Les hautes températures

par Robert Collongues
(Professeur à l'Université Paris VI)

Les recherches sur les hautes températures ont suscité un grand élan d'enthousiasme après la seconde guerre mondiale. Les causes en étaient nombreuses : en tout premier lieu les réalisateurs devaient faire face, dans certaines industries de pointe, à des conditions thermiques qui, peu d'années auparavant, paraissaient appartenir au domaine de l'irréalisable. Ensuite les physiciens et les chimistes voyaient avec satisfaction s'étendre ainsi le domaine de leurs études. Enfin la Magie des Mots jouait son rôle habituel.

L'obtention de hautes températures n'était pourtant rien moins qu'un objectif moderne. Elle avait, en fait, toujours été l'une des préoccupations de l'Homme et les différents niveaux des températures atteintes correspondent aux différentes étapes de l'histoire de l'Humanité. L'homme préhistorique a cuit des poteries pour mettre à l'abri ses aliments et la céramique est bien le 2e plus vieux métier du monde. La conservation des récipients jusqu'à l'époque actuelle indique qu'ils avaient été cuits non sur un feu de camp mais bien dans un four au-dessus de 600 °C. Cette première transformation, celle de l'argile fut suivie de bien d'autres, à mesure que le seuil des températures atteintes augmentait. L'âge du bronze qui nécessitait des températures un peu supérieures à celle de la céramique dura deux millénaires. L'âge du fer qui lui succéda et dure encore commença il y a 30 siècles lorsque l'on sut réaliser des températures supérieures à 1 100 °C.
L'apparition précoce des hautes températures ne doit d'ailleurs pas nous surprendre : leur production, résultat de la transformation en chaleur d'autres formes d'énergie doit théoriquement s'effectuer avec un excellent rendement par suite de la nature même de la chaleur, forme désordonnée et dégradée de l'énergie.

Le point de vue du réalisateur sera sensiblement différent de celui du thermodynamicien et moins optimiste. Si des températures de plus en plus élevées

ont fait leur apparition dans les diverses techniques industrielles, il a fallu élaborer parallèlement toute une série de matériaux propres à supporter ces températures. C'est ainsi qu'est née la famille des matériaux réfractaires. En fait, dans la plupart des industries mettant en jeu des hautes températures, *le manque de matériaux convenables a été le principal facteur limitant les progrès.* Dans bien des cas, il est plus facile de calculer avec précision la physicochimie d'installations importantes que de prévoir avec la moindre certitude si ces installations pourront être construites avec des matériaux existants. Il ne saurait donc être question de séparer l'étude des matériaux réfractaires de celle des méthodes de production des hautes températures. Le chimiste doit s'intéresser à l'une et à l'autre. Tout au plus, peut-il considérer que l'amélioration des méthodes de mesure des hautes températures appartient en propre au domaine du physicien.
Nous n'envisagerons nullement une étude des méthodes de production des hautes températures. Nous évoquerons seulement quelques-unes d'entre elles qui nous paraissent originales (trop originales disent certains) et quelques-unes des questions se rattachant actuellement au domaine des hautes températures.

A quoi servent les hautes températures ? Peut-être est-il possible de schématiser la réponse à cette question :
à simuler des phénomènes naturels se produisant à haute température ;
à produire d'autres formes d'énergie (transformation inverse de celle vue précédemment qui s'effectuera donc avec un médiocre rendement) ;
à préparer, transformer des corps et les tester en vue d'applications.
C'est évidemment par ce dernier domaine que le chimiste sera particulièrement intéressé. Mais quel que soit le but poursuivi, on peut semble-t-il résumer les objectifs essentiels des spécialistes de hautes températures :
1. produire des températures plus élevées ;
2. produire ces hautes températures pour les utiliser dans des conditions très variées ;
3. produire des hautes températures « propres » ;
4. produire des hautes températures aussi économiques que possible.

I. Produire des températures plus élevées

Nous ne nous attarderons pas sur ce premier objectif. Il est atteint depuis longtemps et dans ce domaine, nous sommes presque trop riches. Les simples fours à résistance assurent 3 000 °C en atmosphère réductrice ou neutre et dans un volume important ; les flammes et les fours à concentration de rayonnement, les fours à arc atteignent 4 000 °C, les fours à bombardement électronique et à induction peuvent les dépasser. Quant aux fours à plasma, ils permettraient, si nécessaire, d'effectuer des opérations à plus de 10 000 °C. Sans parler bien entendu des réalisations assurant des élévations de température transitoires ou difficilement contrôlables tels que les tubes à onde de choc et les explosions nucléaires.

En fait, cette course au record serait passablement dénuée d'intérêt si elle ne s'accompagnait de l'étude de l'état de la matière aux températures atteintes, par exemple dans des jets de plasma. Les espèces moléculaires sont dissociées et de nouvelles liaisons peuvent se produire lorsque les composants quittent le plasma. Des molécules stables seulement à très haute température peuvent être obtenues par figeage rapide.

II. Produire de très hautes températures réellement utilisables dans des conditions variées

Du point de vue pratique le deuxième objectif est bien plus important.
Nous choisirons le très simple exemple des *fours à résistance*. Quelles que soient les brillantes performances obtenues par d'autres moyens de chauffage, le four à résistance présente toujours l'avantage de pouvoir maintenir une température prédéterminée pendant un temps déterminé dans une enceinte et une atmosphère choisies à l'avance. Il demeure inégalé pour la réalisation de traitements thermiques rigoureusement contrôlés.
Or si nous examinons les possibilités des fours à résistance, nous constatons un hiatus important entre les performances réalisées en atmosphère neutre ou réductrice et celles en atmosphère oxydante (il s'agit dans le tableau de températures réellement réalisables en continu).

Atmosphère neutre ou réductrice		Atmosphère oxydante	
graphite	3 200°	iridium	2 200°
tungstène	2 600°	rhodium	1 800°
molybdène	2 300°	superkanthal	1 700° ($MoSi_2$)
tantale	2 300°	platine	1 600°
		carborandum	1 600° (SiC)
		alliages divers	< 1 400°

On constate que, mis à part l'iridium métal extrêmement cher, distillant assez facilement, difficile à usiner et finalement peu utilisable, aucun élément chauffant ne permettra de dépasser 1 800° et même 1 700 °C en atmosphère oxydante.
La lacune a été partiellement comblée par l'utilisation de résistors d'oxydes. L'idée n'en était pas nouvelle puisque Nernst dès 1900 avait eu l'idée d'utiliser les oxydes réfractaires comme éléments chauffants. Mais il fallut attendre 1941 pour noter la construction d'un four de plusieurs kilowatts par Geller. Il était constitué de baguettes d'oxyde de thorium ThO_2 montées en parallèle. En fait, jusqu'à ces dernières années, aucun four de ce type ne put atteindre une longévité suffisante parce que deux défauts essentiels des oxydes réfractaires n'avaient pu être surmontés : l'instabilité du chauffage et la fragilité mécanique et thermique de la céramique d'oxyde.

L'instabilité résulte de la nature même de la conductivité de l'oxyde qui augmente très rapidement avec la température selon une loi du type :

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E}{kT}}$$

(E, énergie d'activation apparente).
La conductivité est très faible à basse température (10^{-5} à 10^{-10} ω^{-1} cm^{-1}). Ceci impose un préchauffage du résistor jusqu'à 1 200 °C environ. Puis la conductivité augmente rapidement et atteint 1 ω^{-1} cm^{-1} aux environs de 1 800 °C. La dissipation de l'énergie électrique dans l'oxyde conduit donc à un système instable qui évoluera soit vers la fusion du résistor soit vers son refroidissement. Il est aisé de montrer qu'un calcul convenable du calorifugeage et éventuellement l'adjonction d'une résistance dans le circuit permettent de réaliser l'équilibre entre la puissance fournie et la puissance rayonnée.

La fragilité mécanique de la céramique impose

l'absence de toute contrainte : le résistor devra donc être suspendu de manière à pouvoir se dilater librement. D'autre part, la nécessité de maintenir les arrivées de courant à température modérée (1 600 °C par exemple pour des contacts de platine) impose de tailler l'élément chauffant de telle manière que sa section soit nettement plus élevée au voisinage des contacts que dans la partie chaude.
La fragilité thermique impose un régime très progressif de préchauffage afin d'éviter la création de microfissures dans le résistor.

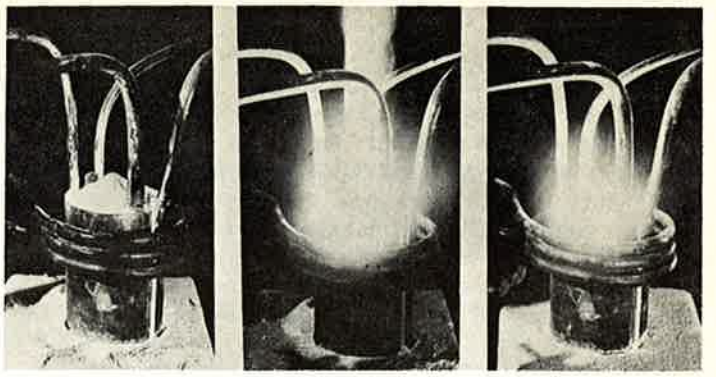
Ces difficultés ont pu être surmontées. Un four de laboratoire et un four de type industriel ont fait leur apparition en France. Dans le cas du four industriel l'élément chauffant a la forme d'une brique taillée de telle manière qu'elle soit à la fois résistor et calorifuge. Les deux fours permettent de fonctionner en atmosphère oxydante plusieurs milliers d'heures à des températures voisines de 1 800 °C et d'atteindre 2 200 °C pendant des temps plus courts.
Une autre solution permet de résoudre élégamment le problème des contacts : c'est le chauffage par induction après un préchauffage convenable. L'oxyde n'est plus alors un résistor mais un susceptor. Ce type de four a également été mis au point et construit en France.
Dans les deux cas, le principe de la méthode était connu depuis longtemps. Les solutions trouvées ne font pas appel à des matériaux rares et coûteux (résistor et susceptor sont en zircone stabilisée) mais seulement à l'ingéniosité du réalisateur et à son « sens de la céramique ».

III. Produire des hautes températures « propres »

C'est une préoccupation plus récente née des exigences de plus en plus grandes vis-à-vis des matériaux. Il est évident qu'une première condition pour la non-contamination sera l'élimination au voisinage immédiat du matériau à traiter de tout élément porté à une température supérieure (électrodes d'un arc électrique, résistor). Les méthodes types de chauffage non-polluant seront : la dissipation d'énergie au sein même du matériau à traiter (chauffage par induction), la concentration de rayonnement sur la substance (chauffage par concentration de rayonnement).

III.1. Chauffage par induction

Il est connu depuis fort longtemps pour les métaux : le métal à traiter constitue simplement le secondaire d'un transformateur. Nous n'insisterons pas sur ces réalisations entrées depuis longtemps dans la pratique industrielle. Mais, si les métaux sont des conducteurs, les oxydes réfractaires sont, à la température ordinaire, des isolants donc imperméables à la circulation des courants induits. Nous retrouvons ici pour la fusion des oxydes la difficulté à laquelle nous nous étions heurtés pour la réalisation d'un four à élément chauffant d'oxyde : la nécessité du préchauffage. Celui-ci a pu être réalisé d'une manière originale. Les oxydes à point de fusion élevé sont des composés de formation fortement exothermique et dérivent généralement d'un métal électropositif (MgO, CaO, Al_2O_3, Y_2O_3, ZrO_2, ThO_2...). Il suffit donc d'incorporer à l'oxyde à fondre des copeaux du métal correspondant à l'oxyde : par exemple du zirconium pour la fusion de la zircone. Le métal est chauffé par induction dès la température ordinaire. Il brûle à l'air. Sa combustion, exothermique, élève la température de l'oxyde dont la résistivité s'abaisse; le chauffage par induction de l'oxyde commence alors et se poursuit jusqu'à la fusion.



La fusion de la zircone à 2 700 °C en autocreuset; de gauche à droite :
préparation de la charge;
combustion des copeaux de zirconium;
le bain en fusion.

III.2. Chauffage par concentration de rayonnement électromagnétique

Ce mode de chauffage peut prendre des aspects très divers. Mais, dans tous les cas, il s'agit de former sur l'objet à chauffer au moyen d'un système de concentration l'image d'une source de brillance élevée.

III.2.*a*. Le four à image

C'est le modèle le plus général. La source peut être une surface portée à très haute température ou le cratère d'un arc électrique. Dans le meilleur cas, on obtiendra une grande stabilité et une durée de fonctionnement élevée en utilisant une lampe à arc court dans le xénon par exemple sous une pression d'une trentaine d'atmosphères. Le système optique de concentration est constitué de lentilles ou de miroirs : par exemple un miroir elliptique dont la source occupe l'un des foyers et l'objet à chauffer l'autre foyer; 2 miroirs elliptiques conjugués; 2 miroirs paraboliques placés face à face.
Les avantages de ce système sont multiples :
mode de chauffage applicable à tout matériau quelles que soient ses caractéristiques électriques (contrairement au chauffage par induction);
propreté absolue : aucun corps chaud au voisinage du matériau à chauffer;
possibilité de travail en atmosphère absolument quelconque : réductrice, neutre, oxydante, vide, milieux très réactifs (chlore);
possibilité de réaliser des cycles thermiques très particuliers;
possibilité de réaliser des mesures sans perturbation par un champ extérieur, électrique par exemple;
accès très facile au foyer.

Le four à image sera par exemple l'instrument idéal :
lorsque les puretés extrêmes sont visées (alumine purifiée par fusion de zone à moins de 10 ppm pour chaque impureté);
lorsque un déplacement de la zone fondue est nécessaire (élaboration de monocristaux par zone flottante);
lorsque des gradients thermiques importants sont souhaités (élaboration d'eutectiques orientés).

Incomparable instrument de laboratoire, le four à image souffre de plusieurs inconvénients :
faible surface chauffée à haute température, le plus souvent aire voisine de celle de la source;
flux non uniforme sur l'image;

chauffage unidirectionnel;
et surtout mauvais rendement par suite du faible rapport entre l'angle solide d'utilisation et l'angle solide d'émission du rayonnement. Ce dernier inconvénient constituera probablement un obstacle majeur à l'intervention du four à image dans l'industrie.
Sur le schéma général du four à image, on doit considérer deux cas particuliers importants :

III.2.*b*. Utilisation du rayonnement laser

Découvert en 1960, le laser a suscité dès son apparition l'intérêt des spécialistes des hautes températures. Par suite de ses propriétés de cohérence, la puissance du rayonnement peut être concentrée, grâce à des systèmes optiques classiques dans des volumes extrêmement réduits. Des propriétés de cohérence spatiale et temporelle, il est aisé de déduire que pour une lentille sphérique d'ouverture voisine de l'unité, le diamètre de la tache focale est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, soit du micron pour le visible et le proche infrarouge. La puissance concentrée est formidable : pour une plaque d'acier présentant un coefficient d'absorption de 10 % seulement, la concentration sur un cercle de 10 μ de diamètre d'un faisceau laser de 100 watts provoque une élévation de température de 4 000°.
Selon la nature du matériau subissant l'inversion de population, on distingue : les lasers à solide, à gaz ou à liquide, les deux premiers étant les plus importants.

Les lasers à solide sont de différents types :
laser à impulsion utilisant un flash comme source de pompage;
laser déclenché utilisant également un flash mais dans lequel la cavité est munie d'un dispositif de contrôle du pouvoir réflecteur de l'un des miroirs, de sorte que l'on peut amorcer l'oscillation au moment où l'inversion de population est maximale;
laser continu où la source de pompage est une lampe haute pression. Le matériau solide est alors un cristal de YAG (grenat d'aluminium et d'yttrium $Y_3Al_5O_{12}$).

Les lasers à gaz moléculaire (mélange CO_2, N_2, H_2) sont capables de fournir des puissances continues importantes avec des rendements excellents dans l'infrarouge. La puissance est de l'ordre de 1 kW pour un laser de 10 m. Ce sont probablement les techniques laser d'avenir pour les appareillages de puissance.
Bien entendu les avantages du four à image se retrouvent pour la concentration du rayonnement laser. Ces appareils ont surtout été utilisés à ce jour pour le micro-usinage et la micro-soudure.

III.2.*c*. Le four solaire

C'est un autre cas particulier et peut-être le seul type de four à concentration de rayonnement lumineux promis à un avenir industriel généralisé pas trop éloigné.
Rappelons que la France dispose à Odeillo d'un très grand four solaire de 1 000 kW. Il comporte 63 miroirs orienteurs chacun ayant une surface de 45 m² tandis que la surface du paraboloïde constitué de 9 600 glaces est de 2 000 m².
La densité énergétique au centre de la tache focale est supérieure de 300 $cal.cm^{-2}.s^{-1}$, ce qui correspond à une température de corps noir de 3 500 °C.
Les discussions sur l'avenir des fours solaires n'ont jamais cessé. Avant tout la confusion s'est faite dans beaucoup d'esprits entre le four d'Odeillo, organisme de recherche, alourdi des sujétions propres à la fonction et à la formation universitaires et un prototype à usage industriel. Tout calcul de prix de revient du kWh doit prendre en compte seulement l'amortissement du four proprement dit et de ses périphériques directs. On peut actuellement l'évaluer ainsi :

Tache focale (diamètre)	Puissance correspondante	Température de la cible à l'équilibre	Prix du kWh
10 cm	150 kW	3 600 °C	8,00 F
30 cm	530 kW	3 460 °C	3,60 F
60 cm	1 000 kW	2 000 °C	1,00 F

Il apparaît clairement que le prix du kWh est une donnée peu significative. Le prix acceptable par un industriel qui n'envisage que des opérations de routine à 2 000 °C n'est pas le même que le prix qui serait accepté pour des opérations dans des conditions extrêmes que seul le four solaire pourrait réaliser.
D'autre part l'ensoleillement de la zone d'Odeillo très élevé pour la France (fonctionnement effectif 1 000 h/an) est finalement assez médiocre. Dans une zone plus favorable (2 500 h/an) avec un four simple et robuste, conçu uniquement pour chauffer, il est permis de penser que le prix du kWh pourrait être abaissé aux environs de 0,25 F.

III.2.*d*. Le four à électrons

Il peut être considéré comme un four à concentration de rayonnement et il diffère essentiellement des précédents par le fait que la focalisation y est magnétique et non plus optique. 3 dates jalonnent l'histoire du four à électrons :
1905 : principe de la fusion des métaux par bombardement électronique.
1924 : premier brevet sur le fonctionnement d'un four.
1956 : début du développement des fours modernes.
On peut être surpris par cette lenteur. En fait la difficulté résidait non dans le domaine des techniques haute température proprement dites mais bien :
dans le domaine de la technique du vide élevé;
dans celui du traitement du faisceau d'électrons et, en ce sens le four à électrons a très largement bénéficié des progrès de la microscopie électronique.
Actuellement tout l'effort porte sur l'augmentation de puissance. Alors qu'en 1957, les fours ne dépassaient pas 20 kW, les puissances visées et parfois atteintes actuellement sont de l'ordre de 10 MW. En 15 ans la puissance des fours a été multipliée par un facteur 500 et probablement supérieur.

IV. Produire des hautes températures économiques

Nous pénétrons ici dans un domaine qui n'est pas le nôtre. Les opinions définitives y sont reines, les jugements sans appel et les condamnations de deux sortes :

Inutile : « Nous n'avons aucun problème à traiter à T °C » (bien sûr, puisqu'il n'existe pas de moyen de chauffage à cette température). « Donc nous n'avons pas besoin de four à T °C ». C'est le cercle vicieux caractérisé : pas de four, pas de problème; pas de problème, pas besoin de four.
Rappelons, au passage, que Superkanthal a conquis un énorme marché en gagnant une centaine de degrés sur les fours concurrents.

Trop cher: Quelques condamnés célèbres : le four à induction (faible rendement), le four à électrons, le four

solaire. En ce qui concerne ce dernier, il était aisé de démontrer que, baissant de *x* % par an, le prix du kWh électrique serait en l'an 2000 de 0,005 F (éternelle confusion entre un taux de croissance ou de décroissance et le résultat d'une extrapolation à 20 ans). La « révélation » de la crise de l'énergie et de la nécessité de lutter contre la pollution dispense d'ironiser. Mais peut-on raisonnablement renoncer à une source d'énergie réellement inépuisable, même si son exploitation est actuellement difficile (fonctionnement non continu) et d'un coût élevé. Accessoirement, pourquoi bouder une belle réalisation française conduite jusqu'à son terme ? Y en a-t-il tellement ?

Il est évident, nous l'avons dit, que certaines techniques ne sortiront pas du laboratoire. Il est évident que certains chercheurs ont trop souvent sacrifié au goût de la performance et du spectaculaire. Mais il est sûr aussi qu'un générateur de hautes températures permettant d'atteindre 3 000 °C fonctionnera à 1 800 °C dans des conditions moins polluantes qu'un four s'essoufflant à 1 850 °C ; et il durera plus longtemps. Il est sûr aussi que tout progrès technique mérite d'être pris en considération parce qu'il servira un jour ou l'autre dans un domaine parfois fort éloigné de la préoccupation d'origine et qu'aucun cerveau ne peut prévoir (les progrès de l'industrie cinématographique et ceux du four à image ; les progrès de la microscopie électronique et ceux des fours à électrons, etc...).

V. Les réfractaires

Depuis l'« avènement » de la Science des matériaux (que bon nombre d'entre nous enseignait et étudiait depuis 30 ans, sous le nom, il est vrai, de Chimie de l'état solide ou Chimie appliquée de l'état solide), ce sont les Mal-aimés.
C'est que la Magie des Mots a recouvert sous le terme « Matériaux » des corps fort différents :
les uns sont utilisés et étudiés pour une propriété spécifique. Exemple : un semi-conducteur. La propriété essentielle est le modèle de bandes. Le matériau sera rarement utilisé dans des conditions chimiques, thermiques ou mécaniques difficiles. Ce sont en général des matériaux chers, produits à faible tonnage ;
les autres sont utilisés pour un ensemble de propriétés sans que l'on sache très bien laquelle est prépondérante. Exemple : un réfractaire pour voûte de four industriel. Quelle est sa caractéristique prépondérante. Sa réfractairité ? Sa résistivité thermique ? Son inertie chimique ? Sa résistance au fluage ? Ce sont des matériaux produits le plus souvent à fort tonnage.

Il est évident que les premiers ont exercé sur les chercheurs une bien plus grande séduction. D'une part parce qu'il était possible pour eux d'isoler la propriété importante et de négliger les autres en première approximation, ce qui est impossible pour un réfractaire. D'autre part, parce que le matériau est nettement plus simple.
On peut définir ainsi un cristal semi-conducteur :
cristal réel = cristal parfait + défauts ;
(défauts = lacunes, dislocations).
Pour un réfractaire, matériau le plus souvent fritté :
matériau réel = cristal parfait + défauts + joints de grains + porosités + autres phases.
Enfin, un réfractaire étant appelé à travailler à haute température peut évoluer : par exemple, il est très difficile de stabiliser les petites porosités.
Finalement, les caractéristiques demandées à un réfractaire sont si nombreuses et si souvent contradictoires que le réalisateur devra généralement se contenter d'un compromis.

Assez souvent des erreurs ont été commises dont on peut résumer les causes :
1. L'établissement d'une hiérarchie des matériaux réfractaires fondée sur la température de fusion. Ce n'est le plus souvent qu'un élément d'appréciation et non le plus important. A quoi sert un métal fondant à 3 000 °C s'il ne peut supporter à 500 °C la moindre trace d'oxygène ou s'il ne peut être mis en forme ? Certes la variation de certaines propriétés est parallèle à la variation de la température de fusion, celles en particulier dépendant de l'énergie d'activation pour la migration d'un atome. Mais ce n'est pas toujours le cas, ne serait-ce que parce que la température de fusion, température d'équilibre solide $\rightleftarrows$ liquide n'est pas caractéristique du solide, mais dépend également de la structure du liquide.
2. La mesure des propriétés à haute température est difficile. Aussi se contente-t-on souvent de mesures effectuées à température modérée. Ce n'est même pas une approximation : certains carbures possédant une extraordinaire résistance mécanique à la température ordinaire voient cette résistance s'effondrer dès 800 °C et sont alors surpassés par des matériaux beaucoup plus modestes à la température ordinaire. Et que dire du graphite qui domine encore de très loin l'industrie des hautes températures parce que sa résistance mécanique est à 2 400 °C le double de ce qu'elle était à la température ordinaire ?
3. Plus que pour tout autre matériau, il est nécessaire de prendre en compte, pour un réfractaire non seulement la composition mais aussi l'histoire et donc la microstructure et ceci dans les moindres détails. Un matériau excellent isolant thermique à basse température conservera cette propriété à haute température s'il est élaboré avec de nombreuses petites porosités. Le même matériau, comportant le même taux global de porosités et excellent isolant thermique à basse température deviendra un très bon conducteur thermique à haute température si sa microstructure comporte de grandes porosités : celles-ci en effet deviendront conductrices lorsque le rayonnement sera la principale source de transfert de chaleur.

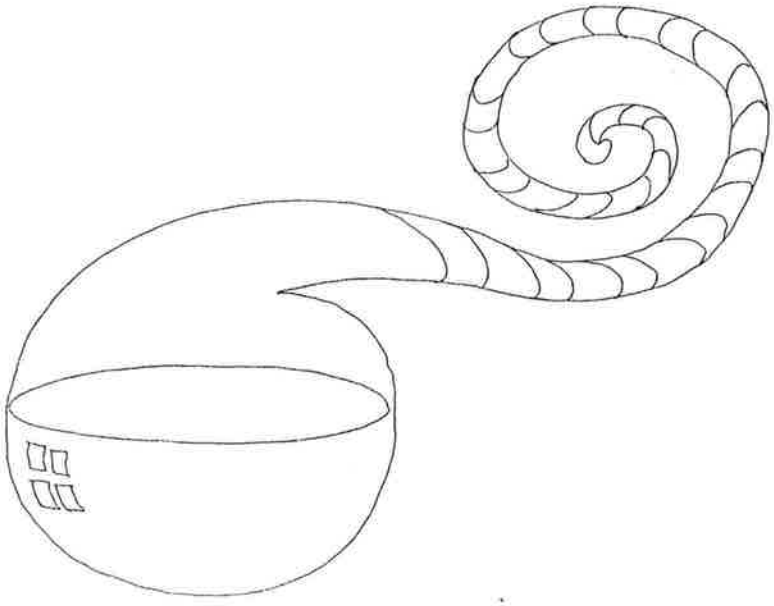
Finalement, quelle est la place de la France dans les recherches sur les hautes températures et les réfractaires ?
Elle est l'une des premières. La première répondent sans hésiter nos collègues étrangers en ce qui concerne les méthodes de production. Pourquoi ? Pour de multiples raisons ? D'abord la tradition. Toute l'histoire des méthodes de hautes températures est jalonnée de noms de savants français, Chimistes ou proches de la chimie pour la plupart. Ensuite par l'effort intelligemment consenti par plusieurs organismes (C.N.R.S., C.E.A. par exemple) pour aider certains laboratoires de moyenne importance au lieu de tenter la création d'un Institut géant. Enfin par le rôle de la Commission des Hautes Températures du C.N.R.S. où les responsables de ces laboratoires se rencontraient, apprenaient à se connaître et finalement développaient une collaboration en profondeur assez remarquable dans un pays dit individualiste.

La situation est un peu moins brillante pour les matériaux. Ceci tient surtout aux difficultés de dialogue entre les chercheurs et les réalisateurs. Un ami industriel résumait excellemment ces difficultés :
1. « Nous n'arrivons pas à reconnaître nos matériaux dans les systèmes ultra-simplifiés que vous étudiez au laboratoire ». Certes la voie scientifique

normale demeure cristal parfait → monocristal réel → polycristal → matériau fritté dense → matériau fritté poreux → matériau fritté polyphasé, mais le chemin est si long que les deux partenaires peuvent se perdre en route.

2. « Nous avons du mal à reconnaître nos préoccupations dans vos études. Certes, mesures des conductivités électrique et thermique, du coefficient de dilatation, etc... sont importantes. Mais 90 % de nos matériaux meurent par corrosion ». Belle réhabilitation de la Chimie.

Conclusion pessimiste pour le chercheur ? Bien au contraire. Conférer à un matériau banal des propriétés variées et exceptionnelles, n'est-ce pas pour lui une tâche exaltante ? Le graphite est un exemple illustre : matériau mou ou dur, isolant ou conducteur, réactif ou inerte presque à volonté. Peut-être dans un prochain article pourrons-nous parler du très simple oxyde d'aluminium Al_2O_3 et de ses dérivés, véritable matériau-protée, lui aussi : réfractaire ; isolant électrique (isolateurs à hautes performances) et super conducteur ionique (alumine β) ; abrasif ; matériau de bijouterie ; matériau de base du laser ; catalyseur ou support de catalyseur ; matériau d'avenir de la chirurgie osseuse ; bien entendu matériau de base pour la préparation de l'aluminium et du nitrure d'aluminium, etc...

Nous pensons que le domaine des Méthodes et des Matériaux de Hautes Températures est bien une terre d'élection pour le chercheur. A condition, bien entendu, qu'il soit un vrai chercheur. C'est-à-dire doué d'imagination.

CORNUES DE ZAÜ