Industrie

Propriétés chimiques des carbones et des graphites. Résistance à la corrosion dans différents milieux. Applications *

par J.-M. Bauer et J. Maire (Le Carbone - Lorraine, Division Recherches appliquées)



J.-M. Bauer



J. Maire

Introduction

Le carbone est un matériau réfractaire qui conserve ses propriétés physiques jusqu'à des températures supérieures à 3000 °C en atmosphère neutre ou réductrice. Le terme général de carbone est utilisé pour toute une série de corps formés de l'élément carbone présentant des structures et des textures très différentes. Les propriétés chimiques des carbones sont fonction de leur nature.

La structure du graphite est bien connue. Le graphite est formé d'empilements ordonnés de couches d'atomes de carbone arrangés suivant un réseau bidimensionnel compact. La liaison carbone-carbone dans la couche est très forte tandis que la liaison entre couches est très faible. Tous les carbones sont formés d'empilements bidimensionnels non ordonnés.

On distinguera les carbones non graphitables obtenus par carbonisation de matières organiques riches en oxygène ou pauvres en hydrogène, des carbones graphitables obtenus par carbonisation de matières organiques riches en hydrogène ou pauvres en

* Communication présentée au Colloque Cefracor 77, Lyon, 3-5 mai 1977. oxygène. Par traitement thermique à des températures comprises entre 1800 et 3000 °C, les carbones graphitables sont transformés progressivement en graphite, c'est-à-dire que l'empilement non ordonné des couches s'ordonne progressivement pour atteindre asymptotiquement la structure du graphite.

Par ailleurs, on distinguera les classes de carbone et de graphite suivant leur forme : noirs, cokes, fibres, pyrocarbones, ces derniers étant obtenus par craquage d'hydrocarbures en phase gazeuse.

Le carbone ne se fritte pas. On fabrique industriellement des pièces en carbone et en graphite en mélangeant des poudres (noirs, cokes, graphites) * avec une matière organique (brai, résine) qui sont ensuite comprimées ou filées, puis traitées thermiquement à 1000 ou à 3000 °C suivant que l'on veut du carbone ou du graphite. On peut également lier les poudres de carbone par dépôt chimique en phase gazeuse (procédé BB5, composites carbonecarbone). Les propriétés chimiques des différents matériaux ne sont pas simples et dépendent toujours de la structure et de la texture du produit examiné.

* Le pyrocarbone et le carbone vitreux peuvent donner directement des pièces de forme de faible épaisseur. Les propriétés du graphite parfait et du graphite industriel sont les suivantes :

Caractéristiques	Graphite parfait	Graphite industriel	
Densité	2,26	1,60 - 1,80	
Bésistivité // μΩcm	40	1.500	
Résistivité $\mu\Omega$ cm $\mu\Omega$ cm	0,1		
Coefficient //	o [']		
de dilatation 丄	28	3 à 5.10 ⁻⁶	
Conductivité	1.5		
thermique cal/cm ² . sec.	2	0,5 0,3	
Résistance à la traction	250 hb (fibres //)	1.4 à 4 hb	
La résistance à la flexion est enviro	on le double de la résistance à l	a traction.	
La résistance à la compression est e	environ le double de la résistan	ce à la flexion.	

En ce qui concerne la réactivité des carbones, on distinguera les réactions de surface des réactions d'insertion. Puis après avoir évoqué les réactions électrochimiques, on énumérera les applications industrielles du graphite en insistant sur son utilisation dans l'industrie chimique.

I. Réactions de surface

A. Réactions en phase gazeuse

A. 1. Réactions avec l'oxygène

Le graphite brûle dans l'oxygène dès 500 °C. La réaction est fortement exothermique. C'est la réaction qui limite le plus son utilisation en température. La vitesse de combustion dépend de la température, de la pression d'oxygène, de la nature du carbone et de sa pureté. Le graphite naturel purifié est le carbone qui résiste le mieux à l'oxydation. Ceci est essentiellement dû au développement important des couches de carbone et à la petite quantité d'atomes de bord qui sont bien plus réactifs que les atomes contenus dans le plan de la couche. Par ailleurs, une paillette de graphite naturel a la densité théorique du graphite (2,26) et la surface soumise à l'attaque chimique est en première approximation la surface géométrique.

Il n'en est pas de même avec la plupart des autres carbones et graphites qui sont poreux et dont les cristallites élémentaires sont très petites. Le nombre d'atomes de bord de couches est notablement plus important. La surface accessible au réactif est infiniment plus grande, la vitesse de combustion est donc considérablement augmentée, d'autant plus que les carbones et graphites imparfaits présentent de nombreux défauts qui sont des sites privilégiés d'attaque.

Enfin, certains carbones contiennent encore un nombre important d'hétéroatomes (oxygène, hydrogène) qui favorisent la combustion. On peut grossièrement estimer que les carbones commencent à brûler dès 300 °C à une vitesse d'autant plus rapide que leur texture poreuse est plus fine et qu'ils sont plus impurs.

L'oxydation du graphite se poursuit différemment suivant que l'on travaille à basse température (500-700 °C) ou à haute température (1000 °C ou plus). Dans le premier cas, l'oxygène peut diffuser dans la porosité du graphite et brûle la pièce de façon homogène si bien qu'au

bout d'un certain temps la pièce s'effondrera complètement bien que la combustion ne soit pas totale. A haute température, l'oxygène ne peut diffuser dans la porosité de la pièce car il a déjà réagi sur la surface géométrique et dans ce cas le volume de la pièce se réduira au fur et à mesure de la combustion.

La cinétique d'oxydation a été abondamment étudiée aux températures moyennes. La vitesse d'oxydation peut se mettre sous la forme :

$$V = A_0 P_{O_2}^n e^{-\frac{E}{RT}}$$
où : $n \sim 0.5$

P_{O2} est la pression de l'oxygène. A_O est un facteur qui dépend de la surface spécifique et de la texture du graphite. Pour exprimer les vitesses de combus-tion des graphites aux températures moyennes, on rapporte en général les vitesses à la surface spécifique.

E = 38 kcal/mol.

A. 2. Action des catalyseurs

L'adduction de petites quantités de certains métaux peut favoriser considérablement l'oxydation des carbones et des graphites: Ba, Cd, Na, Cu, Mn, Pb. Le cas le plus spectaculaire est celui du plomb et de l'oxyde de plomb dont un ajout de 150 ppm permet de multiplier par 450.000 la vitesse d'oxydation des graphites à 450 °C.

Inversement, la purification des graphites industriels permet de multiplier par 10 la durée de vie du produit aux températures voisines de 500 °C.

A. 3. Inhibiteurs d'oxydation

Il semble que le phosphore et dans une moindre mesure le bore sous forme oxydée, protègent le graphite contre l'oxydation. Industriellement, on imprégnera un graphite poreux de phosphate ou de borate, ce qui permet d'atteindre les températures d'utilisation industrielle de l'ordre de 600 °C.

Bien entendu, il ne faut pas que le cation

du sel soit un catalyseur d'oxydation. On utilisera donc préférentiellement l'acide phosphorique, l'anhydride borique et le phosphate de magnésium par exemple.

A. 4. Réactions avec l'air

La réaction est analogue à celle de l'oxygène mais la vitesse est plus faible et l'élévation de température moins grande.

A. 5. Réaction avec le CO₂

La réaction commence à des températures plus élevées et, étant endothermique, a tendance à se ralentir et même à s'arrêter si l'on ne maintient pas la température du carbone.

A. 6. Réactions avec l'eau

L'eau brûle le carbone pour donner CO2 ou CO + H₂ à partir de températures de l'ordre de 300 à 600 °C. La réaction est endothermique comme avec le CO2.

A. 7. Réactions avec l'hydrogène

L'hydrogène peut réagir avec le carbone en donnant du méthane et d'autres hydrocarbures à partir de 800 °C. La réaction est lente et ne devient notable que si l'on part de carbones divisés. Elle est favorisée par l'action de catalyseurs comme le nickel.

A. 8. Réactions avec le soufre

Dans certaines conditions, le soufre peut réagir avec les carbones pour donner CS₂. La vitesse de réaction est assez lente.

A. 9. Charbons actifs

Certains cokes de produits naturels : charbons de bois, de cellulose ou de résines thermodurcissables présentent une grande surface spécifique. Cette surface peut être augmentée par activation (oxydation par l'oxygène, l'air ou l'eau) en même temps que l'on fixe des atomes d'oxygène et des groupes hydroxyles sur le carbone. Les charbons actifs sont utilisés pour l'épuration des fluides ; ils ont en effet la propriété de fixer des ions et des molécules organiques.

B. L'oxydation en phase liquide

Elle sera examinée à propos de l'insertion.

C. Réactions en phase solide

C. 1. Oxydation

Toute une série d'oxydes métalliques réagit avec les carbones et les graphites en donnant du métal et du CO₂ ou du CO suivant la température de réduction de ces oxydes. Dans certains cas (B, Al, Fe, Ti, etc) le métal réagira avec le carbone pour donner des carbures.

C. 2. Réactions avec les métaux donnant des carbures

La formation de carbure peut transformer complètement le graphite et en conséquence, détruire la pièce ou assurer une protection de surface lorsque l'on part d'un carbone donné et qu'on opère la réaction dans

des conditions données. C'est ainsi que l'on peut revêtir le graphite polycristallin de carbure de silicium.

D. Protection contre l'oxydation

On ne sait pas mettre dans la structure du graphite ou dans sa porosité des produits qui permettent de l'utiliser à des tempéra-

II. Réactions d'insertion

Presque tous les éléments de la classification périodique de Mendéléiev s'insèrent dans le graphite sous forme d'éléments ou de composés en particulier d'halogènures, d'oxydes ou de sulfures, de composés ammoniés. A ces corps s'ajoute toute une série d'acides : sulfurique, nitrique, perchlorique, fluorhydrique, trifluoro-acétique et plus généralement les acides de Lewis.

L'insertion dans le graphite s'opère par envahissement de l'espacement entre deux couches de carbone par une couche d'atomes ou de molécules. Il peut être total (une couche d'insérant pour une couche de carbone) ou partiel. Cette insertion s'accompagne d'un gonflement du cristal de graphite qui provoque dans la plupart des cas la destruction des pièces. Pour les graphites polycristallins, le gonflement dépend de la nature du graphite et peut s'accompagner de réactions secondaires d'oxydation par exemple (CrO₃, etc).

Les carbones non graphitables ne donnent pas en général de composés d'insertion bien qu'on ait pu mettre en évidence l'insertion des métaux alcalins, et les carbones graphitables non graphités peuvent résister à certains agents comme le brome par exemple. Inversement, le sodium pur qui rentre dans les carbones non graphités ne rentre pas dans des conditions normales

III. Réactions électrochimiques

Le carbone et le graphite sont utilisés comme électrode pour différentes électrolyses et pour des piles ou des accumulateurs.

A. Electrolyse aqueuse *

Dans la fabrication du chlore par électrolyse des chlorures alcalins, le graphite, en raison de ses propriétés électriques et chimiques, constitue un matériau de choix pour la réalisation des anodes des cellules à diaphragme et des cellules à cathodes de mercure.

La consommation du graphite en électrolyse résulte, soit de phénomènes purement chimiques (attaque du carbone par la saumure chlorée, hors courant) se manifestant dans toute la masse de l'anode par l'intermédiaire de sa porosité, soit de phénomènes électrochimiques proprement dits (formation d'oxygène à l'anode, due à l'oxydation anodique des ions hydroxyles, qui se

* Lore, Chimie Industrie

tures élevées en présence d'agents oxydants. Par contre, une couverte de carbure de silicium permet d'utiliser des pièces en graphite jusqu'à 1700°C pendant des temps courts et dans la pratique industrielle jusqu'à 1200°C.

Cette protection est très difficile à mettre en œuvre si l'on désire une efficacité parfaite. Ceci tient essentiellement à la diffé-

dans les graphites purs et parfaits. L'insertion dépend de l'affinité électronique ou du potentiel d'ionisation de l'élément. Elle est réversible à l'exception de l'oxygène et du fluor (oxyde graphitique, fluorure de carbone).

Par ailleurs, la texture des carbones joue un grand rôle dans les phénomènes d'insertion. C'est ainsi qu'un morceau de coke graphité pourra se détruire complètement alors qu'un graphite à grains fins pourra résister à l'insertion, la cohésion de la matière étant d'autant plus grande que les forces de gonflement sont inférieures à la résistance mécanique locale du carbone.

De même, les fibres peuvent présenter certaines réactions d'insertion mais tous les corps qui s'insèrent dans le graphite n'arrivent pas à y pénétrer, vraisemblablement plus pour des raisons mécaniques qu'électroniques.

Oxydation en phase liquide

Les agents liquides oxydants tels que l'acide nitrique, l'acide sulfurique, les mélanges sulfo-chromiques, le réactif de Brodie oxydent les carbones et les graphites mais dans la plupart des cas avec formation intermédiaire de composés d'insertion. La

manifestent à la surface de l'anode. L'hétérogénéité du graphite vis-à-vis de ces phénomènes entraîne un délitement qui concourt également à la consommation de graphite.

Les caractéristiques souhaitées du graphite pour électrolyse sont donc : une densité élevée, une faible surface spécifique, une faible porosité et une faible rugosité. Par ailleurs, les conditions d'oxydation chimique très sévères dans les cellules à diaphragmes imposent une imprégnation spéciale du graphite (huile de lin, résines, cires ou paraffines).

On trouve dans ce cas en plus de la corrosion chimique et des phénomènes d'insertion (gonflement par ions chlores), une corrosion électrochimique provoquant l'oxydation du graphite.

Le graphite est également utilisé pour la fabrication des chlorates.

L'électrolyse du fluor utilise des électrodes en carbone dit amorphe car les anodes en rence de coefficient de dilatation des graphites supports et de la couche de carbure de silicium. En choisissant un graphite de coefficient de dilatation convenable, on a pu obtenir des pièces de dimensions modestes (1 dm³) résistant à l'oxydation à 1 000 °C. Pour des pièces de grandes dimensions, il semble que ce soit possible mais il est très difficile de se procurer de telles pièces recouvertes de CSi.

réaction de Brodie (NO₃ H + CIO₃ K) met particulièrement bien en évidence la différence de réactivité des différents carbones : le graphite parfait donne de l'oxyde graphitique avec peu de formation de CO₂. Les carbones partiellement graphités s'oxydent d'autant plus en CO₂ que leur degré de graphitation est plus faible. Les carbones non graphitables brûlent sans former d'oxyde graphitique.

Protection contre le gonflement

On peut inhiber le gonflement dans certains cas en substituant par exemple des atomes de bore aux atomes de carbone et on a montré que 1 % de bore substitué suffisait à inhiber complètement l'absorption de brome dans un graphite parfait.

On peut mécaniquement empêcher le gonflement d'un graphite poreux et ce, même avec un corps relativement réactif vis-à-vis de l'agent gonflant. C'est ainsi que si l'on met en présence d'UF₆ une plaque de graphite poreux et une résine, le graphite gonfle et la résine est progressivement détruite. Une pièce de graphite imprégnée de cette résine pourra résister à l'action de l'UF₆. Le gonflement de la pièce ne se produit plus et la surface de résine accessible au réactif est suffisamment faible pour que la réaction reste faible.

graphite seraient gonflées par insertion d'HF et de F_2 . Dans ce cas, les anodes durent très longtemps mais on observe parfois des effets de corrosion qui sont restés jusqu'à présent inexpliqués.

La corrosion débute par une attaque très localisée et se poursuit par la destruction de la matière à partir de ce point d'attaque jusqu'à disparition totale de l'électrode. Ce phénomène aléatoire quand il se produit, est extrêmement rapide.

B. Electrolyse ignée

Le carbone est utilisé pour la fabrication de Al et Mg, mais dans ce cas, l'électrode est consommable car elle participe à la réduction des oxydes.

C. Piles. Accumulateurs

Le carbone est utilisé comme anode dans les piles (piles Leclanché, piles à dépolarisation par l'air, piles à gaz, piles et accumulateur air-zinc). Dans ce cas, il joue un rôle de transfert pour l'oxygène et il est indispensable d'éviter que l'anode s'oxyde pendant le fonctionnement de la pile. Suivant les applications, on fera appel à certains types de carbone ou de graphite. Signalons des études récentes sur l'utilisation de complexes lamellaires de graphite pour la constitution de piles à hautes capacités énergétiques et à tension élevée. On utilise dans ce cas l'aptitude du graphite à former des complexes avec certains halogénures ou certains métaux. Le produit le plus développé industriellement est actuellement la pile au fluorure de carbone mise au point par les Japonais.

IV. Applications industrielles

Dans la plupart des applications industrielles du graphite, les phénomènes de corrosion, c'est-à-dire essentiellement d'oxydation se retrouveront.

A. Les charbons d'arc et de soudure

Ils se consomment par vaporisation du carbone dans l'arc. Cette vaporisation se faisant dans l'air, le carbone vaporisé brûle et il faut éviter que le carbone des baguettes brûle avant d'être vaporisé. Ainsi pour les charbons à haute densité, on revêtira la surface des baguettes, de cuivre électrolytique qui aura l'avantage d'éviter l'échauffement de la baguette par effet Joule et de la refroidir.

B. Les charbons de pile

Ils sont fabriqués à partir de coke et de charbon de bois. Ils ne doivent pas être oxydés lors du fonctionnement de la pile.

C. Protection anodique

On utilise le graphite pour protéger les canalisations enterrées, en fixant tous les x mètres de la canalisation des électrodes en graphite.

D. Briques de hauts fourneaux

Le carbone non graphité est utilisé pour la confection de briques de hauts fourneaux dans la zone ou le milieu est réducteur. On voit que là aussi l'oxydation limite l'utilisation du carbone dans tout le haut fourneau. Par ailleurs, on observe des corrosions dues en général à la formation de composés d'insertion avec les métaux alcalins constituant une partie des impuretés du minerai.

E. Fabrication de l'aluminium

C'est la plus grosse consommation de carbone. Il est employé pour la fabrication des anodes pour l'électrolyse de l'aluminium. Dans ce cas, le carbone est consommé.

F. Graphites pour l'industrie chimique

Une application particulièrement intéressante des propriétés des carbones et graphites est leur utilisation pour la construction de matériel de génie chimique.

Ce matériel peut être des échangeurs de chaleur sous forme de faisceaux tubulaires ou d'échangeurs à blocs mais aussi des pompes centrifuges horizontales ou verticales, des éjecteurs et groupes à vide, des disques de sécurité, des colonnes ou réacteurs, des tuyauteries, des absorbeurs, des unités de synthèse ou encore de simples anneaux de raschig.

A vrai dire, pour tout ce matériel, c'est le



Figure 1. Disque de sécurité en Delanium. (Labo Recherches - Pagny-sur-Moselle).

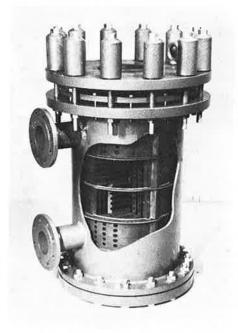


Figure 2. Échangeur CL II. (Labo Recherches - Pagny-sur-Moselle).

graphite qui est le plus souvent utilisé. A cela, trois raisons essentielles :

- •sa tenue à la corrosion chimique
- •la facilité d'usinage de pièces complexes (roues de pompes, blocs d'échange);
- •sa conductibilité thermique qui est comparable à celle des métaux et qui permet de résoudre les nombreux problèmes d'échan-

ge thermique de l'industrie chimique :

graphite : 0,35 cal/cm.s. °C; fer : 0,20 cal/cm.s. °C; aluminium : 0,55 cal/cm.s. °C.

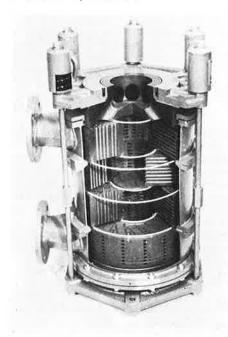


Figure 3. Échangeur GM 8. (Labo Recherches - Pagny-sur-Moselle).

De ces trois raisons, le problème de résistance à la corrosion chimique est de loin le plus motivant. On s'aperçoit, en effet, que le graphite est une solution économiquement valable : entre les métaux usuels dont la résistance à la corrosion est très limitée et les métaux spéciaux comme le tantale, le titane ou le zirconium dont le prix reste encore très élevé, le graphite a sa place : titane : 2 fois le prix du graphite imprégné

titane: 2 fois le prix du graphite imprégné, zirconium: 4 fois le prix du graphite imprégné,

tantale : 10 fois le prix du graphite impré-

acier inox : prix du graphite imprégné.

On notera aussi que lorsqu'il y a une légère attaque chimique du graphite, ce matériau est quelquefois retenu car, malgré le remplacement périodique des appareils, le graphite reste la solution la plus économique.

Du point de vue technique, l'utilisation du graphite dans l'industrie chimique se heurte au fait que le graphite est poreux (15 à 30 % du volume des pores).

De ce fait, les parois de graphite ne sont ni étanches aux gaz, ni aux liquides. Pour obtenir un matériau étanche, il faut procéder à une imperméabilisation. L'idéal évidemment serait d'imperméabiliser la pièce par imprégnation de carbone. Plusieurs solutions sont envisageables (imprégnation brai, imprégnation gazeuse). Malgré leurs utilisations, elles ne permettent pas d'atteindre l'étanchéité nécessaire pour l'application en génie chimique. On a donc recours à des imprégnations par des résines thermodurcissables, éventuellement par des cires ou des résines thermoplastiques.

Cette nécessité d'imperméabiliser par des résines réduit considérablement la résistance thermique des graphites imprégnés. Actuellement, avec des imprégnations à base de PTFE, les températures maximales d'utilisation sont de l'ordre de 230-240 °C.

Du point de vue corrosion chimique, un choix judicieux des résines d'imprégnation permet de résoudre quasiment tous les problèmes de corrosion, c'est ainsi que les graphites imprégnés de résines phénoliques sont d'un emploi commode et donnent une bonne résistance aux acides et aux solvants organiques. Leur résistance aux bases laisse à désirer.

Avec les résines furaniques préparées à partir des dérivés aldéhydiques, alcooliques ou cétoniques de furane, la résistance aux bases est souvent supérieure à celle des résines phénoliques.

Depuis peu, la possibilité d'imprégner certains graphites avec des résines fluorées a permis de résoudre quasiment la totalité des problèmes de corrosion au niveau de l'imprégnant.

Nous sommes donc ramenés, du point de vue corrosion, aux problèmes de corrosion du graphite.

Comme expliqué précédemment, cette corrosion du graphite en milieu liquide ou gazeux aux températures de service du matériel est le résultat de phénomènes d'oxydation avec quelquefois formation intermédiaire de produits d'insertion.

C'est le cas du chlore humide, du brome, de l'acide sulfurique fumant en présence d'anhydride sulfurique à 160°C, de la chlorydrine sulfurique dès la température ambiante, des mélanges sulfochromiques et sulfomanganiques, de l'acide nitrique concentré et chaud.

La vitesse de corrosion du graphite par ces différents fluides dépend de nombreux paramètres, en particulier :

- •la texture du graphite : on remarque qu'un graphite à grains fins résiste mieux qu'un graphite à grains plus gros (meilleure cohésion des cristallites);
- •le taux d'impuretés et la nature des impuretés jouent un rôle : les graphites très cendreux ont des attaques «catalysées» par

ces cendres et ceci, avec des cinétiques variables suivant la nature des impuretés (vanadium);

•le degré de graphitation est capital; plus il est élevé et plus les risques d'insertion sont augmentés. Au contraire, plus il est faible et plus les risques d'oxydation sont grands. Lorsque le processus d'attaque du graphite est le résultat d'une oxydation précédée d'une insertion, une solution de compromis est recherchée.

Le choix des carbones et des solutions cherchant à inhiber soit l'oxydation, soit l'insertion, est mis en œuvre industriellement et permet ainsi de proposer à l'industrie chimique du matériel en graphite dans la plupart des procédés. On peut citer comme exemples d'utilisation industrielle :

- •les procédés chlorhydriques : absorption, chauffage, refroidissement, distillation ;
- •les procédés sulfuriques : chauffage, concentration, dilution ;
- •les procédés phosphoriques : concentration ;
- •les bains de traitement de surface, décapage ou revêtement électrolytiques, bains acides, parfois oxydants ou basiques ;
- la chimie organique et les procédés divers pour lesquels la composition des fluides est très variable.

V. Conclusion

On a vu que l'utilisation du graphite était dans certains cas limitée par des phénomènes de corrosion en fait d'oxydation ou d'insertion, mais à l'inverse que l'oxydation du carbone permettait de l'utiliser comme réducteur et que c'était finalement là sa principale utilisation (A1).

Par ailleurs, lorsque l'oxydation ou l'insertion n'intervient pas, le graphite est un des matériaux qui résiste le mieux à la corrosion et permet donc du fait de sa réfractarité, de l'utiliser à très haute température.

Il nous faut donc, pour terminer, mentionner des utilisations plus récentes du graphite dans le domaine spatial pour les tuyères de fusées ou les corps de rentrée. Dans ce cas, on demande au graphite d'avoir des propriétés mécaniques élevées et de résister à l'ablation, c'est-à-dire à l'oxydation dans un gaz raréfié, mais à très haute température.

Les graphites industriels à grains fins conviennent bien du point de vue ablation, mais ne résistent pas aux chocs thermiques. On utilisera donc de préférence, soit du pyrocarbone, soit des composites carbonecarbone qui font actuellement l'objet d'études de réalisation très poussées dans le monde.

Références

Les carbones, Masson 1965, Chemistry and Physics of Carbon, Ph. L. Walker, Marcel Dekker N.Y. Chimie Industrie 1972, **105**, 1736 Techniques de l'Ingénieur, D 296.

Erratum

Une erreur s'est glissée dans la mise en pages de l'article de Monsieur A. Flausch sur la gélatine (2^e partie), paru dans le numéro de mars 1978, p. 37. La note en bas de page ne doit comprendre que le 1^{er} paragraphe.

La suite de cette note : "Il faut en effet garder à l'esprit... lors de la préparation de desserts instantanés" doit être replacée dans le texte en fin du paragraphe 4.6.5. Séchage.