

Deuxième partie.	31
« Le four rotatif à cavité à concentration de rayonnement solaire » de Félix TROMBE.	31

Figure 9 : réception en cavité et auto-creuset ([6] ftr_29)	32
Figure 10: réception en cavité ([11] ftr_27)	33
Figure 11 :([26] ftr_10)	34
Figure 12: Fusion en cavité –four tournant ([9] ftr_24)	34
Figure 13: Four tournant à atmosphère contrôlée ([9] ftr_25)	34
Figure 14: Four tournant: circulation de gaz ([9] ftr_26)	35
Figure 15: Four tournant : autocreuset et circulation de gaz ([8] ftr_23)..	35
Figure 16 : ([12] ftr_6)	36
Figure 17 : ([12] ftr_7)	36
Figure 18 : ([12] ftr_8)	37
Figure 19 : ([12] ftr_9)	38
Figure 20: Four centrifuge et autocreuset pour fusion métallurgique ([14] ftr_19)	38
Figure 21: Four tournant et autocreuset pour fusion métallurgique ([14] ftr_20)	38
Figure 22: ([12] ftr_2)	39
Figure 23: ([12] ftr_3)	39
Figure 24: ([12] ftr_4)	39
Figure 25: ([12] ftr_5)	40
Figure 26: Fusion métallurgique en four centrifuge sous flux de fusion ([13] ftr_21)	40
Figure 27: Fusion métallurgique en four tournant sous flux de fusion ([13] ftr_22)	41
Figure 28: ([14] ftr_15)	41
Figure 29: ([14] ftr_16)	42
Figure 30: ([14] ftr_17)	42
Figure 31: ([14] ftr_18)	42
Figure 32: ([27] platine_ref)	44
Figure 33 : « Le four électrique » de Henri MOISSAN (1897) [1] et « chauffage par accumulation de l'énergie fournie par un rayonnement » de Félix TROMBE (1948) [6] ([1] [6] hm_ftr)	45

Je n'ai aucun élément de preuve absolument établi de ce que je vais avancer maintenant, mais j'ai suffisamment d'indices pour asseoir ma conviction : je vais essayer d'établir maintenant une filiation au four électrique de MOISSAN, en deux étapes successives, des fours solaires à cavité de TROMBE et des fours à plasma de FOËX, ce qui nous conduira à la présentation du four rotatif à plasma à arc transféré du projet VULCANO du CEA (Cadarache) par Claude JÉGOU.

Deuxième partie.

« Le four rotatif à cavité à concentration de rayonnement solaire » de Félix TROMBE.

Assurément TROMBE m'avait parlé (au cours des longues soirées de discussions, toujours de nombreux livres posés sur sa table de bureau, lors de ses passages à Mont Louis) des travaux de MOISSAN, mais je n'ai pas gardé un souvenir détaillé de ces sujets précis d'entretien : il m'en est resté des éléments de la culture hautes températures dont TROMBE et FOËX m'ont imprégné et, surtout, une image : le four électrique et « sa cavité aussi petite que possible » ; je n'avais jamais, jusqu'à ces derniers temps, lu MOISSAN dans le texte ; par conséquent il a bien fallu qu'on m'en parle. Dans ses publications, TROMBE, cependant, fait rarement référence à MOISSAN. Mais dans un article co-signé par FOËX et BARDET datant de 1945 [5], « Étude sur la purification du graphite », les auteurs écrivent : « L'histoire de la purification du graphite est jalonnée de noms tels que, celui de MOISSAN qui fut en cette matière, comme dans bien d'autres, un précurseur... » La référence va de soi, mais on sent quand même une admiration vouée à l'ampleur de l'héritage du génial précurseur.

Par ailleurs TROMBE ne montre pas un grand intérêt pour l'arc électrique : néanmoins, très tôt, dans son activité « four solaire » elle-même, il se montre concerné par les fours à image d'arc : « En même temps que, en 1946, nous commençons nos expériences sur les fours solaires, M. PARISOT de la Société « Carbone Lorraine » entreprenait, sur notre demande, une série d'expériences non seulement avec l'arc classique, mais aussi avec un arc intensif... On sait que le cratère positif de l'arc intensif donne un rayonnement dont la répartition énergétique est presque égale à celle du corps noir à 6000 K, alors que l'arc normal donne seulement 3700 K » (1966) [27]. La suite du même article est aussi

intéressante à plus d'un titre : EDF et « le four solaire électrique » en 1952, le four à image de plasma, etc...En 1953 TROMBE et FOËX prennent un brevet [10] sur un « réflecteur pour arc et four à accumulation » . TROMBE est visiblement préoccupé par le fait que ses inventions pour la réception du rayonnement solaire concentré peuvent aussi être utilisées pour les fours à image.

Cependant rien ne laisse penser que la filiation qui nous occupe se fait par l'arc, que TROMBE a définitivement, depuis le début, remplacé par la concentration de rayonnement solaire, mais plutôt, par la cavité de réception dans laquelle il fait rentrer le rayonnement solaire concentré.

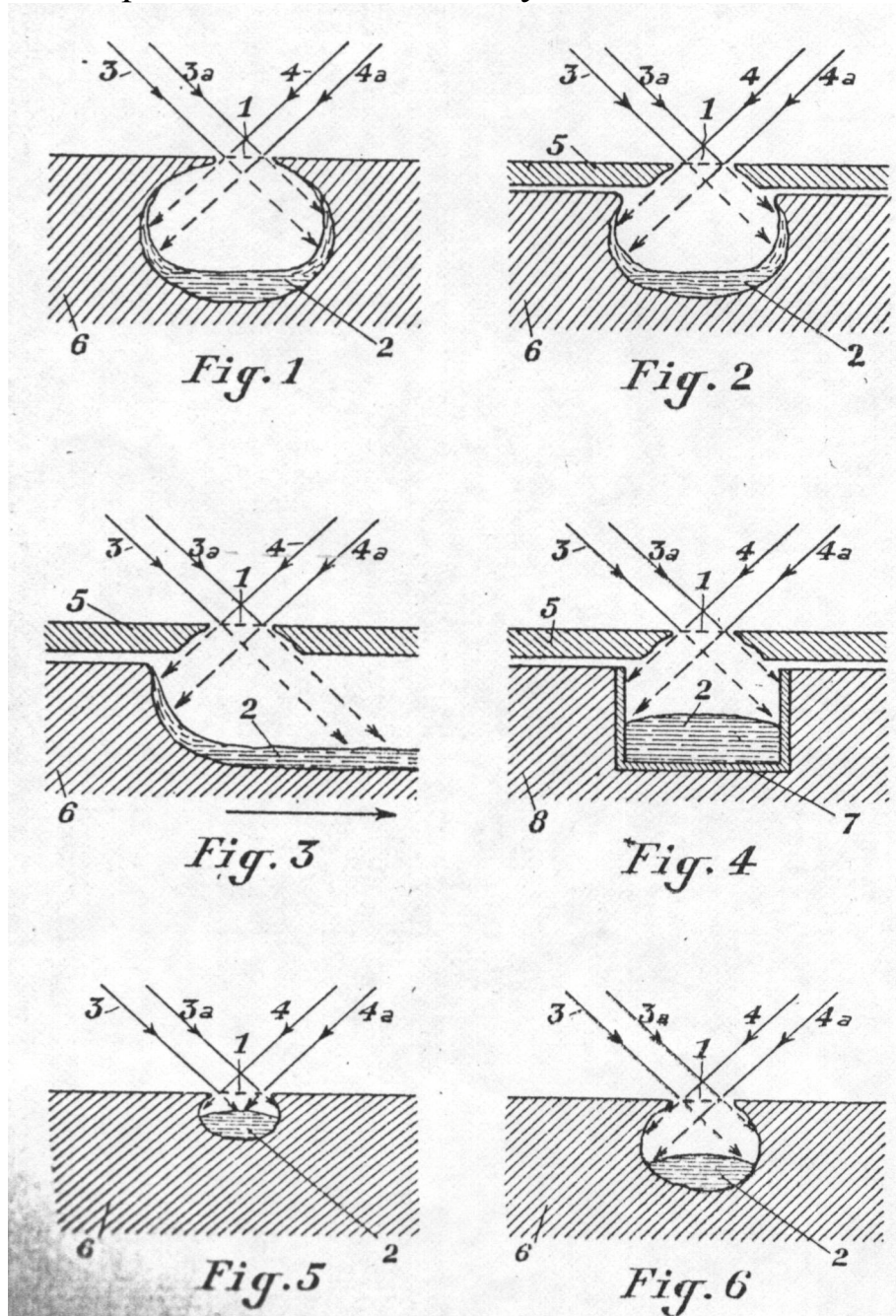


Figure 9 : réception en cavité et auto-creuset ([6] ftr_29)

Les illustrations sont multiples : dans le brevet de 1948 (**Figure 9 : ftr_29**)[6], p. 1 : « Le problème essentiel qu'il convient de résoudre pour traiter une substance à haute température par concentration de rayonnement, consiste à rendre maximum l'énergie absorbée par rapport à l'énergie transmise et à l'énergie réfléchiée, tout en limitant autant que possible les pertes indiquées ci-dessus. ... L'invention consiste essentiellement à utiliser une cavité à grande surface intérieure, (*pour éviter les surchauffes*) bien calorifugée et pourvue d'un orifice de faibles dimensions par lequel pénètre le rayonnement. Une telle cavité correspond à une enceinte isotherme ou corps noir, qui recevrait de l'extérieur les calories permettant son échauffement. ... L'énergie est apportée par le rayonnement lui-même concentré au maximum sur l'orifice de cette cavité et dispersé ensuite sur sa surface intérieure ». Suivent les descriptions des différents avantages de cette technique de chauffage et les illustrations des différents cas. On retrouve la même préoccupation de réception en cavité corps noir en 1952 (Bull. Soc. Chim., fig. 13) (**Figure 10: ftr_27**) [11]. C'est le modèle de réception qui donne naissance au four rotatif à cavité à concentration de rayonnement solaire.

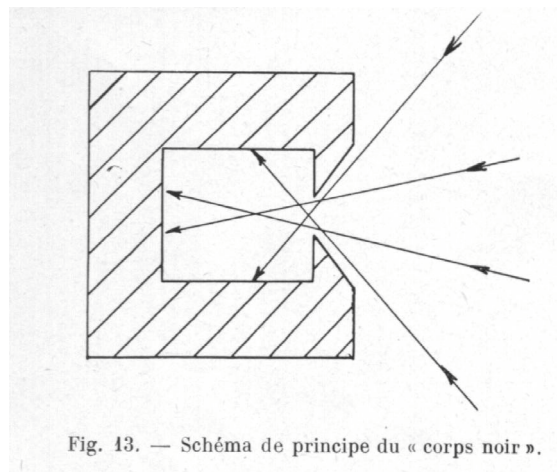


Fig. 13. — Schéma de principe du « corps noir ».

Figure 10: réception en cavité ([11] ftr_27)

Le modèle de la réception en cavité corps noir se concrétise en four tournant dès qu'il s'agit de mettre en œuvre les premières installations horizontales de Mont Louis en 1952 (Bull. Soc. Chim. , brevet, CRAS) (**Figure 12 à Figure 15 :ftr_23 à 26**) [9][8].

Le schéma de l'autocavitation de l'alumine à la fusion est encore repris en 1965 [26] (**Figure 11 :([26] ftr_10)**).

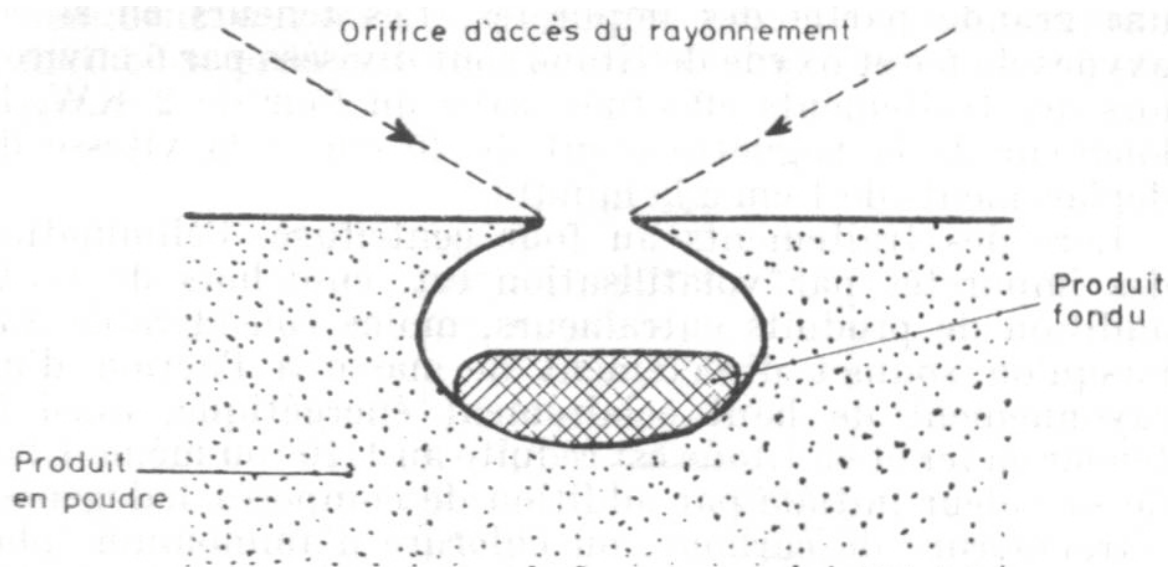


Fig. 13. — Traitement en cavité corps noir.

Figure 11 :([26] ftr_10)

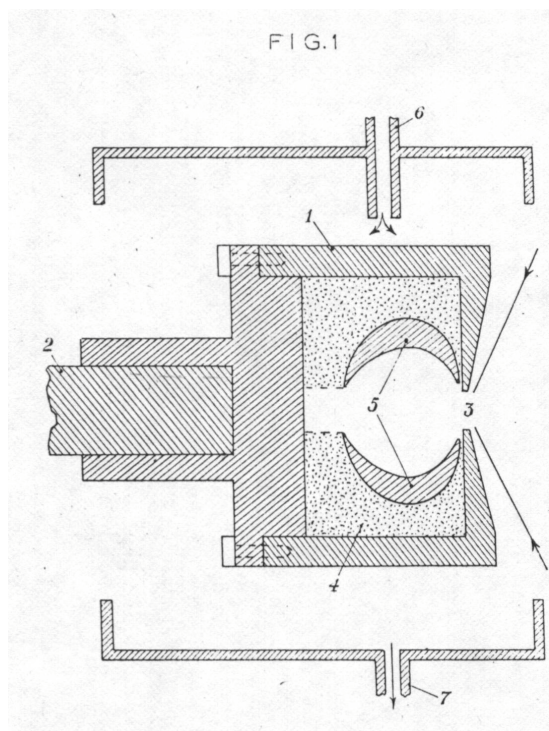


Figure 12: Fusion en cavité –four tournant ([9] ftr_24)

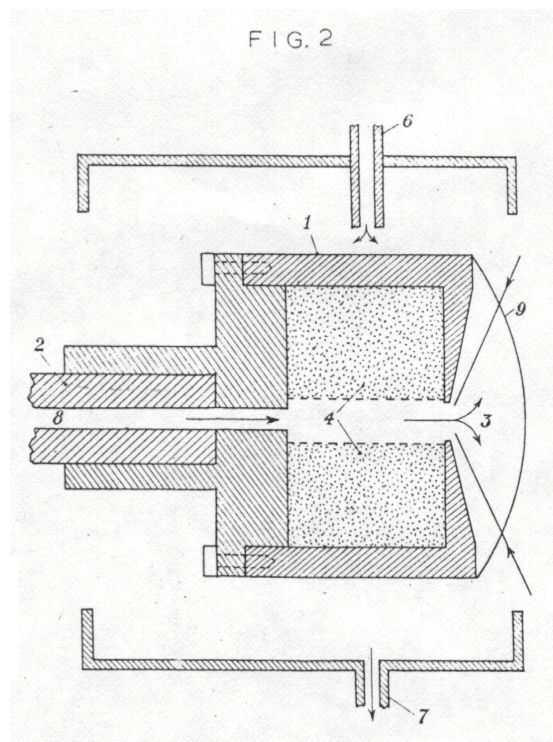


Figure 13: Four tournant à atmosphère contrôlée ([9] ftr_25)

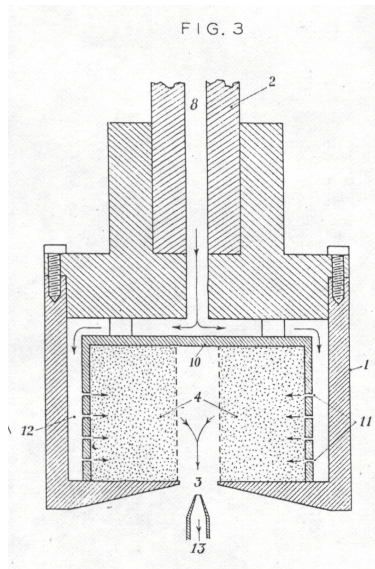


Figure 14: Four tournant: circulation de gaz ([9] ftr_26)

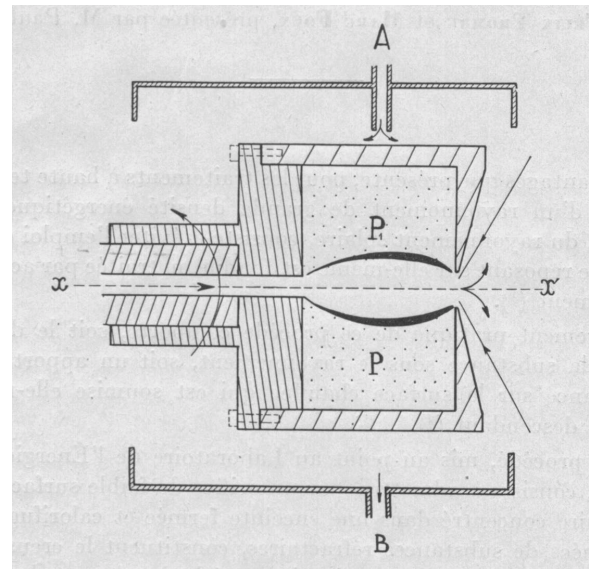


Figure 15: Four tournant : autocreuset et circulation de gaz ([8] ftr_23)

Dans le brevet [9], p. 1 : « Dans ce qui va suivre, on parlera de l'énergie solaire, mais l'invention est applicable à tous les rayonnements concentrés, par exemple au rayonnement émis par un arc à grande intensité, ou au rayonnement cathodique ». « La présente invention concerne l'application nouvelle de fours tournants... Elle consiste essentiellement à limiter la cavité utile par une enceinte tournant autour d'un axe, réel ou virtuel, passant par l'ouverture d'accès du rayonnement, la vitesse de rotation étant suffisante pour que les matières y contenues sous forme divisée de préférence, soient projetées et maintenues contre les parois internes par effet centrifuge, les dites matières y contenues constituant un isolant thermique protégeant l'enceinte contre toute action des produits à traiter et pouvant contenir des catalyseurs, le traitement, continu ou discontinu, des substances , solides, liquides ou gazeuses, pouvant être effectué à l'intérieur de la cavité dans une atmosphère conditionnée, par tous moyens appropriés ».

De même dans le CRAS de 52 [8] (signé F.TROMBE et M.FOËX) : « Un autre procédé, mis au point au Laboratoire d'Énergie Solaire de Mont Louis consiste à admettre par un orifice de faible surface, le rayonnement

concentré dans une enceinte fermée et calorifugée dont les parois, formées de substances réfractaires, constituent le creuset de réaction ».

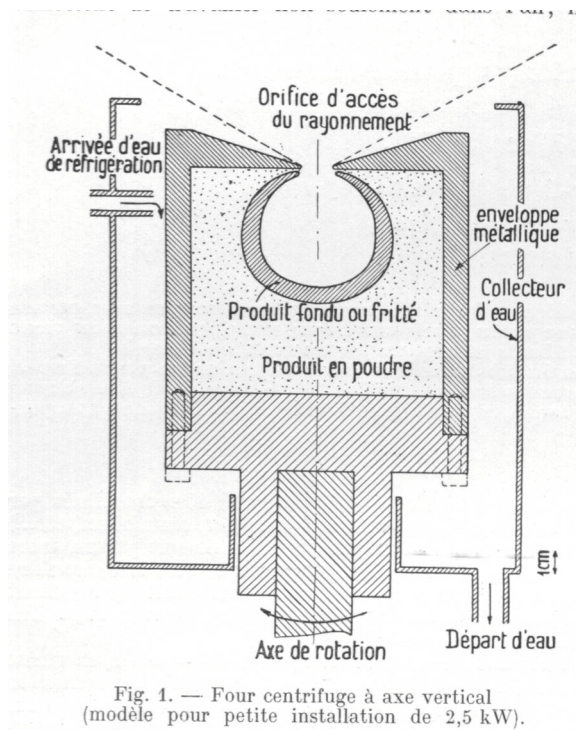


Figure 16 : ([12] ftr_6)

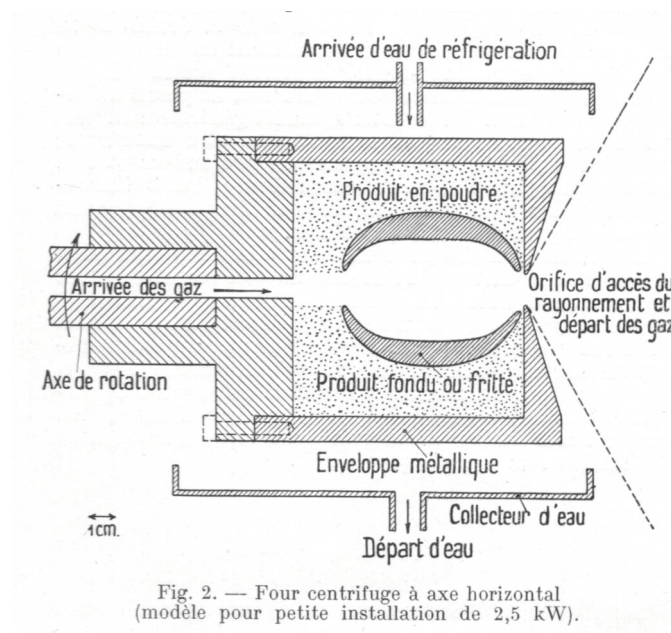


Figure 17 : ([12] ftr_7)

À partir de 1954, après le démarrage de la grande installation de Mont Louis, c'est la mise en application à l'échelle pilote du four tournant à concentration de rayonnement solaire qui est accomplie (Bull. Soc. Chim. 54) (Figure 16 à Figure 19 : ftr_6 à 9) [12] pour les applications céramiques et métallurgiques (Brevet, 1954) [13] (Figure 26 à Figure 27 : ftr_21 et 22) (Silicates Industriels, 1958) (Figure 20 à Figure 21 : ftr_19 et 20)[14].. On en voit une excellente illustration sur la planche du Bull. Soc. Chim. de 1954 (Figure 22 à Figure 25 : ftr_2 à 5) [12], et dans Silicates Industriels (1958) (Figure 28 à Figure 31 : ftr_15 à 18)[14].

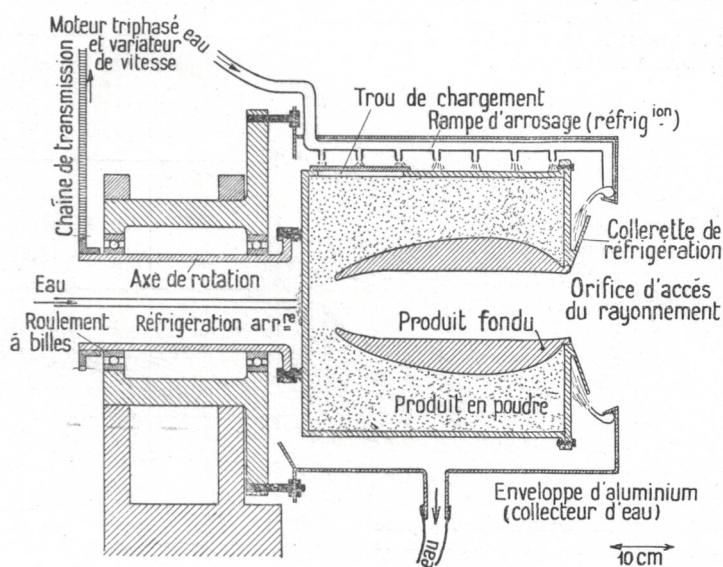


Fig. 3. — Four centrifuge à axe horizontal (modèle pour installation de 50 à 75 kW).

Figure 18 : ([12] ftr_8)

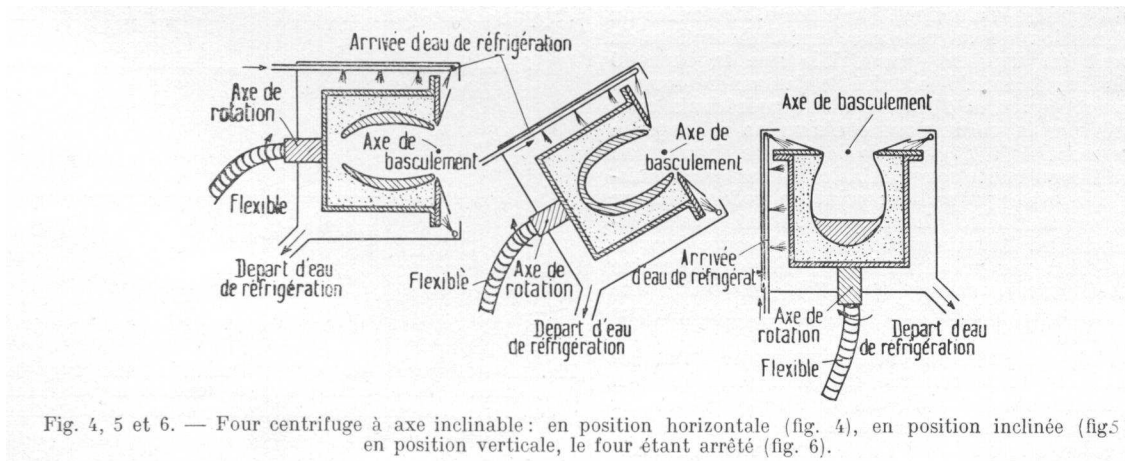


Figure 19 : ([12] ftr_9)

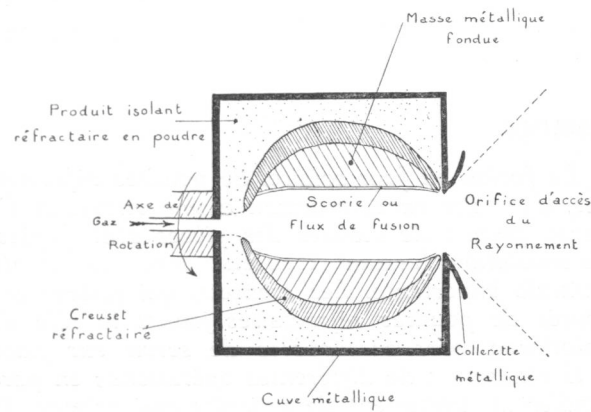


Figure 20: Four centrifuge et autocreuset pour fusion métallurgique ([14] ftr_19)

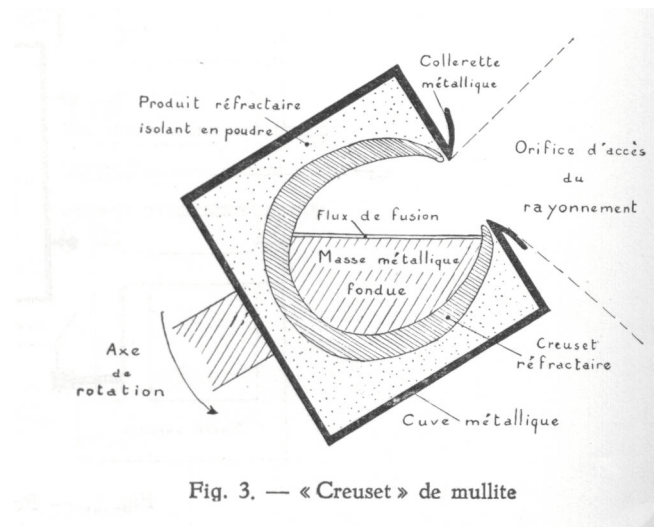


Figure 21: Four tournant et autocreuset pour fusion métallurgique ([14] ftr_20)

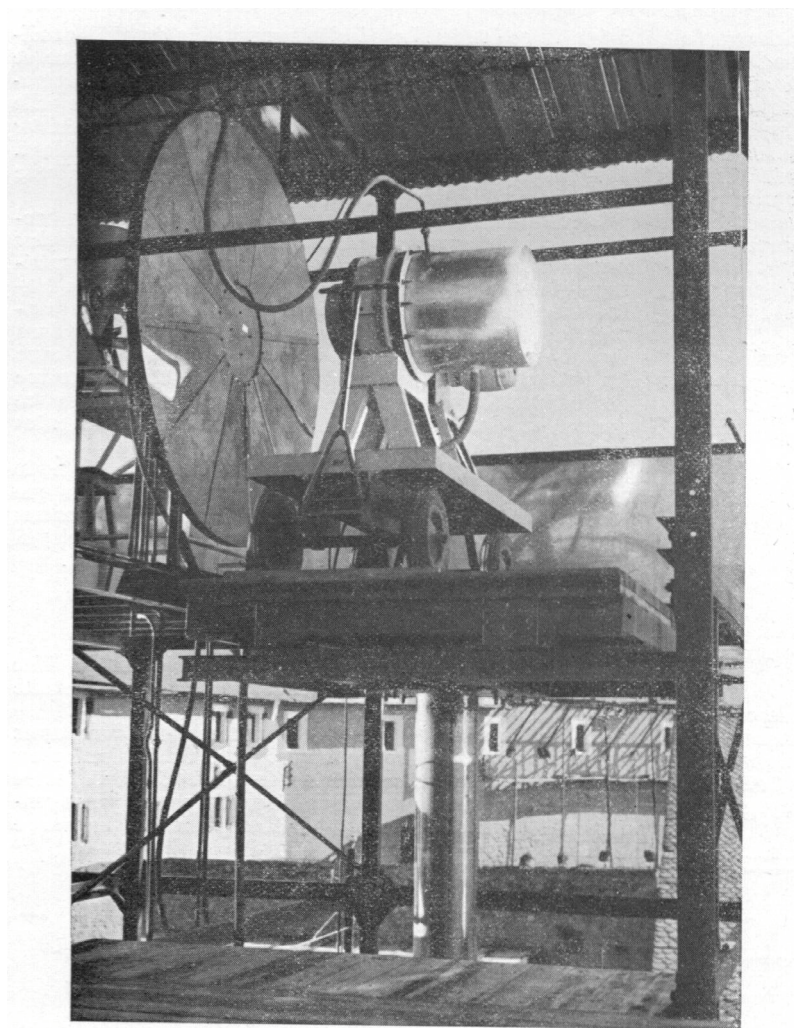


Fig. 11. — Vue générale d'un four centrifuge (cuve de 50 litres) de la grande installation, avec le vérin support de réglage en hauteur.

Figure 22: ([12] ftr_2)

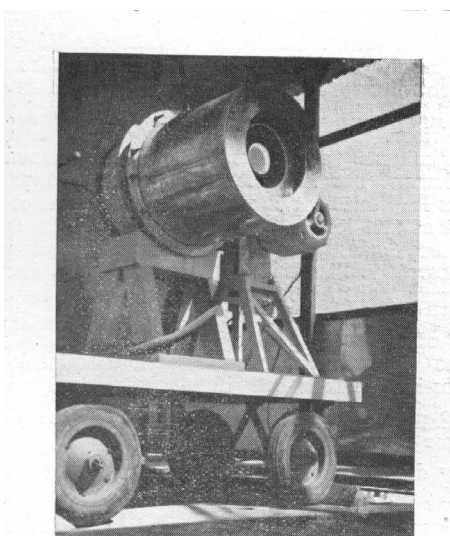


Fig. 12. — Vue rapprochée du four centrifuge précédent.

Figure 23: ([12] ftr_3)

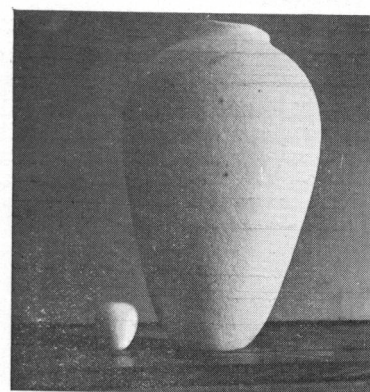


Fig. 15. — Pièces de silice vitreuse obtenues à la petite et à la grande installation après des temps de traitements analogues.

Figure 24: ([12] ftr_4)

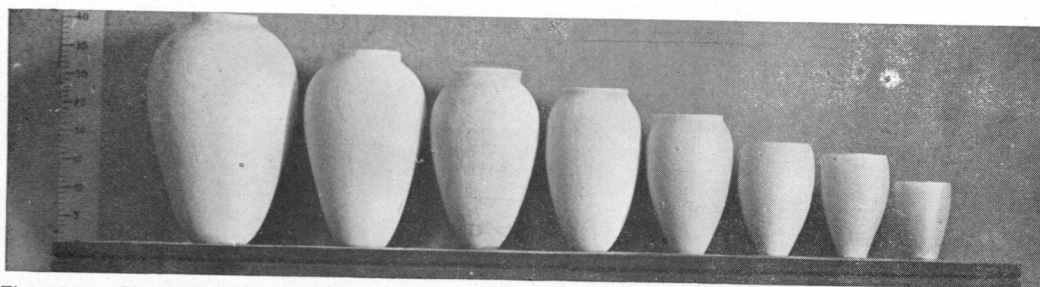


Fig. 13. — Pièces de silice vitreuse obtenues par fusion de sable de Nemours au four centrifuge précédent, en des temps de traitement différents.

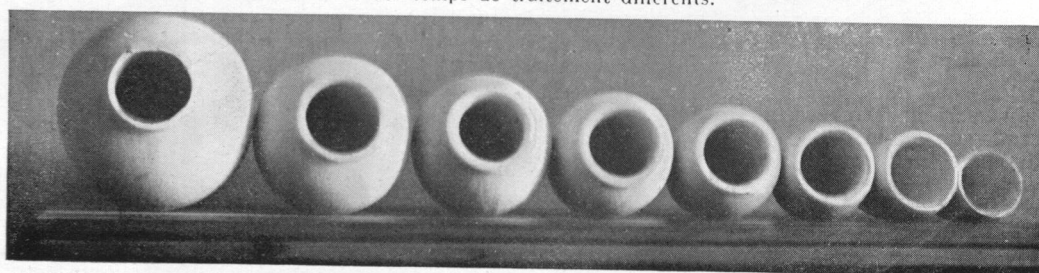


Fig. 14. — Vue des mêmes pièces de silice vitreuse couchées.

Figure 25: ([12] ftr_5)

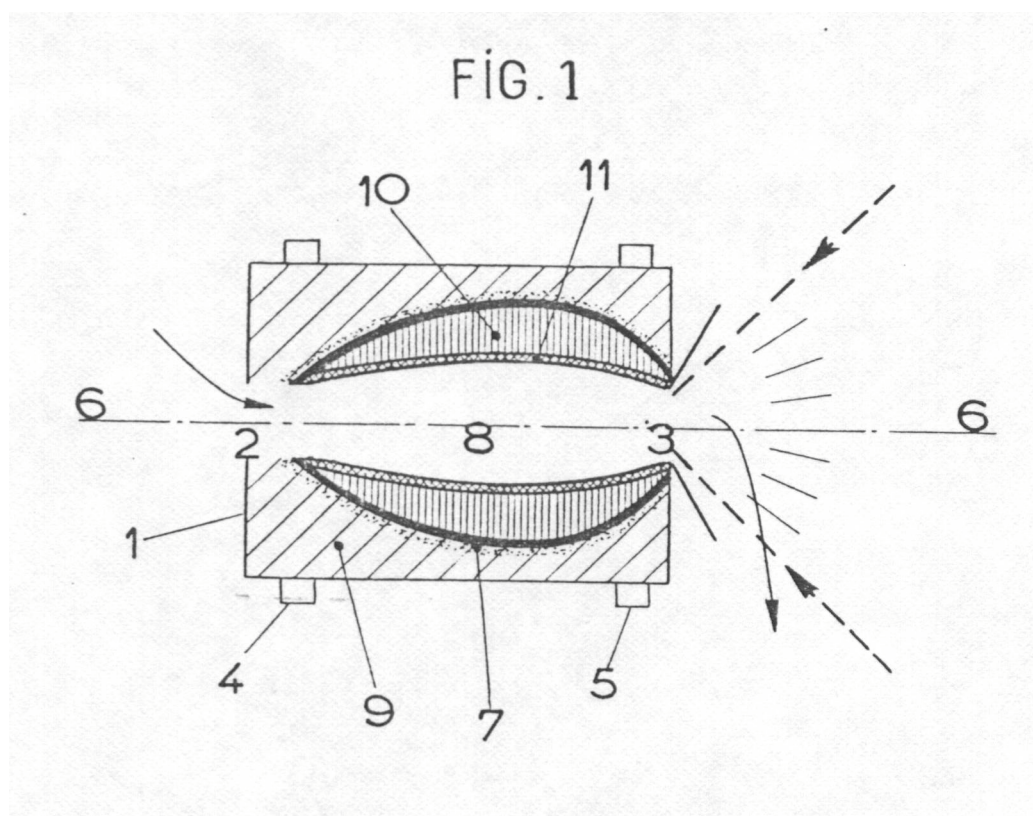


Figure 26: Fusion métallurgique en four centrifuge sous flux de fusion ([13] ftr_21)

« Le four électrique de Henri MOISSAN a cent ans : une filiation four à arc, four solaire, four à 40 plasma ? » par Claude Royère - CNRS – IMP – Odeillo (trav_2t.doc)

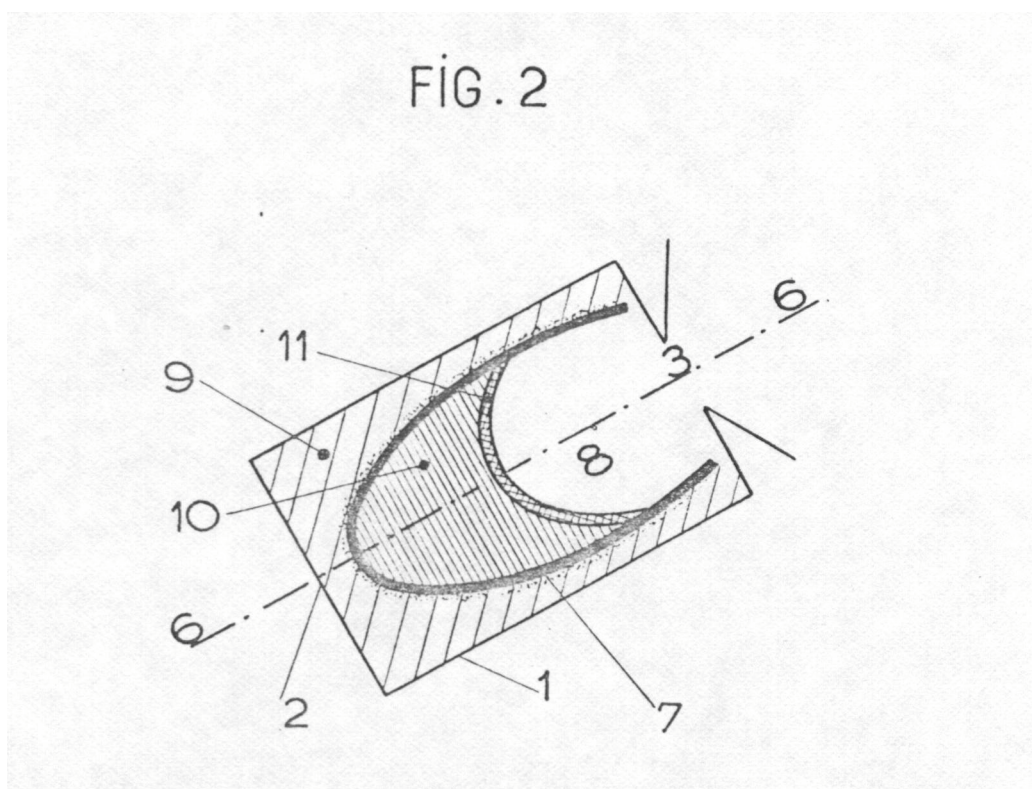


Figure 27: Fusion métallurgique en four tournant sous flux de fusion ([13] ftr_22)

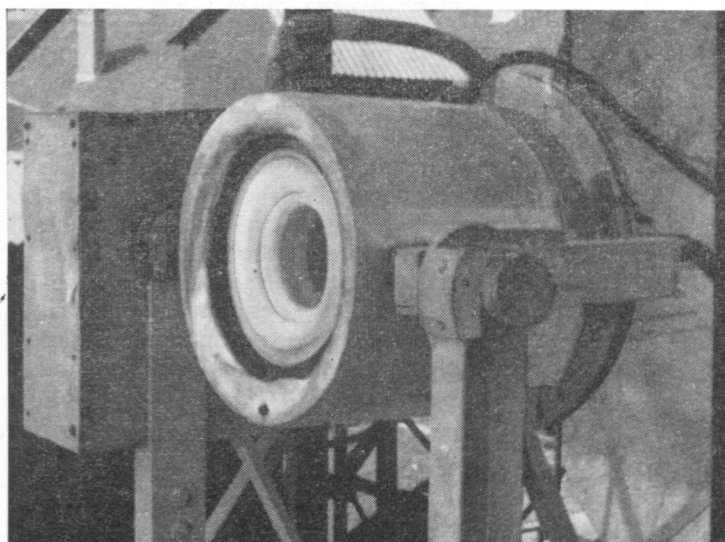


Fig. 4. — Photographie d'un four centrifuge à axe inclinable

Figure 28: ([14] ftr_15)

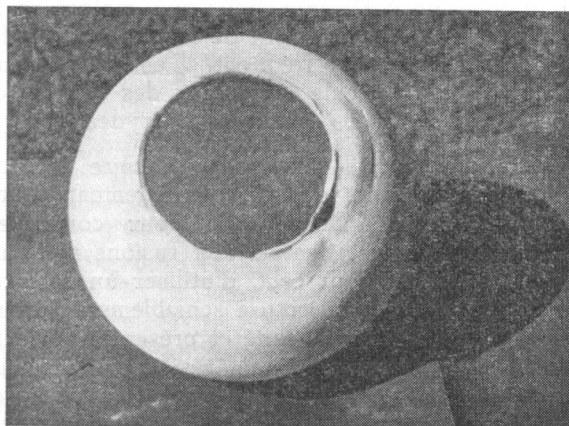


Fig. 5. — Photographie d'un creuset d'alumine de 3 litres.

Figure 29: ([14] ftr_16)

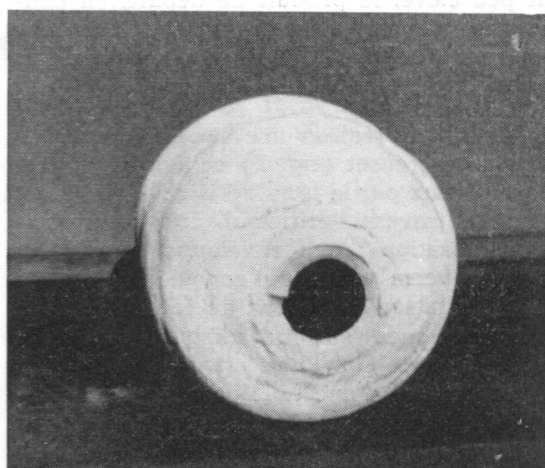


Fig. 6. — Photographie d'un creuset d'alumine de 16 litres

Figure 30: ([14] ftr_17)

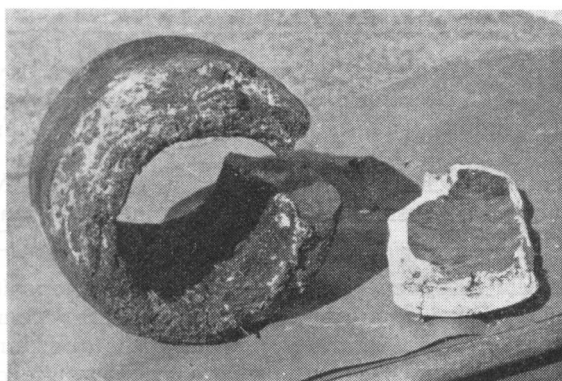


Fig. 7. — Anneau d'acier fondu solidifié dans le four centrifuge et fragment du « creuset » de corindon qui a servi de support à sa fusion.

Figure 31: ([14] ftr_18)

La préoccupation de Henri MOISSAN : « Le problème à résoudre était théoriquement très simple ; il consistait à placer dans une cavité aussi petite que possible... » (p. 2 *in* « Le four électrique » [1][3]) devient celle de Félix TROMBE : « Le problème essentiel qu'il convient de résoudre pour traiter une substance à haute température par concentration de rayonnement,... », « la cavité », « l'enceinte isotherme ou corps noir » viennent apporter la solution au problème et la similitude des démarches et des représentations (des modèles) est frappante et intéressante à observer : la figure 4 du brevet de 1948 [6] de TROMBE et la figure 1 de l'ouvrage [1] de MOISSAN décrivent le modèle à l'identique avec évidemment deux sources de chaleur différentes. Dans les deux cas il est fait appel à un creuset. La filiation est évidente et complète : le concept de cavité est fonctionnellement indispensable à la réalisation des objectifs poursuivis aussi bien par MOISSAN que par TROMBE.

Maintenant observons que le creuset de la figure 4 du brevet de 1948 [6] a disparu des autres figures 1 à 6 de la même planche. Voilà la nouveauté, l'originalité, le nouveau concept : c'est l'autocreuset. Le creuset est maintenant constitué par la substance à fondre elle-même. Les essais méthodiques de fusions de réfractaires avec « le premier poste de chauffage solaire » à Meudon de 1946 à 1948, ont appris à Félix TROMBE, Marc FOËX et Charlotte HENRI LA BLANCHETAIS deux réalités expérimentales importantes qu'ils ont de suite intégrées dans leur méthodologie : d'une part la difficulté de fondre par concentration de rayonnement solaire certaines substances peu absorbantes, et, d'autre part, l'autocavitation, à la fusion sous concentration de rayonnement, de certains oxydes en poudre, dont l'alumine qui devient corps noir brusquement au passage à l'état liquide. D'où la nécessité des traitements en cavité, d'une part, et, l'autocreuset, d'autre part : un pas est franchi, la chimie des hautes températures se trouve maintenant libérée du creuset. Il y a filiation fonctionnelle et « culturelle », mais en même temps un nouveau concept d'outil est né, l'autocreuset, qui permet la réalisation de traitements à haute température sans contamination par le creuset support utilisé jusque là. L'autocreuset et la sole réfrigérée (Figure 32: [27] platine_ref)

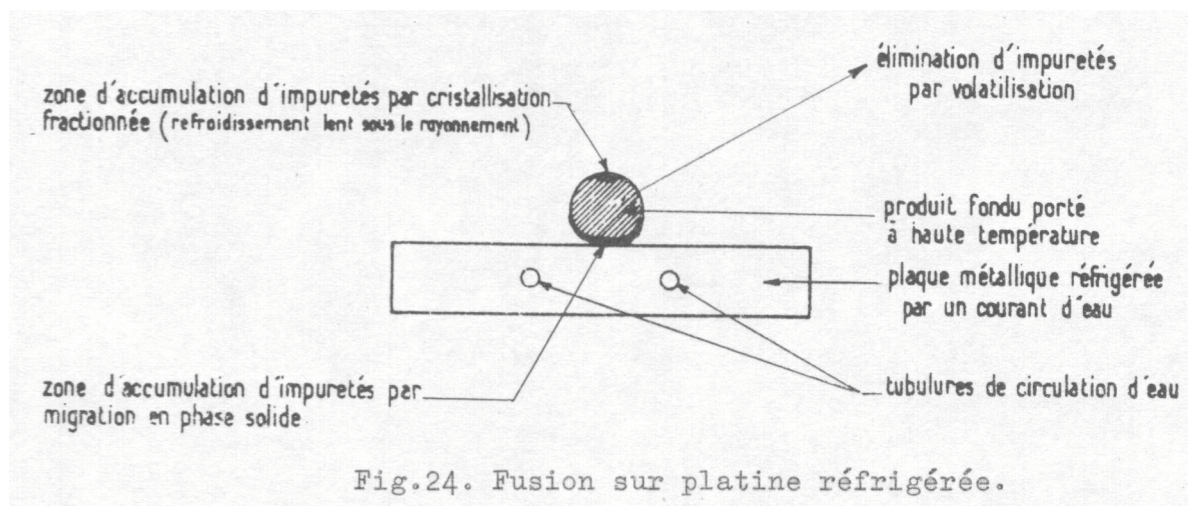


Figure 32: ([27] platine_ref)

seront pour la fusion par concentration de rayonnement (solaire, entre autres) les outils de choix dans des nombreux domaines de la synthèse de céramiques et de la métallurgie et dont nous allons examiner les prolongements avec les fours à plasma (l'autocreuset est aujourd'hui utilisé aussi dans les techniques de chauffage par induction Haute Fréquence, CEA, Marcoule, par exemple).

Il y a donc filiation et originalité. La filiation, entre le four à cavité à concentration de rayonnement solaire de Félix TROMBE et le four électrique de Henri MOISSAN, réside dans le concept de fusion en cavité : les illustrations des modèles sont saisissantes. Une originalité est apportée par Félix TROMBE , avec le concept nouveau d'autocreuset.

La figure 33 résume assez bien, nous semble-t-il, à la fois la filiation et l'originalité.

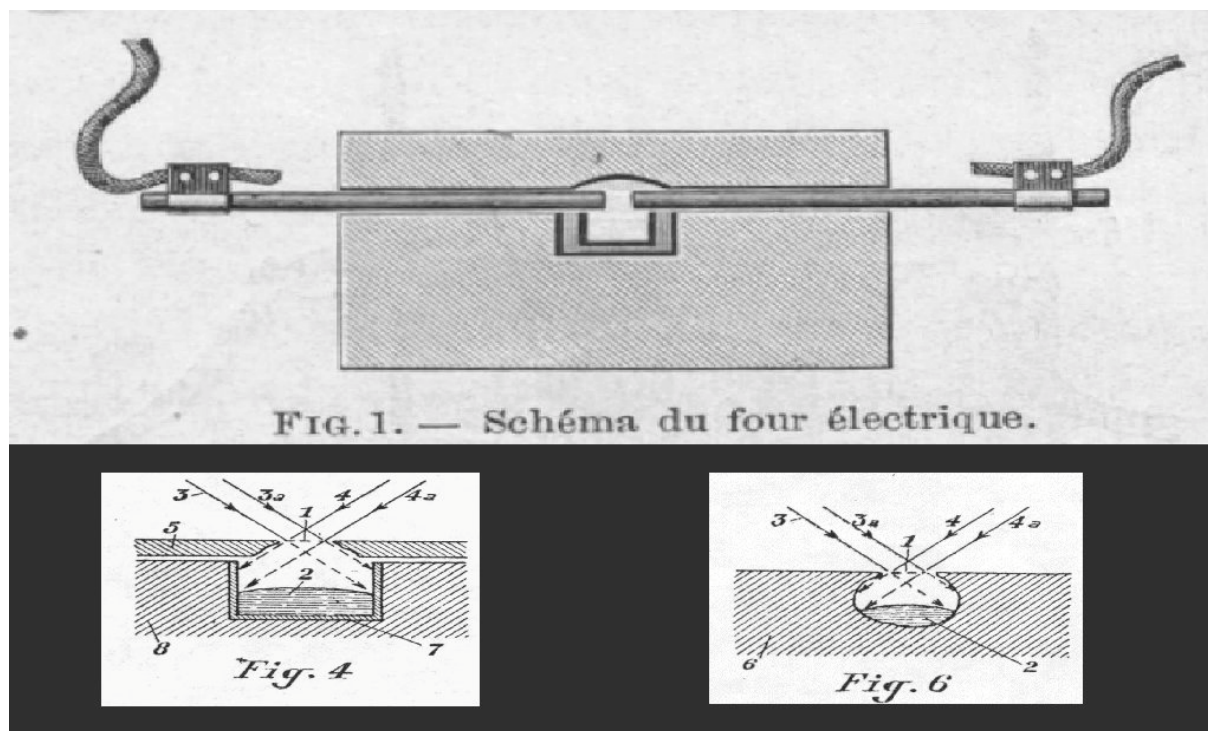


Figure 33 : « Le four électrique » de Henri MOISSAN (1897) [1] et « chauffage par accumulation de l'énergie fournie par un rayonnement » de Félix TROMBE (1948) [6] ([1] [6] hm_ftr)

En fait les similitudes sont loin de se limiter à cela : j'ai attiré votre attention sur le « modèle » qu'a constitué l'ouvrage « Le four électrique » [1] de Henri MOISSAN pour les traités et les travaux ultérieurs de hautes températures : il est particulièrement intéressant de comparer le chapitre « fours solaires » du traité « Les hautes températures et leurs utilisations en chimie » de P. LEBEAU [7] T.I (1950) à l'ouvrage de Henri MOISSAN ; mais aussi, ce qui est frappant, c'est la recherche active par Henri MOISSAN des collaborations pour le développement de son nouveau four, le souci de développement industriel : on trouve chez Félix TROMBE les mêmes préoccupations tout au long de son activité « four solaire » de Meudon à Odeillo.

Filiation et originalité : la même remarque que j'ai faite pour Henri MOISSAN, vaut pour Félix TROMBE ; il n'a pas découvert le chauffage par concentration de rayonnement solaire, mais Félix TROMBE a inventé le four solaire comme outil de la chimie aux hautes températures.

Examinons maintenant les prolongements, la filiation du four tournant à plasma à partir du four à concentration de rayonnement.