

Épilogue..... 62

Figure 47 : ([52] [53] vulcano_2, C.JEGOU, CEA Cadarache).....	62
Figure 48 : ([78] massit_5, H.MASSIT, CEA Cadarache).....	63
Figure 49 : ([74] massit_3, H.MASSIT, CEA Cadarache).....	63
Figure 50 : ([79] diapo_4 , C. GIROLD, CEA Marcoule)	64
Figure 51 :Réacteur à plasma triphasé ; Vue d'ensemble (IMP-Odeillo, photo F.FABRY, [54][55][56]).....	65
Figure 52 : Réacteur à plasma triphasé ; Vue intérieure : l'arc triphasé. (IMP-Odeillo, photo F.FABRY, [54][55][56]).....	65
Figure 53 : dépôt en phase gazeuse, dispositif 2 kW. (cras_1, [28] M. Ducarroi)	67
Figure 54 : pyrocarbone déposé en phase gazeuse au four solaire de 2 kW. (cras_2, [28] M. Ducarroi).....	67
Figure 55 :dépôt en phase gazeuse - dispositif 2 kW, foyer inversé.	67
Figure 56 : (ftr_35 [27])	68
Figure 57 : (four_asp [26]).....	68
Figure 58 : élaboration de nanomatériaux oxydes au four solaire.....	69
Figure 59 : dispositif pyrométrique à corps noir en graphite.....	69
Figure 60 : ([7], ftr_37, F.Trombe)	70
Figure 61 : dispositif de synthèse de fullerènes au four solaire de 2 kW. 70	
Figure 62 : MEDIASE appliquée à la synthèse de fullerènes au four solaire de 1000 kW.	71
Figure 63 : synthèse de fullerènes au four solaire de 1000 kW avec MEDIASE.	72
Figure 64 : (spher_1 [38])	73
Figure 65 : (spher_2 [38])	73
Figure 66 : (platine_2, [27], F.Trombe).....	74
Figure 67 : four centrifuge étanche sous atmosphère contrôlée pour la fusion du bore.....	75
Figure 68 : creuset en bore et cylindre coulé.(bore_1, [43])	75
Figure 69 : creusets en bore obtenus au four solaire de 1000 kW après coulée. (bore_2, [43]).....	76

Figure 70 : enceinte à atmosphère contrôlée pour four à bore (hublot verre silice)	76
Figure 71 : enceinte à atmosphère contrôlée pour four à bore (bore_5 [43]) (bore_4 [43])	76
Figure 72 : (ch_sab_1 [44][50])	77
Figure 73 : (ch_sab_2 [44][50])	77
Figure 74 : (ch_sab_3 [44][50])	77
Figure 75 : four solaire de 6 kW et MESOX(mesox_2 [59] à [66] M.BALAT CNRS-IMP-Odeillo)	78
Figure 76 : MEDIASE, four de 1 MW (CNRS-IMP-Odeillo)	78
Figure 77 : MEDIASE au foyer du four de 1 MW	79
Figure 78 : spectroradiométrie avec MEDIASE au foyer du four de 1000 kW	79
Figure 79 : Starprobe ([70] à [73])	80
Figure 80 : mission de Starprobe (mediase_2 [70] à [73])	81
Figure 81 : (ramses [RG-IAS/98-03 (CETP-IAS)])	81
Figure 82 : Four solaire de 1000 kW CNRS-IMP-Odeillo ; champ d'héliostats	82
Figure 83 : Four solaire de 1000 kW	82

Épilogue.

La version la plus récente (1997) du four centrifuge à arc transféré entre torches à plasma (JITH, SFT_98) [52][53] (fig. 47) va vous être présentée par l'un de ses auteurs dans le cadre du programme VULCANO du CEA. Le four centrifuge à plasma d'arc transféré entre torches est utilisé ici pour la simulation de la fusion et de l'écoulement des matériaux du cœur de réacteur nucléaire en cas d'accident majeur avec perte de refroidissement.

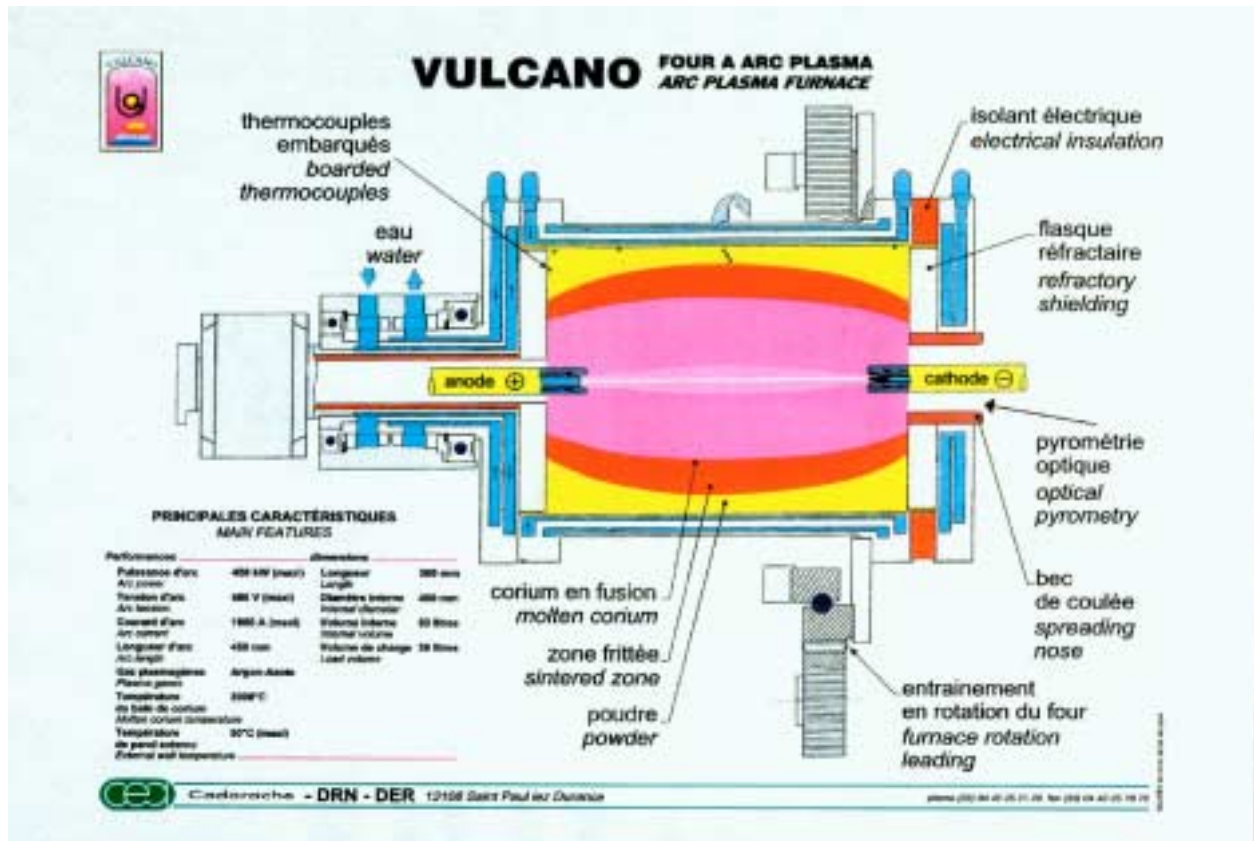


Figure 47 : ([52] [53] vulcano_2, C.JEGOU, CEA Cadarache)

D'autres techniques de fours électriques sont également développées au CEA. L'arc transféré entre plasma d'oxygène et charge liquide à haute température étudiée par C. GIROLD [79] (fig. 50) à Marcoule. Le chauffage par torche à plasma dans une cavité tournante à axe vertical et coulée intermittente est développé à Cadarache par H. MASSIT et al.[78] (fig. 48) sur la base d'un procédé venant des USA (PLASMARC®, Retech Inc.). La même équipe de Cadarache en collaboration avec EDF (Saint Denis) a construit et testé un « four à arc rayonnant à plasma d'air » nucléarisé, très proche du modèle de Henri MOISSAN : c'est

certainement, actuellement le four dont la capacité et les caractéristiques sont les plus proches (100 V, 400A) (fig. 49) [74].

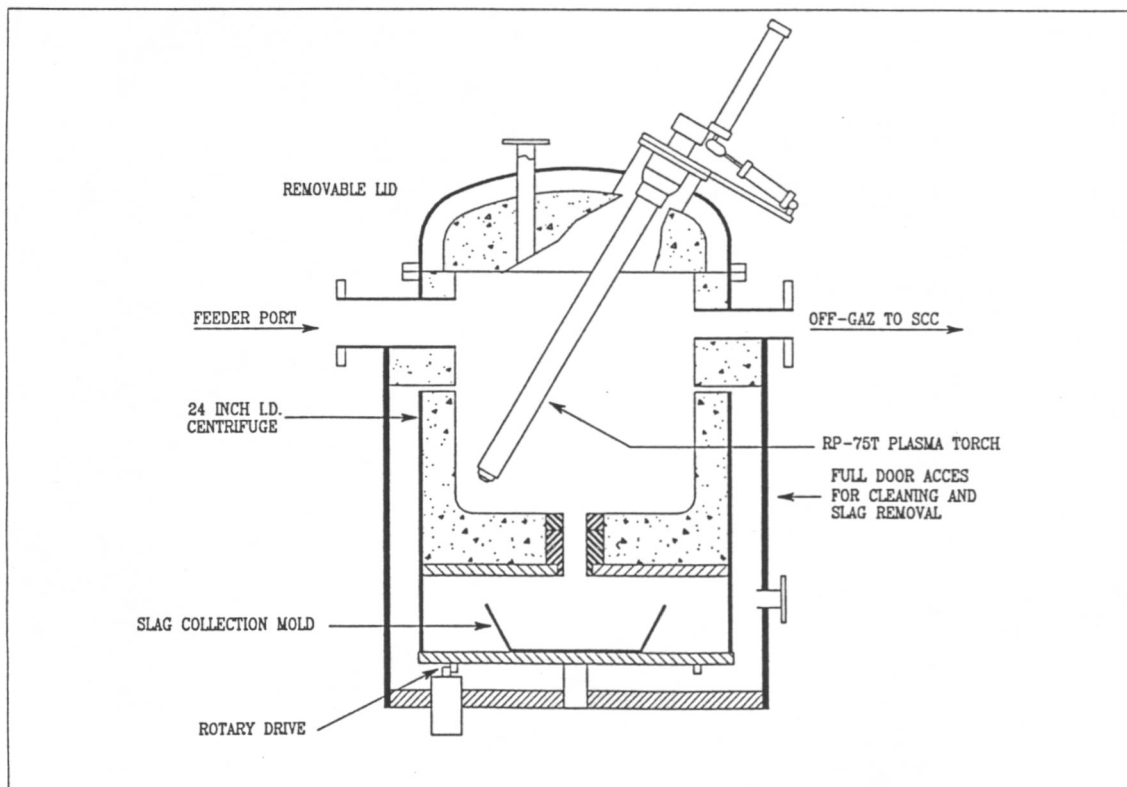


Fig. 2 : PCF2 furnace cross section

Figure 48 : ([78] massit_5, H.MASSIT, CEA Cadarache)

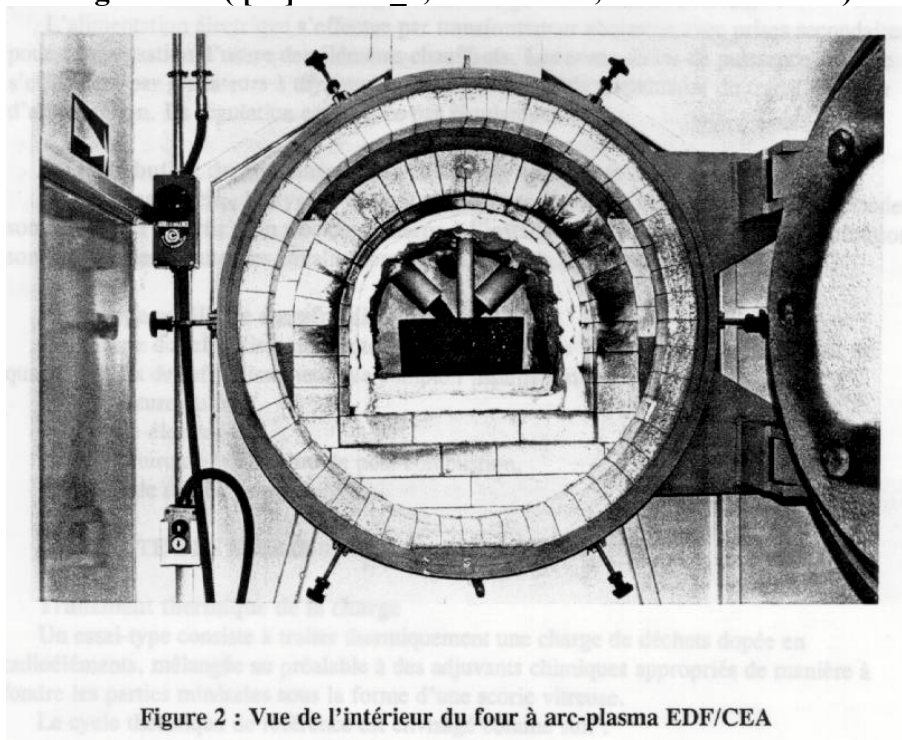


Figure 2 : Vue de l'intérieur du four à arc-plasma EDF/CEA

Figure 49 : ([74] massit_3, H.MASSIT, CEA Cadarache)

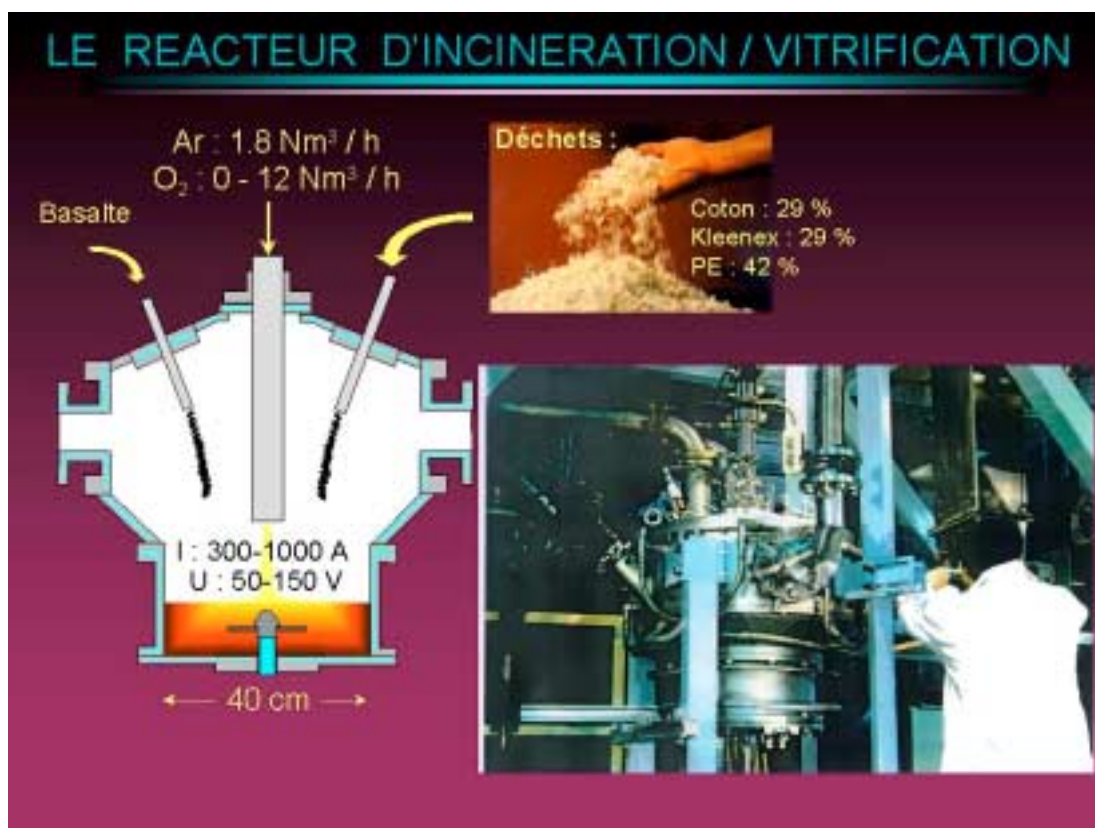


Figure 50 : ([79] diapo_4 , C. GIROLD, CEA Marcoule)

Tous ces travaux sont effectués dans le cadre de l'étude et du développement des procédés de traitement des déchets, particulièrement « nucléaires » de tous types et par conséquent contenant des radioéléments dont le stockage nécessite des solutions innovantes [74][75][76][77][78] [79].

À l'IMP-CNRS-Odeillo, des travaux sur le four à plasma triphasé sont en cours pour la production de noirs de carbone [54] à [56] (fig. 51-52).



Figure 51 : Réacteur à plasma triphasé ; Vue d'ensemble (IMP-Odeillo, photo F.FABRY, [54][55][56])



Figure 52 : Réacteur à plasma triphasé ; Vue intérieure : l'arc triphasé. (IMP-Odeillo, photo F.FABRY, [54][55][56])

Maintenant, avant la présentation par Claude JÉGOU du four à plasma VULCANO du CEA, remarquons que certains travaux passés ou actuels, réalisés à Odeillo (four solaire ou four à plasma) ont été juste mentionnés, en contrepoint, pour y revenir maintenant, un peu plus en détail, afin de souligner les rapprochements qui sont effectivement parfois frappants ; ces rapprochements contribuent s'il en est encore besoin, à confirmer la filiation avec les travaux de MOISSAN à l'origine. Les indications ont porté sur : la granulation à haute température, la fusion du bore, la chaudière à sable, les nanomatériaux d'oxyde, le graphite pyrolytique, les fullerènes, les nanotubes de graphite, les noirs de carbone. Sur ce dernier point, on vient de citer les travaux en cours à l'IMP- Odeillo à l'aide d'un four à plasma triphasé ([54] à [56], fig. 51-62). Un domaine d'élection du four solaire n'a pas été encore mentionné, c'est celui de la simulation d'environnements radiatifs extrêmes.

Nous nous limiterons à ces quelques points qui me semblent pertinents pour illustrer mon propos ; pour des compléments on se référera à la bibliographie [15] [32] [33] [39] [40][41][42][43][47].

Si la réception en cavité, le four tournant à concentration de rayonnement solaire et l'autocreuset ont été des concepts déterminants pour l'exploitation de cette nouvelle source de hautes températures, il faut aussi rappeler un concept identifié et promu par Félix TROMBE : c'est celui de « front chaud solaire », qui recouvre des spécificités telles que la localisation des apports énergétiques et le chauffage de matériaux conducteurs ou non de l'électricité (par opposition au procédé Van Arkel classique) : Michel DUCARROIR a certainement apporté une des illustrations les plus spectaculaires de cette technique du « front chaud solaire » avec ses travaux sur les dépôts chimiques en phase gazeuse (CVD) pour la production de pyrocarbone au four solaire [28][30] (fig. 53-55).

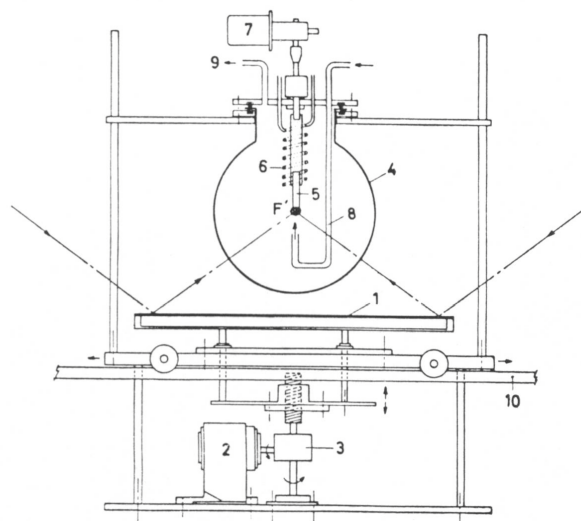


Fig. 1.

Figure 53 : dépôt en phase gazeuse, dispositif 2 kW. (cras_1, [28] M. Ducarroir)

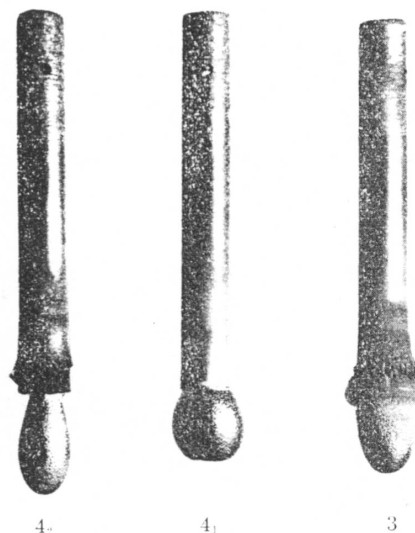


Fig. 2.

Figure 54 : pyrocarbone déposé en phase gazeuse au four solaire de 2 kW. (cras_2, [28] M. Ducarroir)



Figure 55 :dépôt en phase gazeuse - dispositif 2 kW, foyer inversé. ([28] M. Ducarroir)

On retrouve ici certaines préoccupations de Henri MOISSAN sur le graphite, et une allusion de A.DAMIENS et A.MORETTE , cités plus haut, portant sur les possibilités ouvertes par Henri MOISSAN dans ce « domaine des réactions en phase gazeuse ».

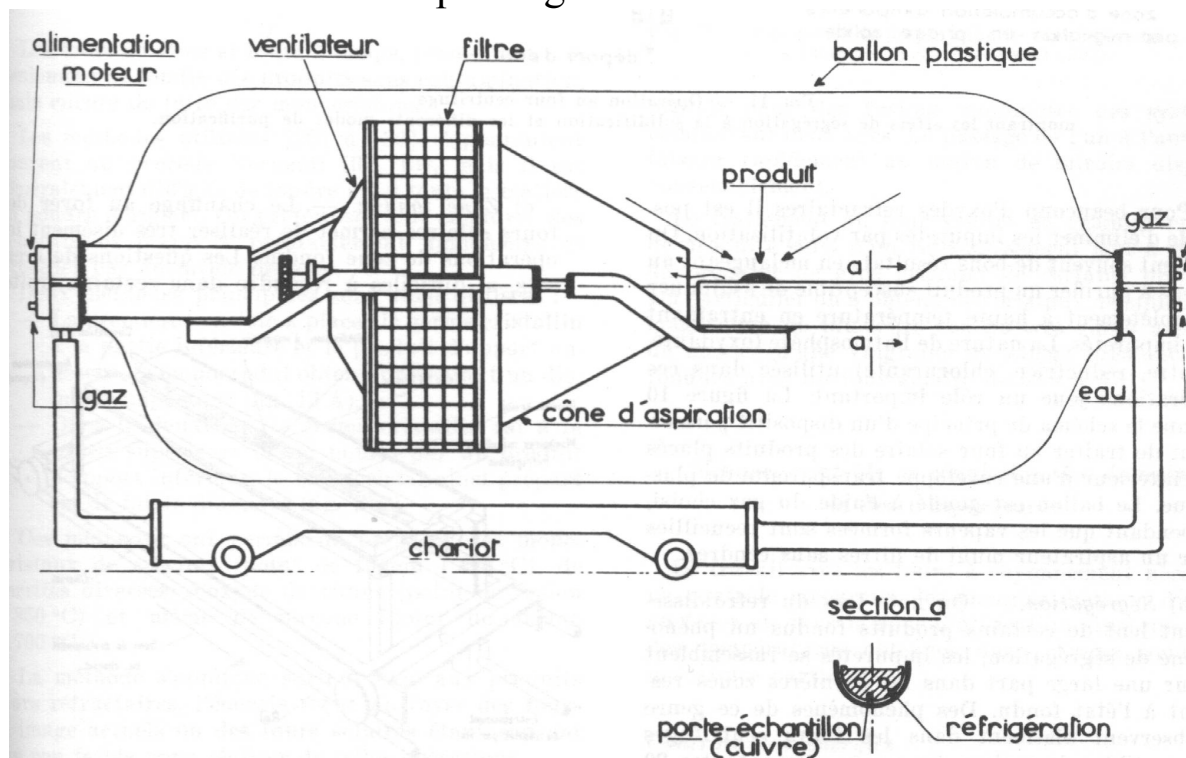


FIG. 10. — Traitements de produits en atmosphère conditionnée sous ballon de plastique transparent avec un aspirateur filtre captant les vapeurs formées.

Figure 56 : (ftr_35 [27])

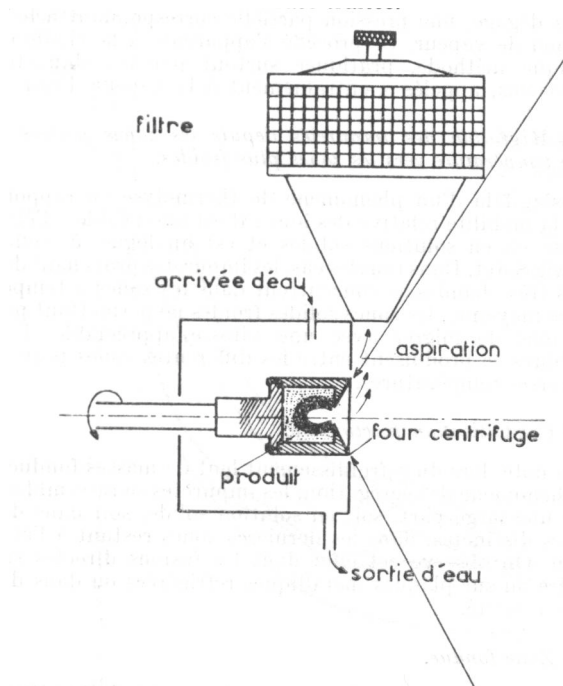


Fig. 15. — Four tournant à atmosphère conditionnée avec dispositif d'aspiration des fumées.

Figure 57 : (four_asp [26])

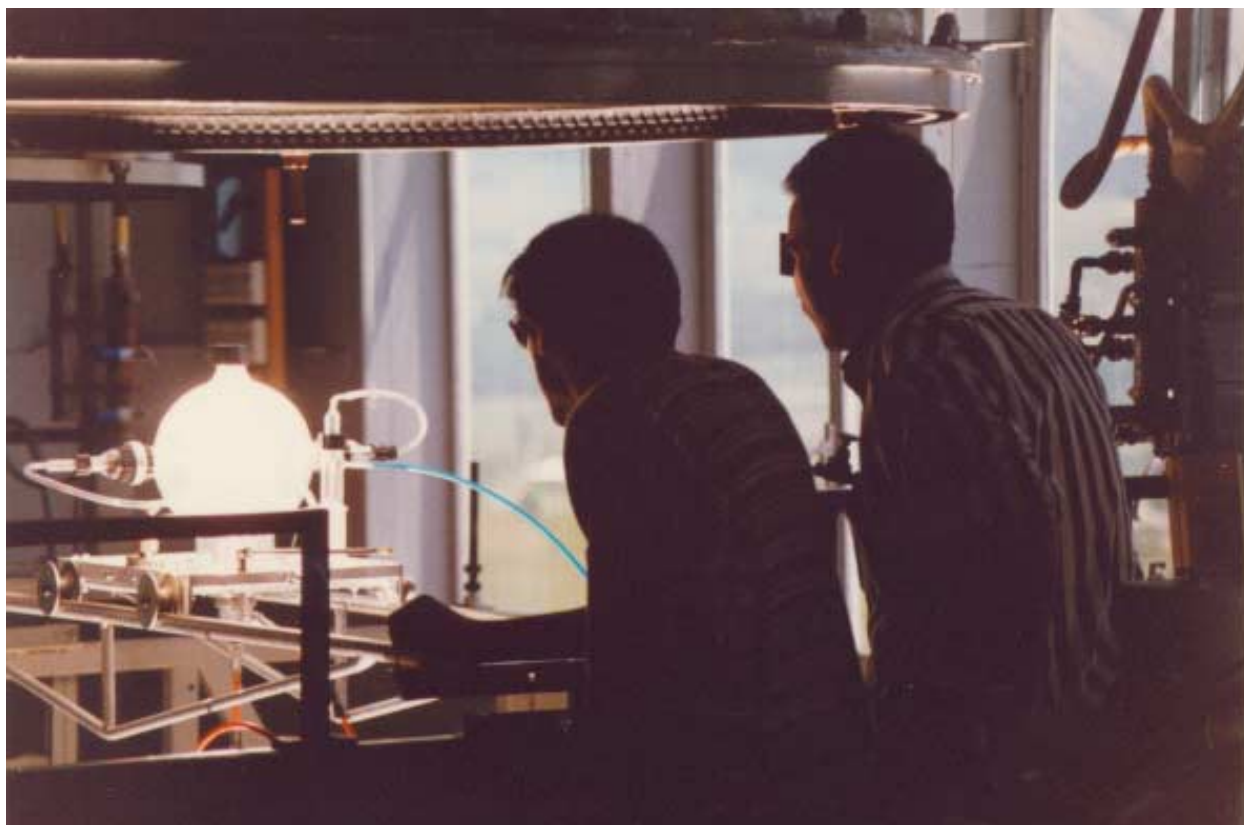


Figure 58 : élaboration de nanomatériaux oxydes au four solaire.
 ([67][68][69], chercheurs_au_soleil, C.Monty)

En voyant les expériences spectaculaires de Henri MOISSAN sur la silice on n'a pu s'empêcher de faire le rapprochement avec les travaux de TROMBE et FOËX sur la purification des oxydes (fig. 56-57), et avec ceux, en cours à l'IMP à Odeillo, aujourd'hui, sur l'élaboration de nanomatériaux oxydes [67][68][69] (fig. 58): les approches expérimentales de haute température sont très semblables, seuls ont changé les objectifs et les moyens de diagnostics et d'investigation appliqués au matériau obtenu.

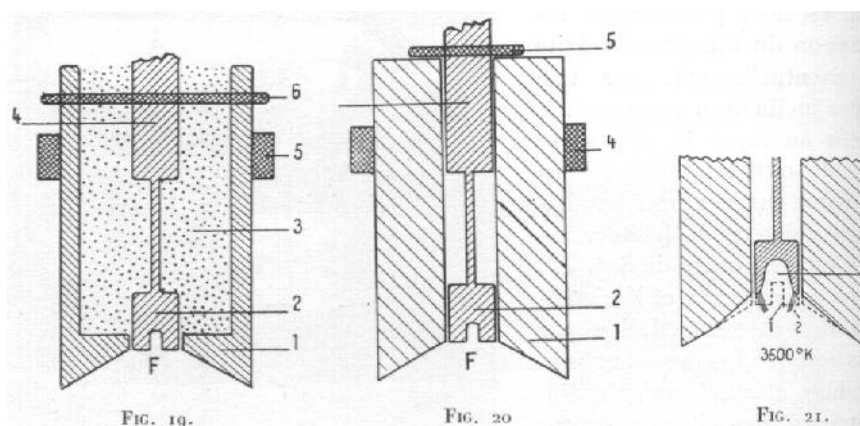


Figure 59 : dispositif pyrométrique à corps noir en graphite.
 ([7], ftr_36, F.Trombe)

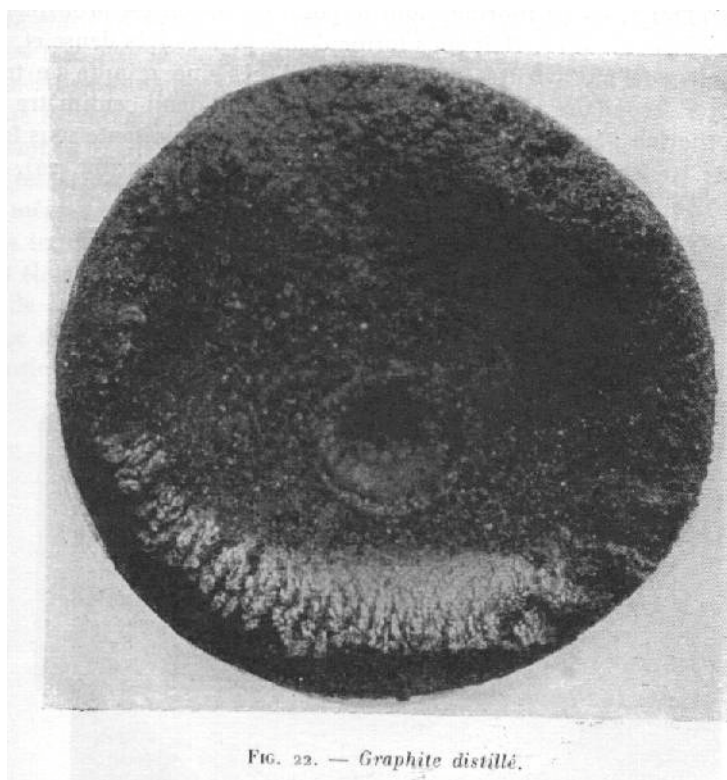


Figure 60 : ([7], ftr_37, F.Trombe)

Lorsque Henri MOISSAN observait « l'intérieur du tube se remplir rapidement d'un feutrage noir très léger » pendant son « étude de la vapeur de carbone » on pense évidemment aux houppes de fibres de graphite condensées sur le barreau de graphite, observées par Félix TROMBE à Meudon au foyer de son premier four solaire [7] (T.I, p. 187-188) (fig. 59-60), et aujourd'hui, aux

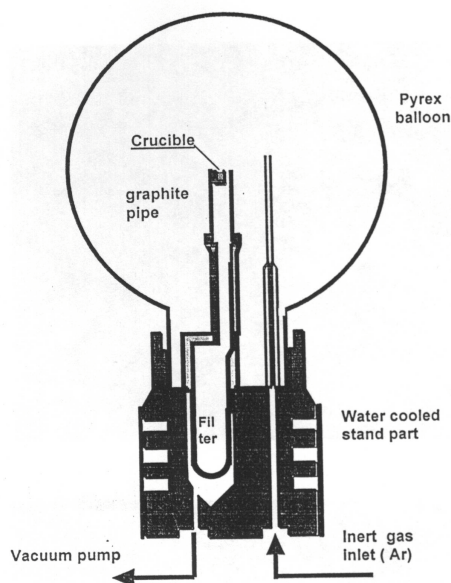
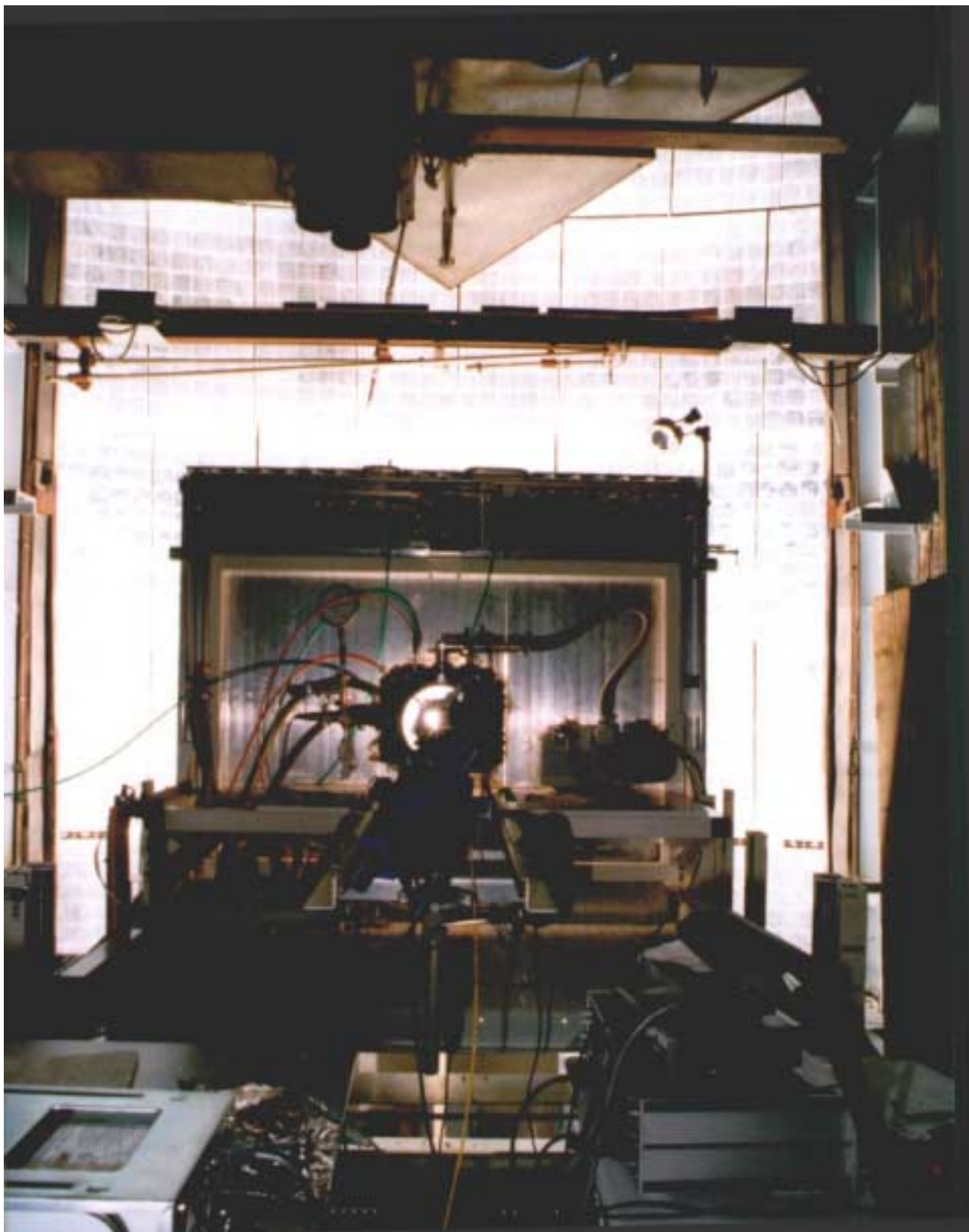


Figure 61 : dispositif de synthèse de fullerènes au four solaire de 2 kW
([67], fuller_6, D.Laplaze)

nanotubes de graphite et aux fullerènes qui sont élaborés au four solaire (2 kW et 1000 kW) [67][51][56] (fig. 61-63).



**Figure 62 : MEDIASE appliquée à la synthèse de fullerènes au four solaire de 1000 kW.
(fuller_4, CNRS-IMP, Odeillo, [67])**

« Le four électrique de Henri MOISSAN a cent ans : une filiation four à arc, four solaire, four à 71
plasma ? » par Claude Royère – CNRS-IMP – Odeillo (trav_7t.doc)



**Figure 63 : synthèse de fullerènes au four solaire de 1000 kW avec MEDIASE.
(fuller_2, CNRS-IMP, Odeillo, [67])**

Il est intéressant de noter, à propos des expériences actuelles de production de fullerènes au four solaire (CNRS-IMP, Odeillo) [51][67], que l'on se retrouve devant la question posée : quel est le moyen de hautes températures le mieux adapté : l'arc électrique ou la concentration de rayonnement solaire ? Chacun a ses propres spécificités : température maximum, fraction de rayonnement UV plus ou moins importante, et celles-ci au niveau le plus élevé pour l'arc électrique ne conduisent pas forcément au meilleur résultat. Ceci est d'autant plus intéressant, dans le contexte de notre propos d'aujourd'hui, qu'il s'agit, dans ce cas précis, de l'arc électrique « rayonnant », précisément dans la configuration de celui du four électrique de Henri MOISSAN : lui-même découvrait la vaporisation du graphite et le « feutre noir » condensé dans son tube laboratoire, tout simplement, peut-on dire ; Félix TROMBE en 1946 à Meudon, au foyer du four solaire observait les houppes de graphite condensées à partir de la vaporisation du barreau qui lui servait de sonde de température : aujourd'hui, le même « *objet* » au sens de Marcelin BERTHELOT est toujours observé, mais avec d'autres moyens d'investigations et d'analyses, d'autres préoccupations et objectifs, dans un contexte différent, pour produire et identifier des molécules de carbone dont on ne soupçonnait même pas l'existence il y a seulement 15 ans et qui ont valu aux auteurs (Richard E. SMALLEY, Robert F. CURL, Sir Harold W. KROTO) des travaux sur leur découverte, d'être récompensés par le prix Nobel de Chimie en 1996.

De la même façon, la production de nanophases oxydes, au foyer du four solaire aujourd'hui, s'intéresse à la structure cristalline de ces particules

nanométriques, et aux propriétés particulières qui peuvent en dériver, dont on ne regardait, à l'époque des premiers essais de distillation d'oxydes au four solaire, que l'aspect purification par distillation fractionnée (appliquée d'ailleurs principalement aux oxydes de Terres Rares) [26].

N'y a-t-il pas là une leçon à tirer ? Harold W. KROTO avait des préoccupations en astrophysique et en spectroscopie ; il avait besoin d'un moyen de synthèse à haute température : Richard E. SMALLEY était spécialiste dans ce domaine et avait construit un dispositif à laser pour cela ; cela aurait pu être de suite l'arc électrique ou la concentration de rayonnement solaire, auxquels ils sont venus ensuite ; donc il s'agit d'être vigilant sur les spécificités de chaque moyen de haute température et de bien connaître les préoccupations du moment ; aussi, il semble qu'il soit intéressant de re-visiter certains travaux passés avec un œil neuf et avec les moyens d'analyse et d'observation d'aujourd'hui. Henri MOISSAN rappelait très justement le mot de Marcelin BERTHELOT : « *La chimie crée l'objet de son étude* » : on pourrait ajouter, il faut s'y reprendre à plusieurs fois et à plusieurs pour observer chaque *objet*.

En relisant les « expériences faites en grenillant du métal fondu » dans « Le four électrique » de Henri MOISSAN on ne peut s'empêcher de penser au procédé de granulation et sphéroïdisation des oxydes réfractaires mis au point au four solaire en 1972 [38] (fig. 64-65) pour l'élaboration de compositions céramiques granulées à base de bauxite destinées à l'industrie des isolateurs en électrotechnique. Ce procédé a trouvé également pendant un temps une application pour la fabrication de gels au pentoxyde de vanadium (fabrication de dorsales semi-conductrices antipoussières de films photographiques) [43].

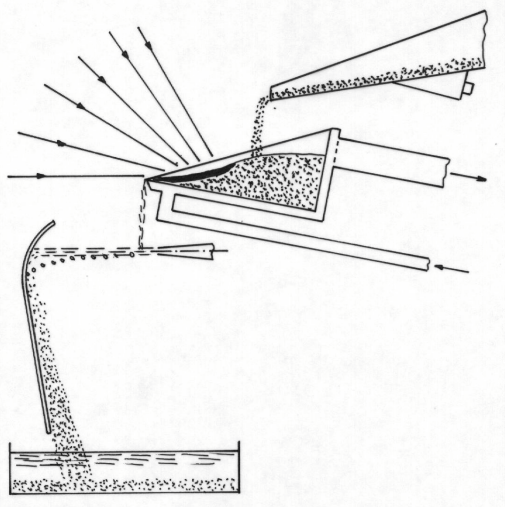


Figure 64 : (spher_1 [38])

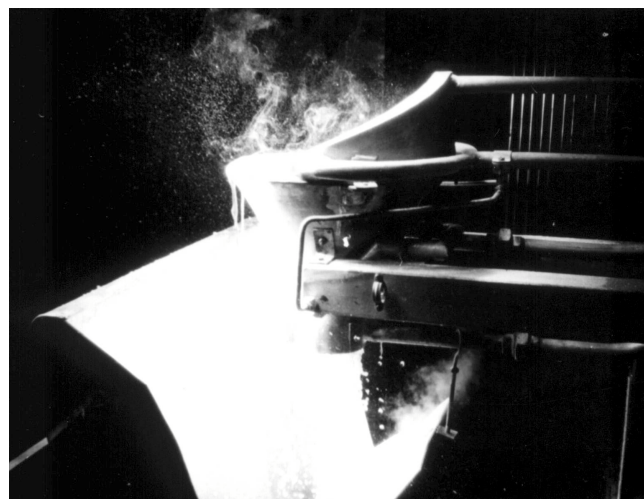


Figure 65 : (spher_2 [38])

« Le four électrique de Henri MOISSAN a cent ans : une filiation four à arc, four solaire, four à 73 plasma ? » par Claude Royère – CNRS-IMP – Odeillo (trav_7t.doc)

Lorsque Henri MOISSAN nous explique les difficultés qu'il rencontre pour réaliser une atmosphère contrôlée dans ses essais à haute température au « four électrique » nous ne pouvons pas omettre de mentionner le progrès réalisé avec le chauffage par concentration de rayonnement dans ce domaine : il suffit d'un simple ballon de verre transparent au rayonnement solaire (fig. 66) pour créer l'atmosphère choisie pour le traitement à haute température à effectuer ;

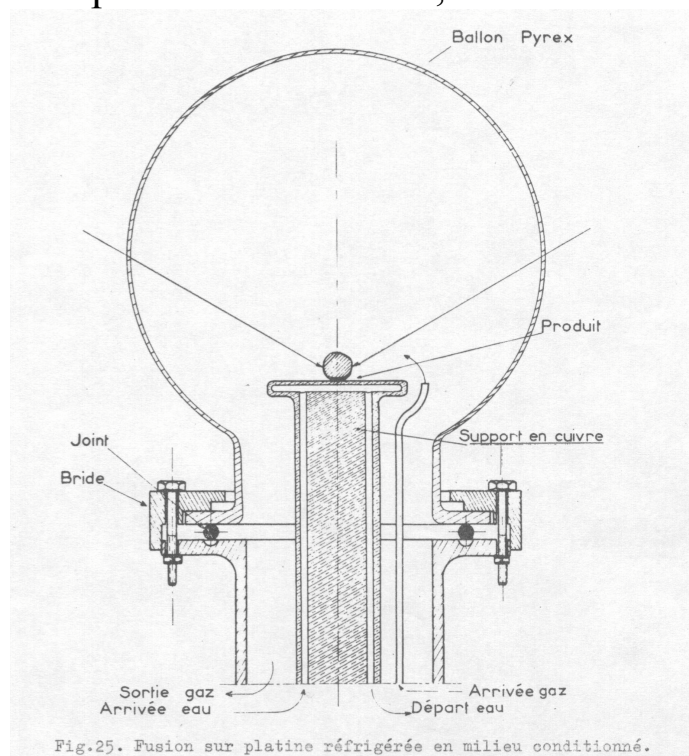
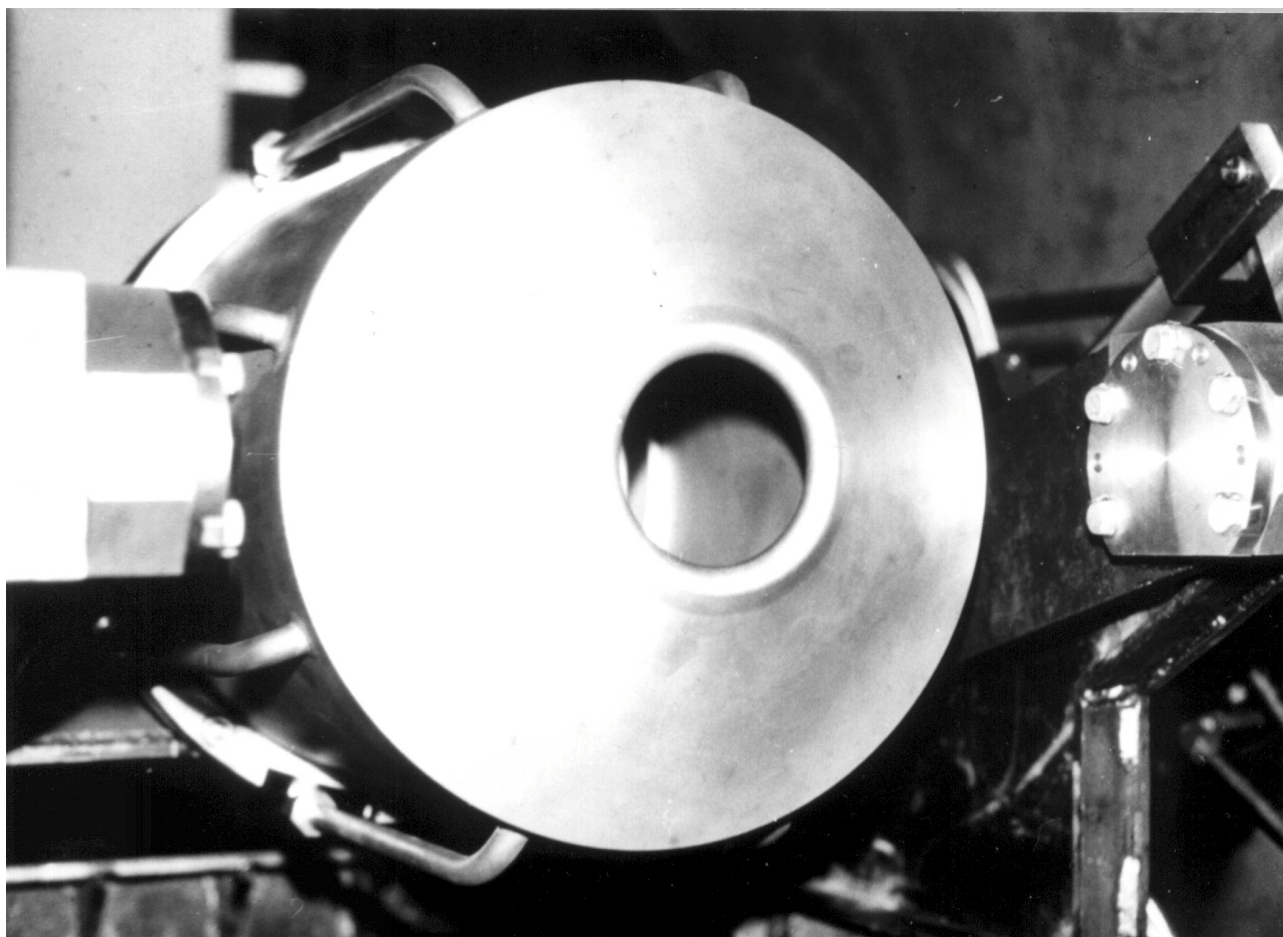


Fig.25. Fusion sur platine réfrigérée en milieu conditionné.

Figure 66 : (platine_2, [27], F.Trombe)

ce n'est d'ailleurs pas toujours si simple, lorsqu'on décide d'extrapoler le niveau de puissance : le cas de la fusion du bore au four solaire de 1000 kW est significatif, et c'est alors toute un réacteur à four tournant étanche sous atmosphère contrôlée qu'il a fallu concevoir et construire (collaboration avec le CEA-DAM, Bruyères le Chatel) [43] (fig. 67 et 70-71); à ce prix il a d'ailleurs été possible de fondre et de couler (pièces de forme cylindriques) (fig. 68-69) le bore liquide « à la pression atmosphérique » mais sous argon, à l'abri de l'air, pour éviter sa transformation en B_2O_3 très volatil. Le même dispositif a pu être utilisé pour des essais de fusion de basalte du Pacifique (sous air atmosphérique dans ce cas là): ces deux opérations ont été effectuées dans le cadre du programme nucléaire français.



**Figure 67 : four centrifuge étanche sous atmosphère contrôlée pour la fusion du bore.
(bore_3, [43])**



Figure 68 : creuset en bore et cylindre coulé.(bore_1, [43])



Figure 69 : creusets en bore obtenus au four solaire de 1000 kW après coulée. (bore_2, [43])

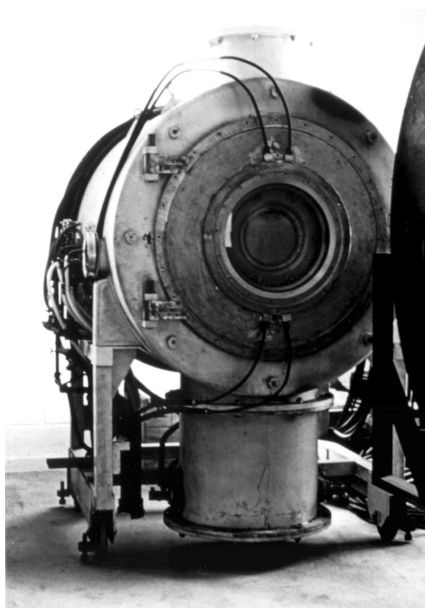


Figure 70 : enceinte à atmosphère contrôlée pour four à bore (hublot verre silice)

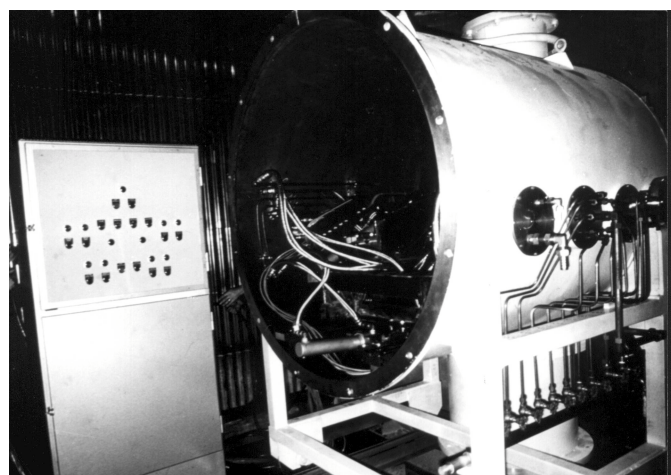


Figure 71 : enceinte à atmosphère contrôlée pour four à bore (bore_5 [43]) (bore_4 [43])

Dans ce domaine des fours rotatifs à concentration de rayonnement solaire, de grande capacité, on peut citer la réalisation expérimentale d'une « chaudière à sable » composant de réception du rayonnement dans une boucle de captation et de stockage à 1000°C [44][50] (fig. 72-74).

« Le four électrique de Henri MOISSAN a cent ans : une filiation four à arc, four solaire, four à 76 plasma ? » par Claude Royère – CNRS-IMP – Odeillo (trav_7t.doc)

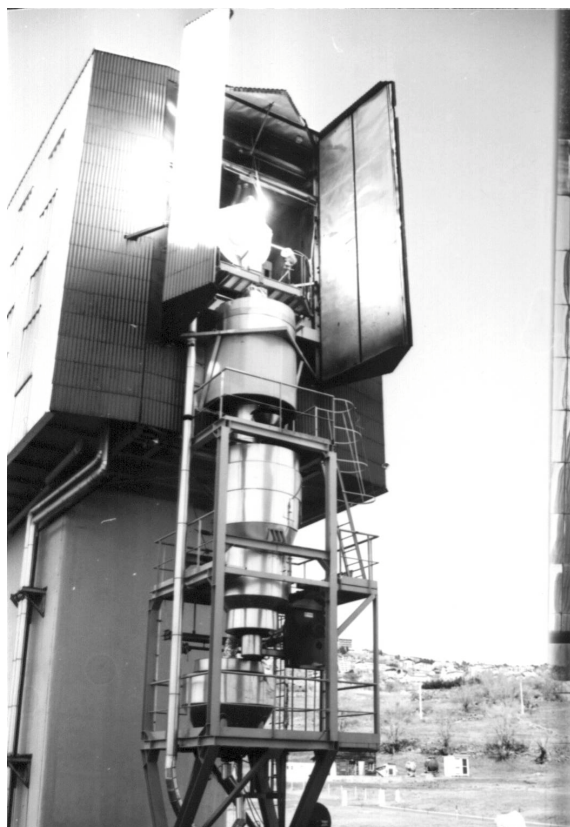


Figure 72 : (ch_sab_1 [44][50])

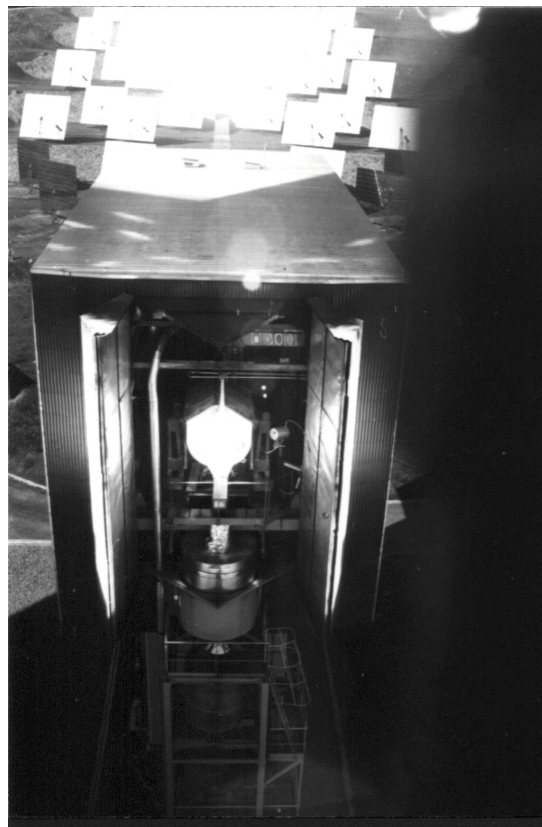


Figure 73 : (ch_sab_2 [44][50])

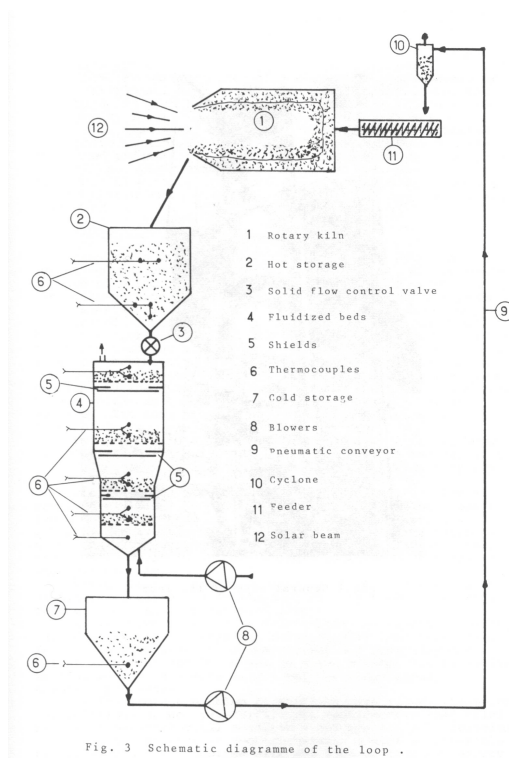


Figure 74 : (ch_sab_3 [44][50])

La réception en cavité à cette échelle a été testée dans les programmes énergétiques de conversion thermodynamique solaire des années 1974 à 1985 [42].

Un domaine d'excellence du grand four solaire a toujours été celui de la simulation des environnements radiatifs extrêmes, que ce soit pour des applications dans l'armement (caractérisation de radomes et de matériaux de fenêtres électromagnétiques, tests d'ogives de missiles, simulation du flash nucléaire sur des sols) [41] ou l'astronautique (tests de boucliers thermiques) ; actuellement deux moyens d'essais ont été développés à l'IMP particulièrement performants : MESOX, moyen d'essai solaire (four solaire de 6 kW) pour les essais de tenue à l'oxydation des matériaux pour boucliers thermiques en environnements de rentrée planétaires (Terre ou Mars) [59 à 66] (fig.75);



Figure 75 : four solaire de 6 kW et MESOX(mesox_2 [59] à [66] M.BALAT CNRS-IMP-Odeillo)



Figure 76 : MEDIASE, four de 1 MW (CNRS-IMP-Odeillo)

et MEDIASE, moyen d'essai et de diagnostic solaire (four solaire de 1000 kW) principalement orienté actuellement sur la sélection, les essais et la caractérisation de matériaux [71][72][73] (fig. 76-78) pour boucliers thermiques de protection de sondes solaires (Starprobe, FIRE, Solar-probe, Ramsès) ;



**Figure 77 : MEDIASE au foyer du four de 1 MW
CNRS-IMP-Odeillo
(mediase_1 [71][72][73])**



**Figure 78 : spectroradiométrie avec MEDIASE au foyer du four de 1000 kW
(roy_4, [70] à [73])**

ces sondes sont en projet depuis 1984 [70] et étudiées par différents laboratoires et agences spatiales (CNES, JPL, NASA, ESA) et sont destinées à explorer et à caractériser le proche environnement du soleil, à des distances de sa surface pouvant descendre à trois fois seulement son rayon (fig. 79-80) et dont on commence à comprendre certaines caractéristiques, grâce à SOHO, qui pourtant actuellement permet seulement de l'observer à des distances 30 à 40 fois plus grandes (fig. 81).

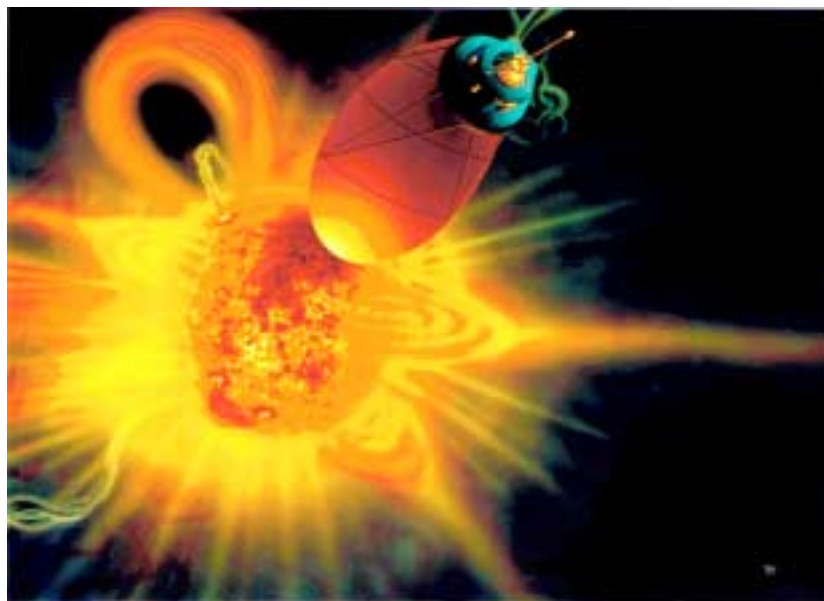


Figure 79 : Starprobe ([70] à [73])

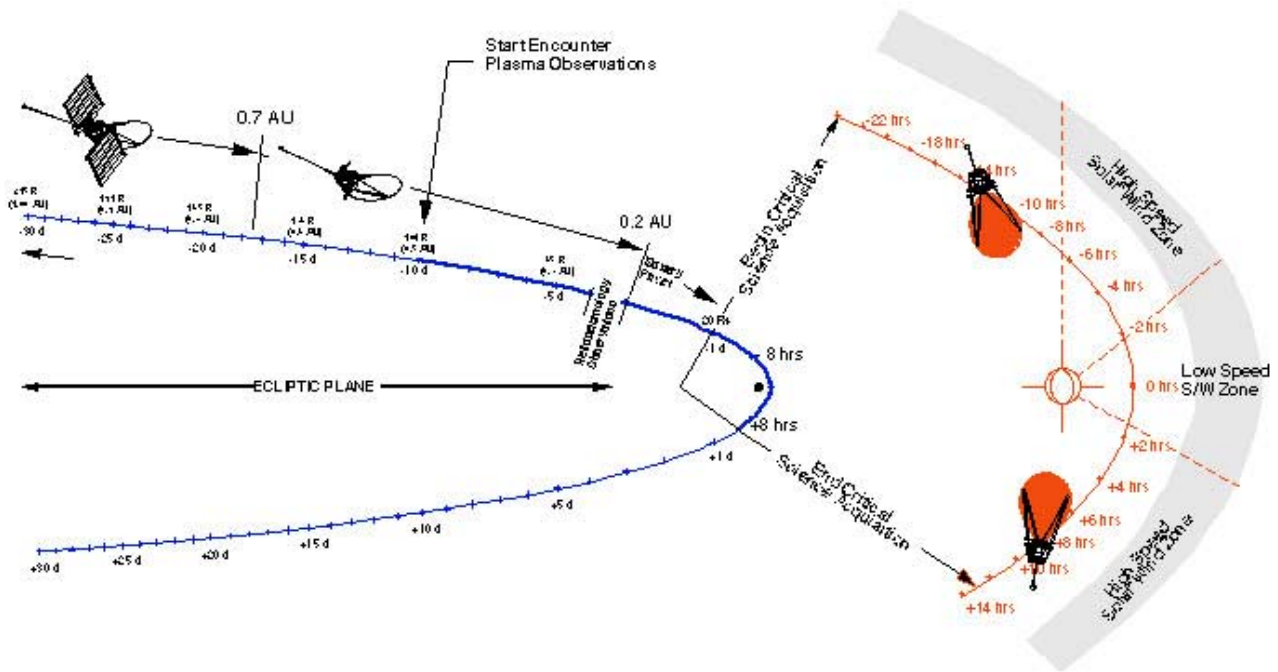


Figure 80 : mission de Starprobe (mediase_2 [70] à [73])

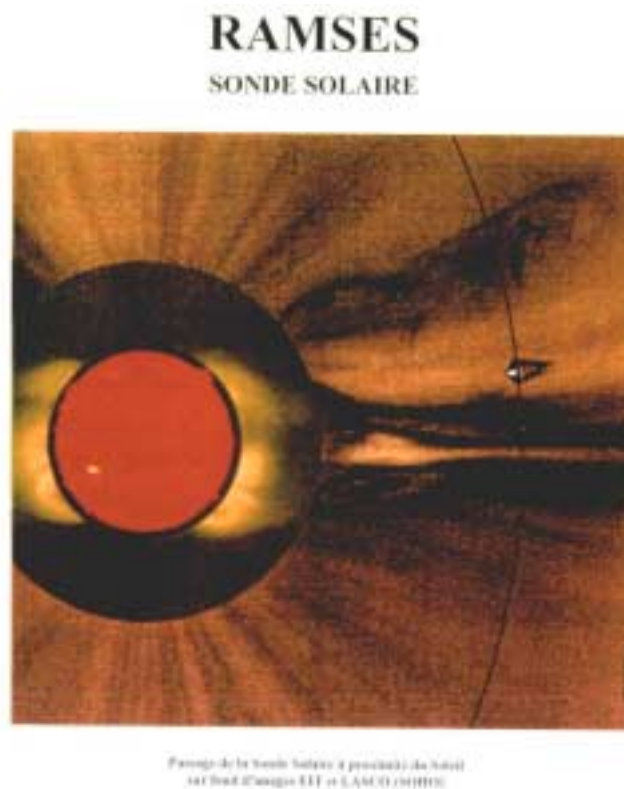
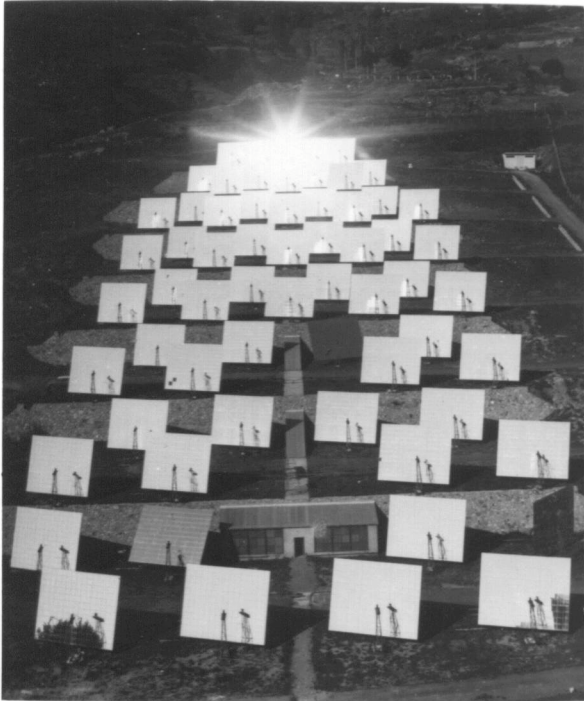
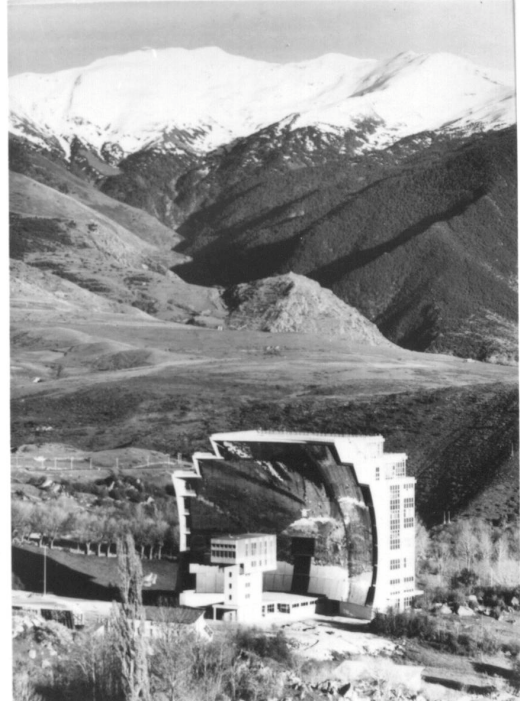


Figure 81 : (ramses [RG-IAS/98-03 (CETP-IAS)])



**Figure 82 : Four solaire de 1000 kW
CNRS-IMP-Odeillo ; champ d'héliostats**



**Figure 83 : Four solaire de 1000 kW
CNRS-IMP-Odeillo ;vue générale.**

Revenons aux concepts de base, qui m'ont guidé constamment dans l'identification de cette filiation et dont sont rappelés ici les repères chronologiques :

1897 : « le four électrique » de Henri MOISSAN ;

1948-52 : « le chauffage à haute température en cavité et le four tournant à concentration de rayonnement solaire » de Félix TROMBE ;

1962 : « le four tournant à cavité à concentration de rayonnement solaire associé au chalumeau à plasma » de Marc FOËX ;

1970 : « le four tournant (centrifuge) à deux torches plasma et arc transféré » de Marc FOËX et collaborateurs, en collaboration avec le CEA (Saclay) ;

1984 : « le four tournant (centrifuge) à deux torches plasma et arc transféré » de l'EDF (Centre des Renardières) ;

1997 : « le four tournant (centrifuge) à deux torches plasma et arc transféré » du CEA (Cadarache) – programme VULCANO.

La filiation se fait par la réception d'énergie radiative en cavité et l'originalité qui s'ajoute au concept initial est celle de l'autocreuset.

On remarquera que la filiation boucle sur la source d'énergie initiale : l'électricité ; mais on aura aussi observé que les fours solaires sont toujours concurrents comme outils de recherche dans certains domaines avec leurs propres spécificités, comme l'ont toujours démontré Félix TROMBE et Marc FOËX.

La mise en perspective de ces étapes dans la réalisation de moyens d'obtention de hautes températures, dans la lignée même des travaux de MOISSAN sur « le four électrique », la mise en évidence d'une filiation sur cent ans, m'ont permis de rendre hommage à Henri MOISSAN ; c'était bien là l'objectif de cette journée à laquelle vous m'avez demandé de participer : je vous en remercie, et j'espère y avoir contribué.
