

Troisième partie.....	47
« Le four centrifuge à plasma d'arc transféré entre deux torches » de Marc FOËX.	47
Figure 34: ([25] foëx_3).....	48
Figure 35: ([20] foëx_6).....	49
Figure 36: ([20] foëx_5).....	49
Figure 37: ([album, 1962] foëx_16).....	51
Figure 38: ([29] ,1967,cras_4)	52
Figure 39: ([34] ,1970,cras_3)	53
Figure 40: (ex P.LEBEAU [7] ftr_38	54
Figure 41: ([album,1969] foëx_24).....	54
Figure 42: ([album, 1969] foëx_25).....	55
Figure 43: Torche à cathode oxyde ([album, 1969] foëx_27).....	56
Figure 44: Four à plasma triphasé ([album, 1969] foëx_26).....	57
Figure 45: ([EDF, Les Renardières, 1984][49] foëx_13)	58
Figure 46 : « Le four électrique » de Henri MOISSAN (1897) [1] « chauffage par accumulation de l'énergie fournie par un rayonnement » de Félix TROMBE (1948) [6] : réception en cavité et autocreuset ; « associations des fours solaires avec les chalumeaux à plasma » [25][20] et « four centrifuge à deux torches » (1962) de Marc FOËX	59

Troisième partie.

« Le four centrifuge à plasma d'arc transféré entre deux torches » de Marc FOËX.

Si les deux brevets et l'article au Bull. Soc. Chim. de 1952 [6][9][11] cités sont signés par Félix TROMBE seul, nombreux sont ceux qui sont cosignés par Marc FOËX depuis le début à Meudon en 1946. Par exemple, l'article sur « les fours centrifuges à accumulation d'énergie solaire » publié en 1952 aux CRAS [8] est cosigné et présenté par Paul LEBEAU : j'ai envie de dire évidemment, cela va de soi. Le brevet de 1954 [13] déjà cité, est cosigné également et il est le plus souvent impossible de dissocier les contributions respectives de TROMBE et de FOËX. Tout au plus, ici, peut on dire que, de fait, Félix TROMBE se consacrera davantage aux appareils de concentration de l'énergie solaire et à leur construction et Marc FOËX aux applications (plutôt aux mesures physiques d'ailleurs). Voilà une manière bien caricaturale de couper court à une analyse de leurs contributions respectives, qui, à l'évidence, sort du cadre du présent exposé. Chacun avait ses domaines d'excellence et nous pouvions tous en bénéficier.

Pour éviter toute interprétation erronée de mon propos, je tiens à préciser que très souvent Marc FOËX a su mettre en avant les applications et les avantages des fours solaires par rapport à d'autres moyens de chauffage à haute température. Par exemple la « comparaison des fours solaires et des fours à image classiques » qu'il présente en 1962 à Cambridge (Mass.) [25] et en 1963 (Journal des Recherches du CNRS) [20] est tout à l'avantage des fours solaires et les arguments qu'il présente sont multiples : et ses arguments sont fondés sur sa grande expérience dans des domaines difficiles (analyse thermique, mesures de températures).

Cependant, Marc FOËX s'intéresse à d'autres sources de hautes températures « complémentaires » ou « concurrentes » de la concentration de rayonnement solaire. Plus tard à Odeillo il développera la diffraction X à haute température avec chauffage par effet Joule, le four à image sous pression (J.P.TRAVERSE). Mais c'est dès 1961 que s'affirme son intérêt pour les chalumeaux à plasma comme source de hautes températures, d'abord par un brevet [18], puis par une communication à Paris en Décembre 1962 [19] et à Cambridge (Mass.) en Octobre (Proc.)

(foëx_3)[25] (fig. 34) et une conférence en Février 1963 à Paris (Journal des Recherches du CNRS) (foëx_5 et 6) [20] (fig. 35-36). Dans les publications correspondantes, FOËX développe les applications des fours solaires, mais consacre aussi une partie à « l'association des fours solaires avec les chalumeaux à plasma ». Par exemple il écrit : « Cette combinaison de moyens de chauffage est commode pour la fusion de substances qui comme les oxydes absorbent mal le rayonnement solaire à l'état solide. On obtient aussi de bons résultats pour réaliser certaines réactions chimiques entre phases condensées (solide ou liquide). Diverses opérations sont réalisables sur ce principe, on peut citer par exemple les réductions de différents produits par action de l'hydrogène fortement ionisé, la préparation de nitrures variés au moyen d'un plasma à l'azote ou encore la formation de carbures au moyen d'hydrocarbures tels que l'acétylène. L'emploi simultané d'un chalumeau à plasma et d'un four solaire présente surtout de l'intérêt dans le cas des traitements en cavité, tels que ceux qui peuvent être réalisés au moyen de fours centrifuges. Dans ces conditions il est plus facile de fondre des masses importantes de produits réfractaires et de les porter ensuite à des températures très supérieures à celles de leur point de fusion, ce qui provoque des effets de volatilisation considérables, utilisables pour certaines séparations ou réactions. » (figures dans Journal des Recherches du CNRS (foëx_5 et 6) [20] (fig. 35-36) et Thermal Imaging Techniques p. 158-160, (foëx_3) [25] (fig. 34).

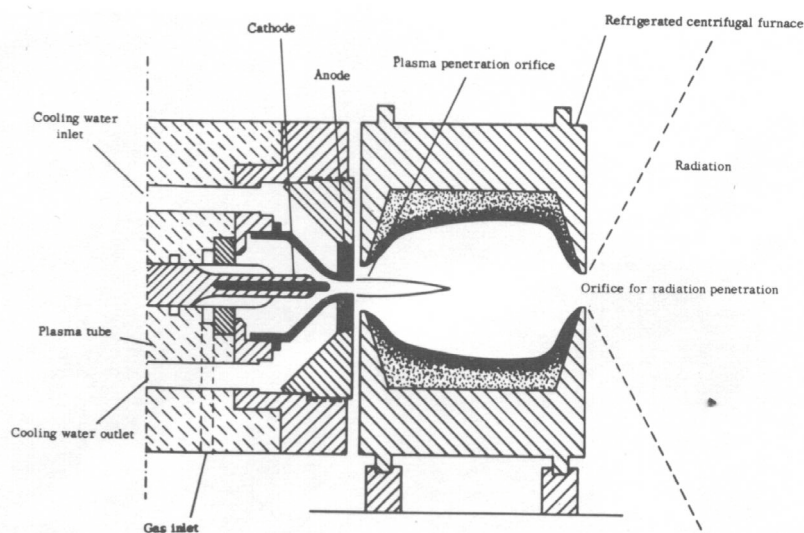


Fig. 11-17. Association of an imaging furnace with a plasma tube having a "flat front" for the treatment of a centrifuged product (cavity formation).

Figure 34: ([25] foëx_3)

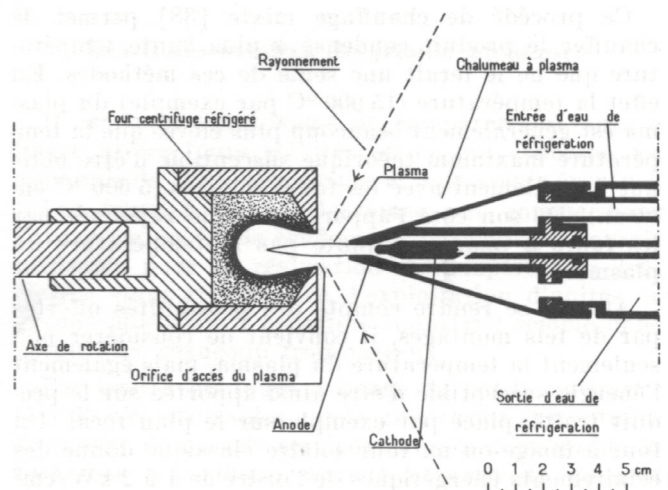


FIG. 25. — Dispositif comportant un four centrifuge chauffé à la fois par un four solaire et un chalumeau à plasma à bec effilé.

Figure 35: ([20] foëx_6)

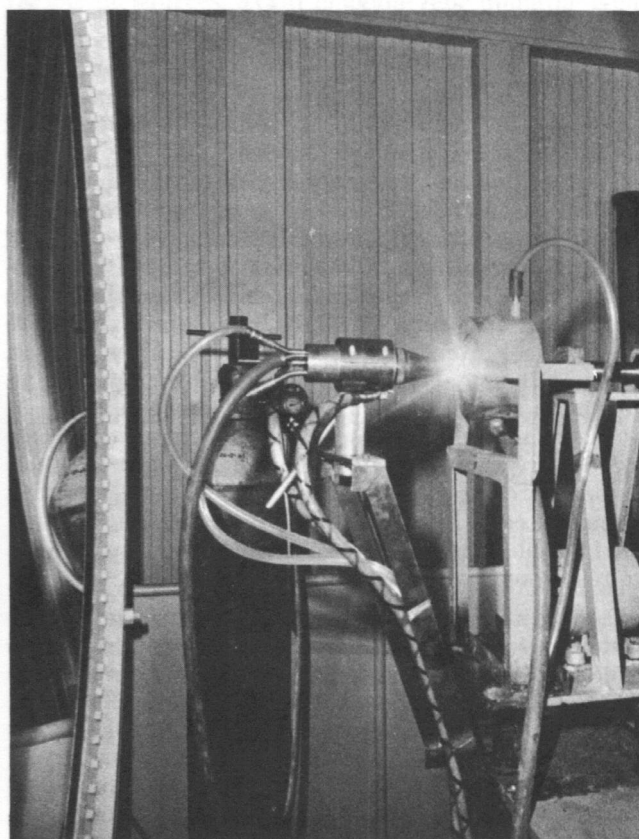


FIG. 26. — Photographie d'un dispositif utilisant concurrentement un chalumeau à plasma et un four solaire.

Figure 36: ([20] foëx_5)

« L'association » (la filiation) se fait par la technique de fusion en cavité « four tournant ». Les représentations des dispositifs sont suffisamment explicites pour l'illustration de mon propos : la filiation du four à plasma

de FOËX avec le four tournant à concentration de rayonnement solaire de TROMBE apparaît clairement.

De complémentaire au début, l'apport plasma deviendra séparé, autonome et « concurrent » dans les années 63 à 70 : FOËX et ses collaborateurs développent le four rotatif à deux torches et à superposition de puissance électrique.

Il est intéressant de relire la réponse de Marc FOËX à Paul HAGENMULLER qui lui demande s'il « pourrait brièvement comparer les avantages et les inconvénients du four solaire et du four à plasma » : « Les fours solaires et les fours à plasma présentent des caractéristiques très différentes. Les fours solaires permettent de porter à haute température les substances solides ou liquides susceptibles d'absorber d'une façon suffisante le rayonnement du soleil. Certains produits blancs diffusant fortement ce rayonnement ne fondent pas lorsqu'on les place au foyer ; par contre on provoque la fusion en procédant à un très léger apport de produit absorbant ce rayonnement ou en pratiquant dans le produit une légère cavité jouant le rôle de piège à radiation. La fusion, une fois amorcée se poursuit, le facteur d'absorption des produits fondus étant généralement très élevé. Par ailleurs les fours solaires ne peuvent être utilisés pour chauffer directement les gaz. Les fours à plasma sont susceptibles de porter directement les gaz à très haute température et donnent aussi de bons résultats en ce qui concerne le chauffage des substances solides ou liquides. Il est à noter que dans ce cas les caractéristiques d'émission des substances traitées ont moins d'importance que dans le cas du chauffage solaire. Cependant on traite plus facilement par les plasmas, les substances à faible facteur d'émission, comme les métaux, que les autres. Ces substances perdent en effet relativement peu d'énergie par rayonnement à haute température tout en ayant de bons échanges thermiques avec le plasma. Les fours solaires permettent de réaliser d'excellents traitements sous vide. Ces fours permettent aussi de meilleures localisations d'énergie que les fours à plasma, il est ainsi plus facile dans ce cas de disposer au voisinage des produits portés à haute température les appareils de mesures physiques et chimiques nécessaires aux expériences » (Bull. Soc. Chim. , 1965) [26]. On peut observer aussi que des deux schémas (1962) (foëx_3 et foëx_6) [25] (fig. 34-35) « d'association chalumeau à plasma et four solaire » un seul est réalisé et mis en application à ce moment là: l'autre va rester en attente , pour ainsi dire. FOËX reste attaché à ce premier modèle pendant cette décennie, mais parallèlement le concept évolue, le deuxième

modèle mûrit : une intense activité de mise au point des chalumeaux, de leur couplage, de la maîtrise de l'arc transféré entre chalumeaux, de la superposition de puissance dont sont témoins les multiples brevets de la période 1962-1970 ([21][22][23][24][36][37]), une communication [35]) et un CRAS [34] en 1970 après celui de 1967 [29].

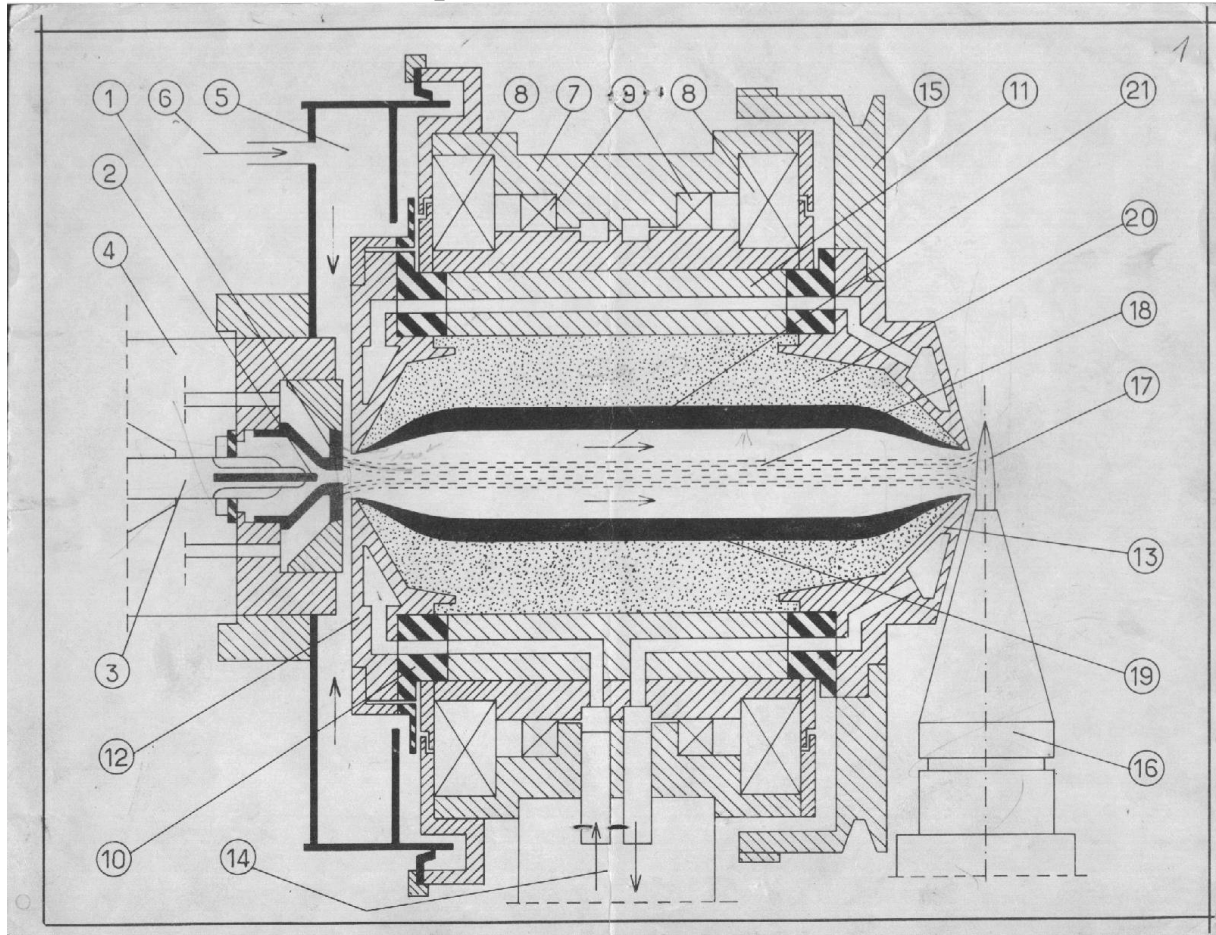


Figure 37: ([album, 1962] foëx_16)

Tout cela débouche sur le « four centrifuge à deux torches » : la deuxième face « solaire » à concentration de rayonnement du four tournant de 1962 [25] est remplacée par une face à torche plasma (voir les plans de 1962 – foëx_16 , le CRAS de 1967 – cras_4 et la réalisation finale de 1968-69 – cras_3) (fig. 37-39). L'aboutissement de toute cette phase de transition de 1962 à 1970 est donc le passage du concept de base (association cavité solaire – plasma) au concept final (four centrifuge à plasma d'arc transféré entre deux torches de Marc FOËX) et à ses réalisations successives jusque en 1970 (Stock-on-Trent) [35] (CRAS) [34] (fig. 41-42).

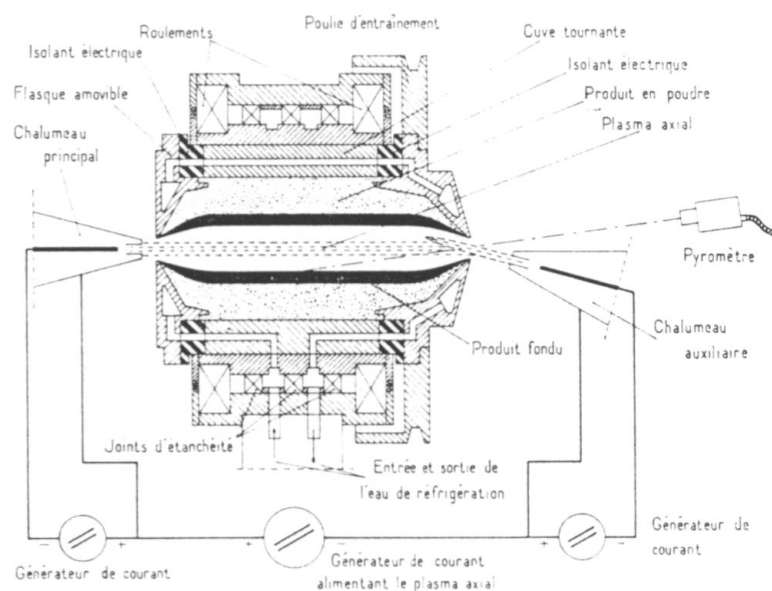


Fig. 1. — Schéma du four à plasma et de son alimentation électrique.

Figure 38: ([29] ,1967,cras_4)

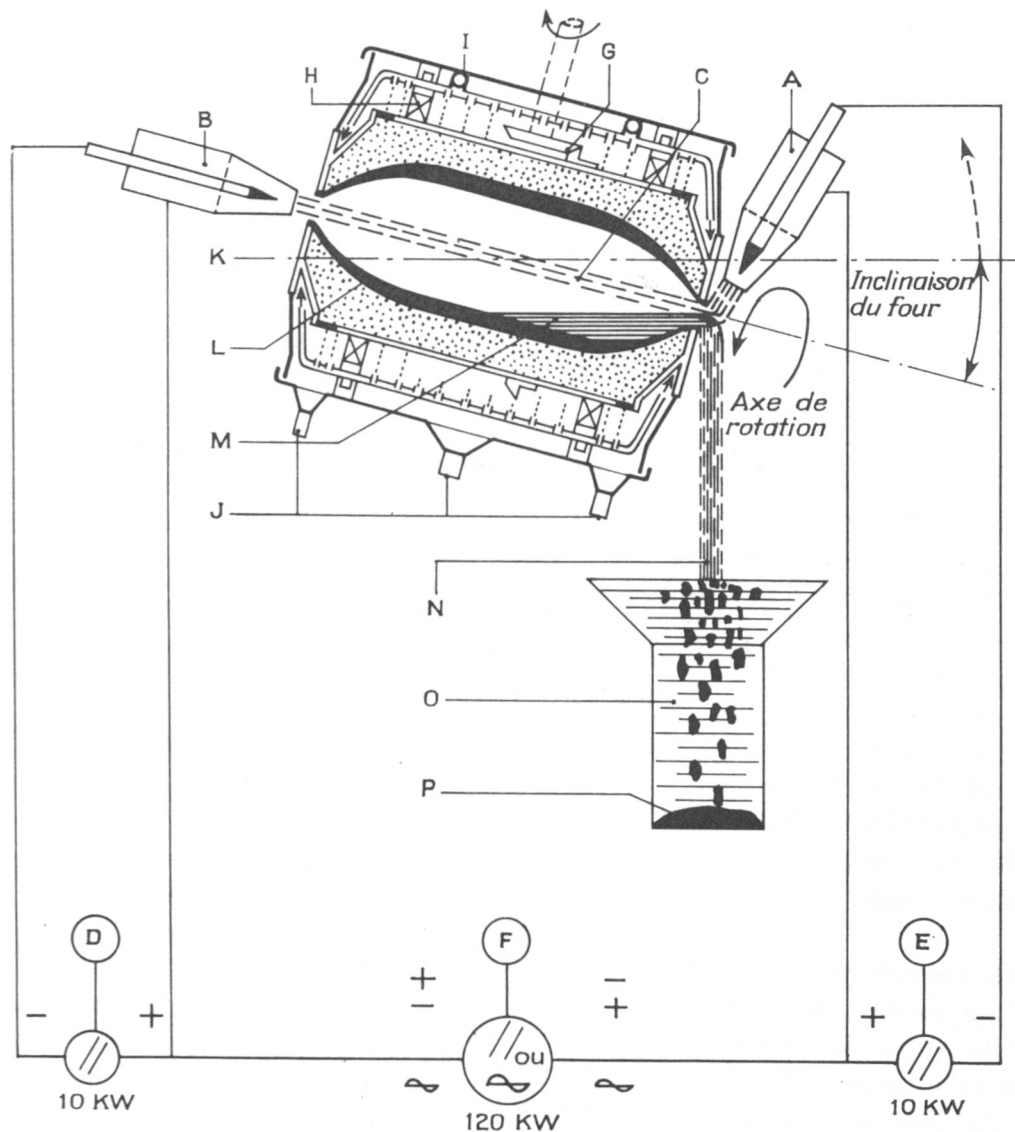


Fig. 1. — Schéma du four centrifuge et de son alimentation électrique.

A, chalumeau à plasma disposé vers l'orifice de coulée; B, chalumeau à plasma axial; C, jet de plasma axial; D, générateur de courant du chalumeau B; E, générateur de courant du chalumeau A; F, générateur de courant principal; G, entraînement de rotation de la cuve tournante; H, roulements du four centrifuge; I, entrée de l'eau de réfrigération; J, sortie de l'eau de réfrigération; K, produit en poudre ou en grains; L, produit en cours de fusion; M, produit fondu; N, coulée de produit fondu; O, bac de coulée contenant de l'eau; P, produit coulé et « étonné ».

Figure 39: ([34] ,1970,cras_3)

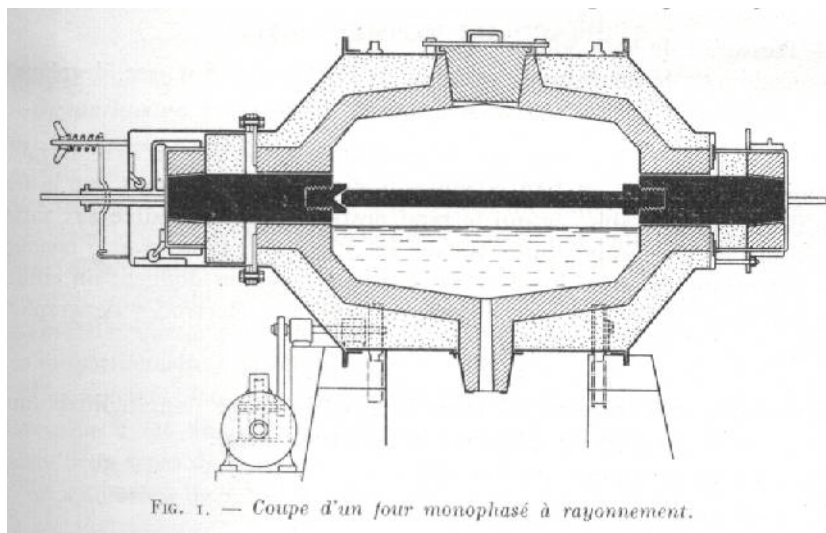


Figure 40: (ex P.LEBEAU [7] ftr_38

Je ne peux m'empêcher de penser que le four à rayonnement d'Henri GEORGE (« Les hautes températures et leurs utilisations en chimie » de P. LEBEAU [7] TII (1950) p.756) (ftr_38) (fig. 40) n'est pas étranger à l'évolution du four à plasma de FOËX : les deux concepts se rejoignent , le résistor de graphite du four à rayonnement de Henri GEORGE étant remplacé par le plasma entre les deux torches, il permet la superposition de puissance électrique entre les deux électrodes. Marc FOËX aussi bien que Félix TROMBE connaissaient personnellement Henri GEORGE et ses réalisations industrielles à Quartz et Silice.

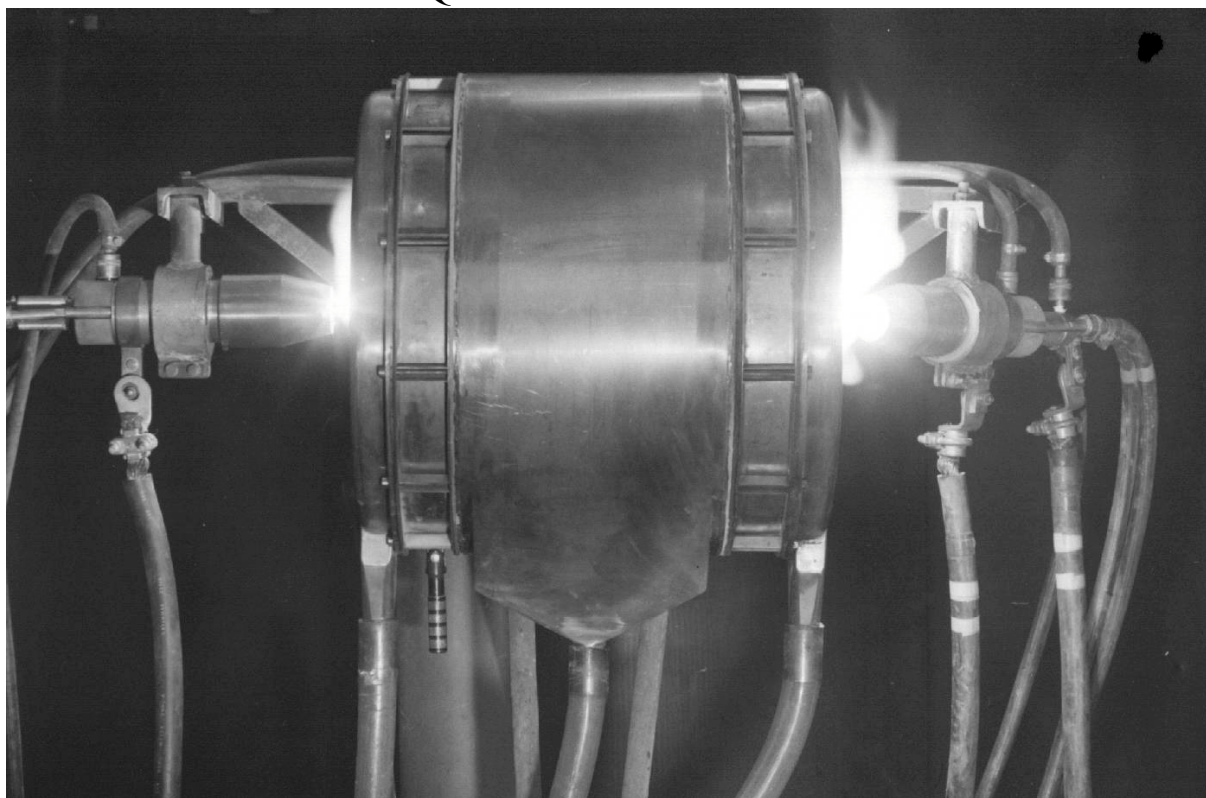


Figure 41: ([album,1969] foëx_24)



Figure 42: ([album, 1969] foëx_25)

D'autres techniques sont développées par Marc Foëx et ses collaborateurs :
torche à cathode oxyde, four à plasma triphasé (fig. 43-44).



Figure 43: Torche à cathode oxyde ([album, 1969] foëx_27)

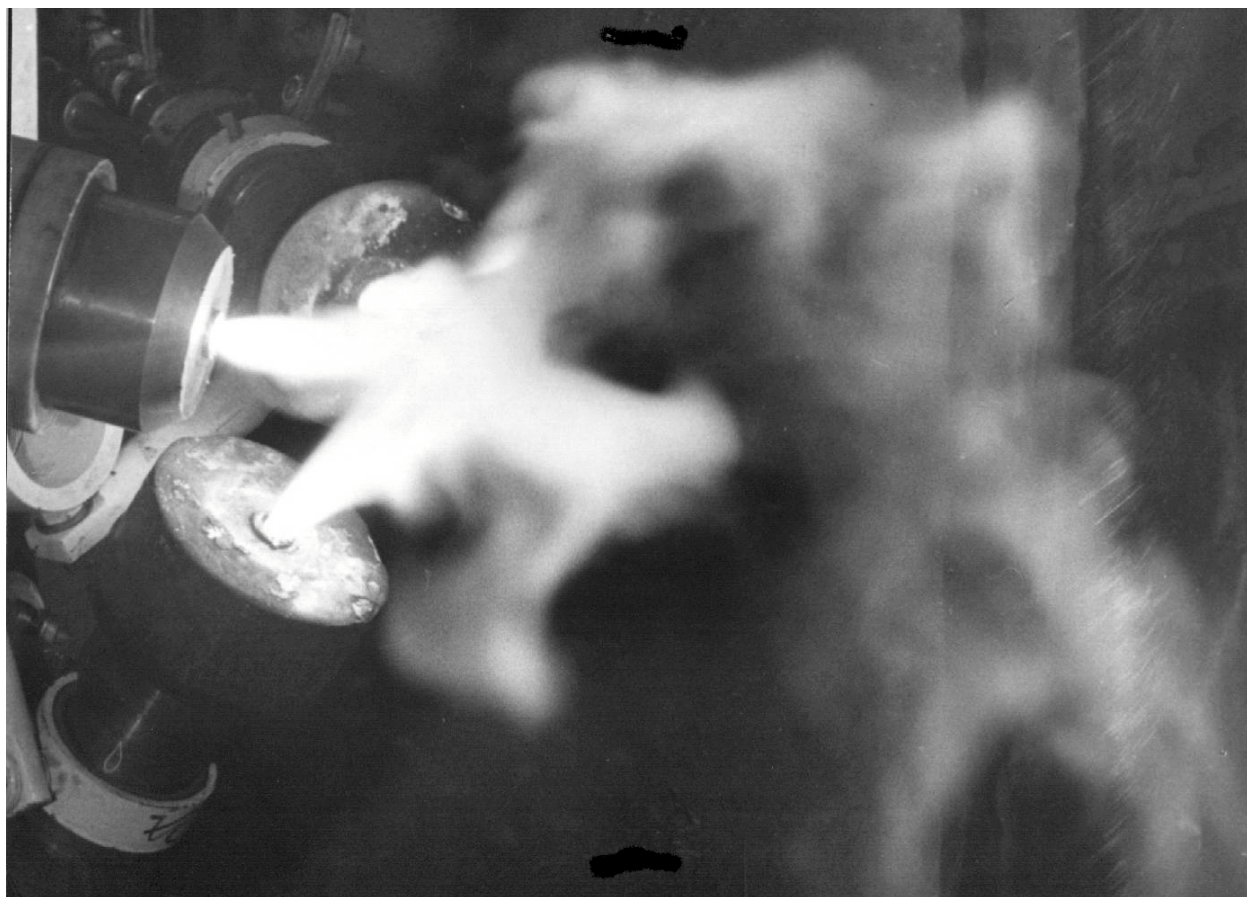


Figure 44: Four à plasma triphasé ([album, 1969] foëx_26)

Par la suite, le four à plasma est exporté au CEA (Saclay), au Canada (Université Laval), à l'EDF (Centre de Recherches des Renardières, 1984), puis de là, au CRITT Matériaux de Strasbourg (1991) [49] (fig. 45). Pendant cette période, des travaux sur les transferts thermiques dans le four rotatif à plasma d'une part, et sur le réacteur à lit soufflé par jet de plasma d'autre part, sont accomplis à Odeillo (IMP) [45][46][48].

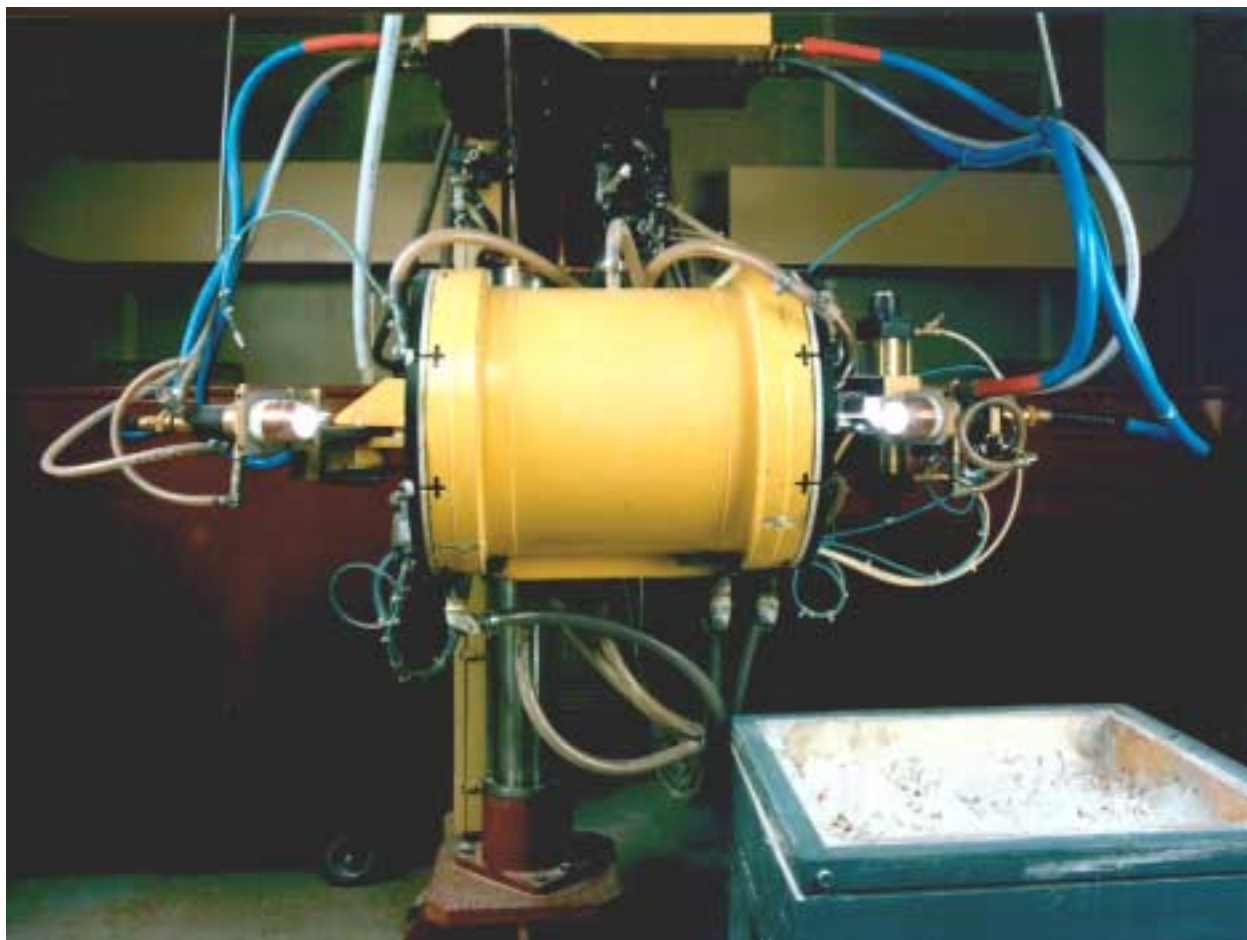


Figure 45: ([EDF, Les Renardières, 1984][49] foëx_13)

La figure 46 sur laquelle on a reporté « Le four électrique » de Henri MOISSAN (1897) [1], le « chauffage par accumulation de l'énergie fournie par un rayonnement » de Félix TROMBE (1948) [6] (réception en cavité et autocreuset), et les « associations des fours solaires avec les chalumeaux à plasma » [25][20] et le « four centrifuge à deux torches » (1962) de Marc FOËX, montre les filiations successives que nous avons mises en évidence. On voit là la trace identifiée de l'œuvre de Henri MOISSAN et de son « four électrique ».

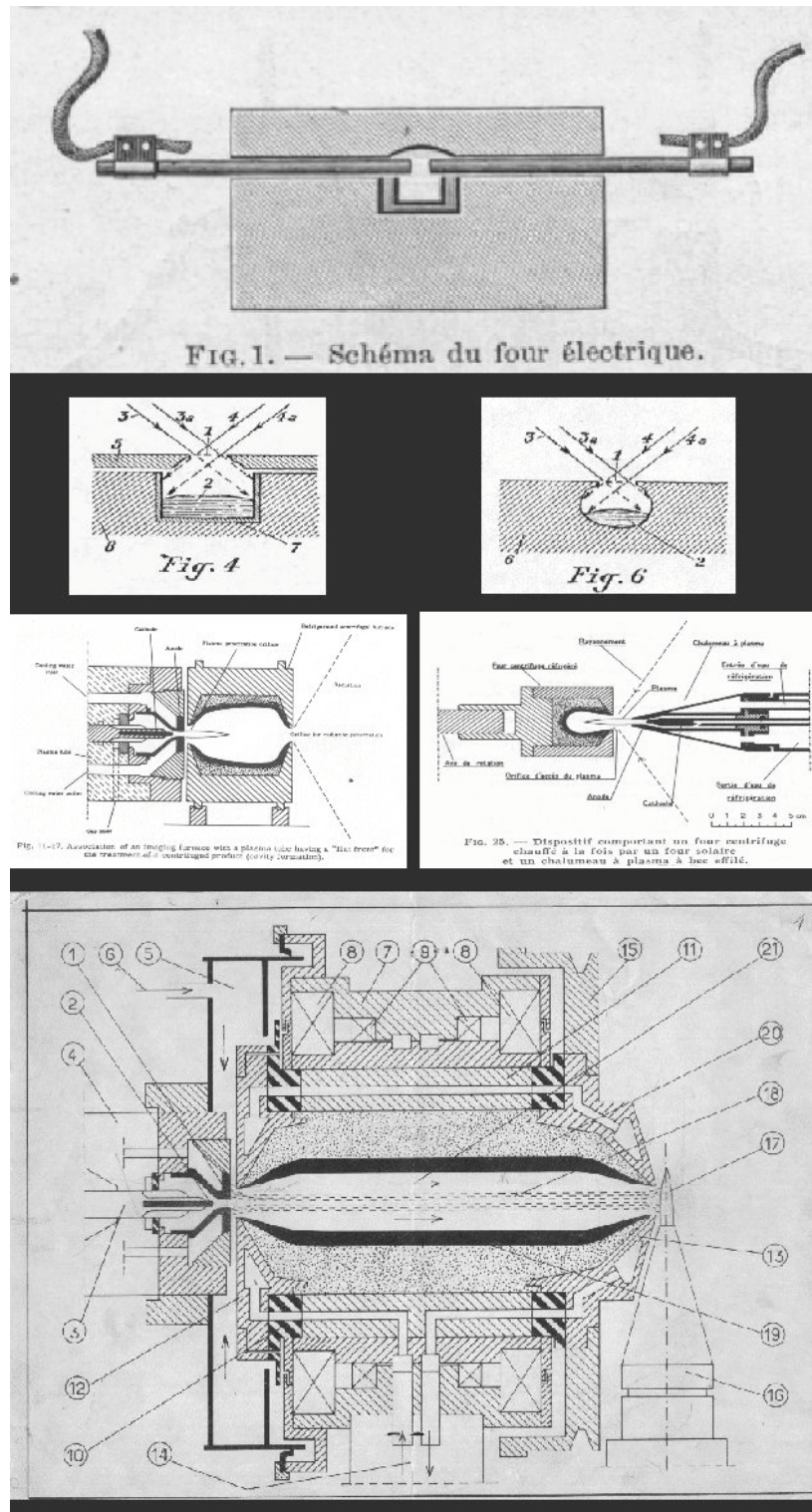


Figure 46 : « Le four électrique » de Henri MOISSAN (1897) [1] « chauffage par accumulation de l'énergie fournie par un rayonnement » de Félix TROMBE (1948) [6] : réception en cavité et autocreuset ; « associations des fours solaires avec les chalumeaux à plasma » [25][20] et « four centrifuge à deux torches » (1962) de Marc FOËX