages de fer avec un certain nombre de métaux ou de métalloïdes, notamment le silicium, le phosphore, le manganèse, le chrome, le tungstène, le molybdène, le vanadium et le titane. A chacun de ces ferro-alliages correspondent un certain nombre de types, qui diffèrent les uns des autres par la richesse plus ou moins grande en élément spécial ou la teneur plus ou moins faible en carbone. On sait aujourd'hui produire des types de très haute qualité, c'est-à-dire très riches en élément spécial et très pauvres en carbone; c'est dans cette voie qu'ont été réalisés les progrès les plus sensibles pour l'industrie des ferro-alliages.

Il suffira de quelques exemples pour donner une idée de ces progrès. En 1914, la teneur minima en carbone garantie dans les ferrochromes était 1% et, seules, deux ou trois usines savaient descendre à 0,7%. Aujourd'hui, on produit des ferrochromes, dits suraffinés, ne contenant plus que 0,05% et même 0,03% de C. De même, on sait obtenir maintenant du manganèse affiné à 95% Mn et quelques centièmes % de carbone, ainsi que du ferrotungstène à 85% Tu et 0,5% C.

Pour arriver à d'aussi basses teneurs en carbone, on applique les artifices suivants, qui peuvent comporter une série d'opérations électrothermiques distinctes: ou bien, réduire l'oxyde, non plus par le carbone, mais par le silicium ou par du ferrosilicium riche; ou bien, préparer d'abord un silico-alliage de teneur suffisante en silicium pour que le carbone soit assez bas, puis désiliciurer l'alliage par un laitier oxydant basique.

De même, pour obtenir dans un alliage, par exemple du ferrochrome, une teneur en chrome supérieure au rapport du chrome au fer dans la chromite, on est obligé de recourir à certains artifices, tels que la réduction partielle du minerai, donnant une scorie riche

en chrome et très pauvre en fer, dont l'introduction dans le mélange final permet alors de gagner des unités supplémentaires.

L'adaptation du four électrique à la fabrication de l'acier, faite par Héroult de 1900 à 1903, ne trouva pas, à ses débuts, un accueil bien favorable et, pendant assez longtemps, un scepticisme poli fut le sentiment le plus indulgent que le nom d'électrosidérurgie pût éveiller chez la plupart des aciéristes. Les années ont passé; le petit four « monophasé série » a grandi et il s'est multiplié. En 1913, on tenait encore une statistique des fours à aciers: il y en avait à peu près 150 en service dans le monde et ils produisaient environ 160 000 tonnes d'acier par an. En 1929, la production mondiale a dépassé 1 750 000 tonnes; elle a diminué depuis lors. Mais le plus répandu des fours à acier est toujours le four type Héroult. Et, comme l'écrivait en 1925 M. Mathieu, rapporteur au 3ème Congrès de la Houille Blanche, « on ne peut que s'incliner devant l'inventeur prestigieux qui a su établir à son premier essai un four à acier qui n'a presque pas eu besoin d'être modifié en 25 ans pour rester le plus simple et le plus robuste ».

*Carbures.* — Des nombreux carbures, dont Moissan et ses élèves étudient la formation et les propriétés grâce au four électrique et sur lesquels d'autres savants, notamment Ruff, firent des recherches remarquables, deux seulement, le carbure de silicium et le carbure de calcium, sont, depuis longtemps d'ailleurs, l'objet d'industries importantes. Il convient cependant de signaler trois autres carbures: ceux de bore, de tungstène et de titane, qui ont trouvé des emplois intéressants et que l'on peut classer maintenant parmi les produits industriels.

La fabrication du carborundum, appellation commerciale du carbure de silicium, reste, comme par le passé, l'apanage de quelques usines qui ont su, chacune de son côté, améliorer progressivement leur appareillage et leurs procédés, en conservant, de ce fait, la maîtrise de la qualité. On sait l'influence néfaste des impuretés sur les propriétés abrasives du carborundum: l'ancienne variété à 98 % SiC est actuellement distancée par deux qualités supérieures: l'une à 99 %, l'autre à 99,5 % SiC. La cristallisation du carborundum dans le four est devenue plus dense, plus régulière; la formation du « moussieux » a été supprimée, celle de « l'amorphe » a été réduite. Le chauffage a été rendu plus rationnel et plus uniforme: on ne dissocie plus de carbure et on ne forme plus de graphite autour du résistor. Enfin la construction du four lui-même a été modifiée, de manière à faciliter les opérations du défournement et du chargement.

Non moins caractéristiques sont les progrès réalisés dans la fabrication du carbure de calcium, la plus importante, par la puissance absorbée, des industries du four électrique. Ce sont surtout des per-

fectionnements d'appareillage, inspirés par la préoccupation de réduire au maximum les dépenses de main-d'œuvre, d'exploitation et d'énergie.

L'importance de ces perfectionnements apparaîtra beaucoup plus clairement à l'aspect de vues photographiques empruntées à divers âges de l'industrie du carbure, les dernières correspondant à des installations modernes. Mais il est bon de signaler auparavant que les caractéristiques essentielles des fours actuels sont la puissance, la souplesse et la conduite mécanique.

Les fours primitifs de 200 à 300 HP, puis de 1000 à 2000 KVA sont devenus de splendides unités de 12000 à 16000 KVA, dont vous verrez tout à l'heure les trois types fondamentaux : un four triphasé à électrodes en ligne (four de Lannemezan de 12000 KVA), un four triphasé à électrodes en triangle (four de Marignac de 12500 KVA), deux fours monophasés à sole conductrice (fours Miguet-Perron de 6000 KVA à Montricher et de 16000 KVA à Porto-Maghera). Ces trois tendances s'affrontent dans une rivalité toujours indécisée, qui a les effets les plus heureux sur la technique de la fabrication du carbure.

La souplesse de ces fours modernes est telle qu'ils travaillent avec un rendement satisfaisant au tiers et même au quart de leur puissance nominale, ce qui leur permet de suivre, avec un bon coefficient d'utilisation, les variations de la puissance électrique disponible.

Enfin, leur conduite se trouve extrêmement simplifiée, grâce à des dispositifs presque automatiques de prise en silos, de mélange, de chargement, de piquage, de coulée et de manutention. Les changements d'électrodes, source de perturbations et de dépenses, sont supprimés par l'emploi des électrodes dites continues, qu'on allonge en pleine marche par leur partie supérieure, à mesure qu'elles s'usent par le bas.

Quant aux résultats, ils peuvent se traduire par les chiffres suivants. On produit aujourd'hui le carbure normal à 300 litres avec une consommation à la tonne de 900 à 920 K. de chaux, 620 à 650 K. de coke, 10 à 12 K. d'électrodes et environ 3200 KWH. En outre, quelques usines, en particulier l'usine de Montricher, berceau du four Miguet-Perron, produisent régulièrement du carbure, dit riche, à 335—340 litres, correspondant à une teneur de l'ordre de 90% en  $\text{CaC}_2$ , avec une consommation d'énergie de 4000 à 4500 KWH, selon la pureté des matières premières.

*Composés azotés.* — Le rôle du four électrique dans la synthèse des composés azotés se limite pratiquement aujourd'hui à la fabrication de la cyanamide calcique, bien que le chauffage électrique ne soit pas ici obligatoire et que certains fours à cyanamide soient chauffés par des gaz combustibles. Cette industrie n'étant pas spéci-

fièrement électrothermique, je me contenterai de signaler, sans insister, les progrès réalisés dans le rendement d'azotation qui dépasse maintenant 90% et qui atteignait à peine autrefois 80%, ainsi que les essais tentés pour se libérer de la nécessité de broyer finement le carbure de calcium avant de l'azoter.

*Phosphore et dérivés phosphorés.* — Le traitement au four électrique des phosphates naturels permet d'obtenir, à volonté, du phosphore, du ferrophosphore ou de l'acide phosphorique.

La fabrication du phosphore électrothermique remonte à plus de quarante ans; les débouchés du phosphore et de ses dérivés immédiats étant relativement restreints, la production n'est pas considérable. Or, les points délicats de la fabrication sont beaucoup plus d'ordre chimique que de nature électrothermique, tant que les unités en service ne dépassent pas une puissance de 1000 à 2000 KVA.

L'obtention du ferrophosphore, contemporaine de celle du phosphore dont elle est une conséquence forcée, ne présente rien de spécial tant que l'on opère en four clos; la fabrication en four ouvert est plus délicate, si l'on vise des teneurs en phosphore supérieures à 20%.

Quant à la fabrication électrothermique de l'acide phosphorique, elle est identique dans sa phase initiale à celle du phosphore. La différence dans les procédés commence au moment où le mélange de vapeurs de phosphore et d'oxyde de carbone sort de la charge. Certains brûlent en même temps le phosphore et l'oxyde de carbone. D'autres condensent d'abord le phosphore, de façon à mieux utiliser l'oxyde de carbone; le phosphore séparé est ensuite oxydé par l'air ou par l'eau et transformé en acide phosphorique, puis en phosphates.

En envisageant uniquement la phase électrothermique, on peut dire qu'elle a soulevé des problèmes assez sérieux, puisqu'il a fallu réaliser des fours clos de grande puissance (5000 KVA en Amérique et en France, 10000 KVA en Allemagne). Mais la solution peut être considérée comme acquise, du point de vue technique. Du point de vue économique, le succès de cette industrie dépend de la réunion d'un certain nombre de facteurs favorables.

#### CONCLUSIONS.

De ce rapide exposé, on peut, semble-t-il, tirer les conclusions suivantes:

1<sup>o</sup> Les industries du four électrique n'ont progressé que le jour où la collaboration des électriciens et des chimistes est devenue intime. Les électriciens ont trop souvent cru qu'ils pouvaient s'improviser métallurgistes ou chimistes; ceux-ci ont dû finalement reconnaître que l'électrothermie posait des problèmes électriques, extrêmement délicats, et faire appel, pour les résoudre, à des électrotechniciens avertis. Les fabrications électrothermiques

ont donc besoin d'ingénieurs à la fois électriciens, chimistes et métallurgistes; on rencontre aujourd'hui cette formation dans quelques établissements spécialisés.

- 2<sup>o</sup> Les progrès futurs paraissent s'orienter vers une harmonisation de certaines fabrications. Ce résultat est déjà obtenu, sur une petite échelle, dans quelques industries, par exemple, de ferro-alliages, pour lesquelles l'épuisement des scories nécessite une production équilibrée d'alliages de nature différente. L'azotation de la bauxite, proposée il y a 25 ans par Serpek, avait séduit le monde industriel par la possibilité de produire en même temps l'alumine et l'ammoniac; plus récemment, le procédé Liljenroth a suscité un intérêt de même ordre.
  - 3<sup>o</sup> Les recherches scientifiques deviennent de plus en plus la condition indispensable à la mise au point ou à l'exécution rationnelle d'un procédé. A cet égard, on ne saurait trop insister sur les services que rendent des organismes tels que celui-ci. Même dans l'ordre économique, et je pense ici, par exemple, à la normalisation des méthodes d'analyses employées dans les laboratoires industriels, les délibérations et les vœux de vos Commissions peuvent avoir une influence des plus utiles, en raison de l'autorité et de l'impartialité de vos décisions.
-