



**MATERIAUX POUR GARNITURES MECANQUES DE
POMPES A EAU**

MATERIALS FOR WATER PUMP MECHANICAL SEALS

Ré
Ori

Nu

Ti

Au

So
Ser

Ré

No





**Direction des Etudes
et Recherches**

**Service Information
Prospective et Normalisation**

CLAMART Le 04/10/94

**Département Systèmes d'information
et de documentation**

**Groupe Exploitation
de la Documentation Automatisée**

1, avenue du Gal de Gaulle
92141 CLAMART Cedex
tel : 47 65 56 33

BAT 526
CEN SACLAY
MIST/SBDS/SPRI
MIST-SDEM-SBI
91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

à l'attention de :

MEMOIRE TECHNIQUE ELECTRONIQUE

Cette feuille est détachable grâce à la microperforation sur le côté droit.

Référence de la demande : **F486736**

Votre commande :

Origine : **AVIS DE PARUTION NORMES E**

Numéro du document : **94NB00029**

Titre : **MATERIAUX POUR GARNITURES MECANQUES DE POMPES A EAU**

Auteurs : **BROUSSE P.**

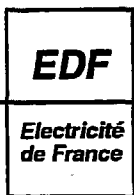
Source : **COLL. NOTES INTERNES DER. PRODUCTION D'ENERGIE (HYDRAULIQUE, THE**
Serial :

Référence du document : **SANS**

Nombre de pages : **0025**

Nombre d'exemplaires : **001**

Support : **P**



Direction des Etudes et Recherches

SERVICE ENSEMBLES DE PRODUCTION
Département Machines

1992

BROUSSE P.

**MATERIAUX POUR GARNITURES
MECANIQUES DE POMPES A EAU**

***MATERIALS FOR WATER PUMP MECHANICAL
SEALS***

Pages : 23

94NB00029

Diffusion : J.-M. Lecœur
EDF-DER
Service IPN. Département SID
1, avenue du Général-de-Gaulle
92141 Clamart Cedex

© Copyright EDF 1994
ISSN 1161-0611

SYNTHÈSE :

L'augmentation constante de la puissance des centrales thermiques classiques et nucléaires ainsi que les problèmes de fiabilité et de sûreté, ont contraint les constructeurs à développer des systèmes d'étanchéité adaptés aux nouvelles performances des pompes à eau. En 1970, la Direction des Études et Recherches d'EDF s'est préoccupée du problème.

Il est rapidement apparu que la nature des matériaux des faces de frottement jouait un rôle déterminant pour la fiabilité des étanchéités. Les sollicitations exceptionnelles (transitoires, niveaux vibratoires élevés, etc...) accélèrent le vieillissement.

A l'origine, les faces de frottement étaient constituées d'un matériau dur (carbure de tungstène) face à un matériau tendre (carbone). La tenue était aléatoire et elle n'était pas compatible avec un fonctionnement industriel.

Des essais, réalisés sur des bancs d'essais d'EDF-DER, ont mis en évidence les mêmes types de dégradations.

Les constructeurs de garnitures ont alors utilisé des matériaux céramiques (carbure de silicium) promis à un grand avenir. Malheureusement, ces matériaux étaient récents et leur procédé de fabrication mal maîtrisé. Les espoirs furent rapidement déçus dans de nombreuses applications, y compris, celui des garnitures mécaniques d'étanchéité. Pendant plusieurs années les résultats furent très inégaux. Les fournisseurs de matériaux ont progressé, en particulier au niveau de la réduction de la fragilité. Parallèlement, les constructeurs de garnitures ont procédé à des essais comparatifs de tenue de matériaux au frottement. Il a par ailleurs été mis en évidence qu'il fallait, à tout niveau, raisonner céramique : conception des pièces, contrôle, montage et utilisation.

EDF a fait pression auprès des fournisseurs de garnitures pour qu'ils garantissent une qualité constante d'approvisionnement. La DER a systématiquement testé les nouveaux dispositifs sensibles, dans les conditions réelles et exceptionnelles, avant leur montage en centrale.

Maintenant, les carbures de silicium proposés par les fournisseurs de garnitures donnent entière satisfaction.

La contre face en carbone a posé beaucoup moins de problèmes. Le remplacement des carbones à liant résine par des carbones à liant antimoine, plus résistants, a permis d'obtenir la fiabilité souhaitée.

La durée de vie d'un dispositif normalement exploité, atteint par exemple, pour une turbopompe alimentaire, les 20 000 heures de fonctionnement demandées au cahier des charges.

EXECUTIVE SUMMARY :

In view of the continually increasing power ratings of conventional and nuclear power plants and the related reliability and safety problems, plant builders have had to develop seal systems compatible with current water pump performances. In 1970, EDF/R&DD was already concerned by this problem.

It soon became obvious that the nature of the materials used for the friction surfaces was decisive for seal durability. Exceptional loads (transients, high vibration levels, etc...) hasten aging.

To begin with, friction surfaces consisted of a hard material (tungsten carbide) mated with a soft material (carbon). Resistance was unpredictable and not compatible with industrial requirements.

Tests performed on the EDF/R&DD test benches evidenced the same types of degradation.

The mechanical seal manufacturers then began to use ceramic materials (silicon carbide), which raised high expectations. Unfortunately, these were recent materials and their manufacturing process was not thoroughly understood. Hopes were soon dashed in many applications, including that of mechanical seals. Fluctuating results were obtained over the next few years. The raw material suppliers made progress, especially with regard to reducing fragility. On a parallel, the mechanical seal manufacturers initiated comparative tests on the friction resistance of materials. It has also been established that ceramics have to be stringently supervised at all levels : part design, inspection, assembly, use.

EDF has much insisted that mechanical seal suppliers guarantee the constant quality of their products. EDF/R&DD has systematically tested new sensitive devices, under normal and exceptional conditions, prior to their installation at the plants.

At the present time, the silicon carbides proposed by the mechanical seal suppliers are entirely satisfactory.

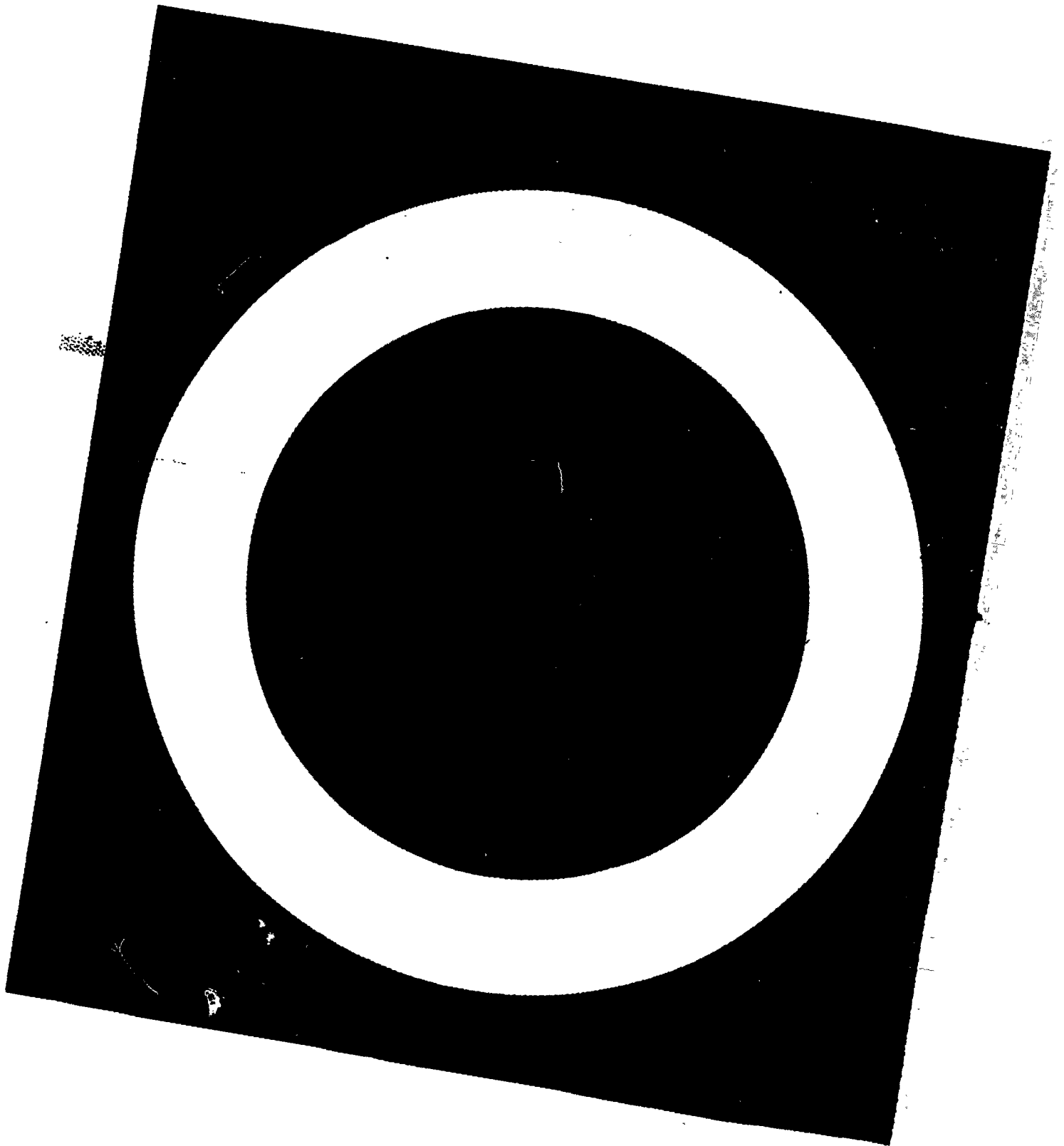
The carbon mating surface was far less problematic. The required reliability was obtained by replacing resin binder carbons by the more resistant antimony binder carbons.

Under normal operating conditions, a turbine-driven feed pump, for example, now achieves the 20 000 operating hours required by the specifications.

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION.....	7
2	DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT D'UNE GARNITURE MECANIQUE.....	7
2.1	Les faces de frottement.....	8
3	HISTORIQUE DES MATERIAUX UTILISES.....	8
4	UTILISATION DU CARBURE DE TUNGSTENE.....	8
4.1	Présentation du carbure de tungstène.....	8
4.2	Produit de base.....	9
4.3	Mode d'élaboration.....	9
4.4	Comportement du carbure de tungstène.....	9
4.5	Processus de dégradation des faces de frottement des pompes alimentaires.....	10
5	PRESENTATION DES CERAMIQUES MASSIVES.....	10
5.1	Rappel sur les céramiques.....	10
5.2	Modes d'élaboration.....	11
5.3	Propriétés des céramiques.....	11
5.4	Les familles de produits.....	12
5.4.1	Les oxydes.....	12
5.4.2	Les nitrures.....	13
5.4.3	Les carbures.....	13
6	LE CARBURE DE SILICIUM.....	13
6.1	Présentation du SiC.....	13
6.1.1	Lefrittage sans pression.....	13
6.1.1.1	Le carbure de silicium fritté réaction.....	13
6.1.1.2	Le carbure de silicium fritté naturel (Sintered SIC).....	14
6.1.2	Le frittage sous pression.....	14
6.1.2.1	La compression à chaud.....	14
6.1.2.2	Le pressage isostatique à chaud.....	14
6.1.3	Comparatif des différents modes d'élaboration.....	15
7	LES PREMIERES UTILISATIONS DE CARBURE DE SILICIUM EN GARNITURE MECANIQUE.....	15
8	LA RECHERCHE DES CARBURES DE SILICIUM APPROPRIES....	18

9	LES CARBONES FRITTES.....	18
9.1	Présentation.....	18
9.2	Produit de base.....	19
9.3	Mode d'élaboration.....	19
9.4	Comportement.....	19
9.5	Nature des incidents.....	19
9.6	Analyse des incidents.....	20
9.7	Résolution des incidents.....	20
10	LE CARBONE SILICE.....	20
10.1	Présentation.....	20
10.2	Procédé de fabrication.....	20
10.3	Caractéristiques.....	21
10.4	Résultats des essais effectués par EDF-DER.....	21
10.5	Utilisation du carbone silicé.....	21
11	LES COUPLES DE MATERIAUX RETENUS.....	21
12	REMISE EN ETAT DES ANNEAUX DE CARBONE ET CARBURES APRES USAGE.....	22
13	LES PRECAUTIONS À PRENDRE AVANT DE CHOISIR ET D'UTILISER UN MATERIAU CERAMIQUE.....	22



1 INTRODUCTION

L'augmentation constante de la puissance des centrales thermiques classiques et nucléaires a contraint les constructeurs à développer des pompes de plus en plus performantes. Les températures et les pressions de fonctionnement ont été sensiblement augmentées ainsi que les vitesses de rotation. La taille des machines s'est également accrue. De ce fait, les diamètres d'arbres sont plus importants et les vitesses de glissement ont sensiblement progressé.

C'est ainsi que dès les années 1970 à la demande des directions opérationnelles la DER a travaillé sur les garnitures mécaniques.

Les études se sont concentrées sur les pompes à eau et plus particulièrement sur celles ayant des conditions de fonctionnement sévères.

Le développement des centrales nucléaires a également créé un besoin au niveau des pompes touchant à la sûreté.

Il est rapidement apparu que les matériaux des faces de frottement jouaient un rôle déterminant pour la fiabilité des étanchéités.

Conditions de fonctionnement sévères :

Nous entendons par conditions de fonctionnement sévères, des pompes ayant un produit vitesse linéaire de glissement x pression supérieur à 1 000. Il s'agit des pompes alimentaires des centrales thermiques classiques et nucléaires. Nous excluons les pompes primaires dont le dispositif d'étanchéité est très spécifique.

Matériel de sûreté :

Ceci concerne les circuits assurant la bonne marche du réacteur (Circuit contrôle volumétrique et chimique RCV, circuit de refroidissement à l'arrêt) et la sécurité en cas d'incident (pompes d'injection de sécurité, circuit d'aspersion). Ces pompes ne sont pas soumises à des conditions de fonctionnement aussi sévères que les pompes alimentaires (produit pression x vitesse inférieur à 200), en revanche, leur fiabilité doit être totale. Certaines d'entre elles peuvent être amenées à véhiculer de l'eau chargée en particules, comme, par exemple, les pompes d'aspersion. En cas d'incident elles aspirent l'eau dans un puisard et arrosent le cœur.

2 DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT D'UNE GARNITURE MÉCANIQUE

Les étanchéités d'arbres sont réalisées à l'aide de garnitures mécaniques axiales décrites en détail par ailleurs. En ce qui concerne l'aspect matériau, nous nous intéresserons tout particulièrement aux deux anneaux se faisant face et séparés par un film hydrodynamique qui se forme lors de la mise en rotation. Les deux anneaux sont de nature et dureté différentes. Afin de limiter la friction, les deux surfaces sont polies. Le maintien à une température acceptable des grains inférieure à environ 80°C est assurée par le circuit de balayage.

En régime nominal, les paramètres de fonctionnement sont stables et l'épaisseur du film d'eau est constante : de l'ordre de quelques μm . Des irrégularités de fonctionnement (niveau vibratoire élevé, régime hydraulique instable) ou des transitoires (démarrage, arrêt, îlotage) agissent directement sur le film hydrodynamique. Il peut brutalement varier en épaisseur et parfois disparaître pendant quelques instants. Les deux anneaux se trouvent alors directement en contact, provoquant un échauffement important suivi d'un violent choc thermique lors de la

réapparition du film. Ces sollicitations occasionnelles ou répétées peuvent entraîner la détérioration, voire la destruction des anneaux. Dans ce cas, l'étanchéité est inefficace et il faut procéder à son remplacement. En ce qui concerne les pompes alimentaires, cela entraîne une perte partielle ou totale de la production. Pour ce qui est des pompes de sécurité les conséquences peuvent être graves.

2.1 *Les faces de frottement*

Les faces de frottement, au même titre que les joints toriques, les ressorts et les douilles de glissement, sont les pièces d'usure d'une garniture mécanique. Afin de limiter les interventions et les coûts d'exploitation, il est nécessaire de disposer de matériaux présentant la meilleure résistance aux sollicitations mécaniques, thermiques et chimiques. En terme de frottement, il est nécessaire de disposer d'une pièce plus tendre que l'autre. Il est absolument indispensable de raisonner sur des couples de matériaux. Le choix doit tenir compte de la compatibilité tribologique du couple et de la nature de son environnement (température de fonctionnement, chocs thermiques, corrosion ...).

3 HISTORIQUE DES MATÉRIAUX UTILISÉS

Pompes alimentaires

Jusqu'au palier 250 MW, les faces de frottement étaient généralement constituées d'une pièce revêtue d'alliage base cobalt, type Stellite, face à un carbone massif. Les dégradations du revêtement étaient acceptables. Les tranches 600 MW plus performantes, mises en service en 1968, ont mis en évidence des dégradations inacceptables du stellite. Les études des premiers paliers nucléaires étaient en cours et il est paru indispensable de rechercher un matériau de substitution offrant une résistance accrue. Le carbure de tungstène massif a été choisi pour ses qualités de résistance mécanique et sa tenue en température. La contre face en carbone imprégnée de résine ou de métal a été conservée. Le carbure de tungstène a donc équipé d'origine les premiers paliers nucléaires 900 MW CP1 et CP2.

Pompes de sauvegarde

Elles ont été équipées d'origine de grains en carbure de tungstène.

4 UTILISATION DU CARBURE DE TUNGSTÈNE

4.1 *Présentation du carbure de tungstène*

Le carbure de tungstène appartient à la famille des carbures métalliques ou cermets (céramique-métal). Son mode d'élaboration par frittage d'une poudre, lui confère des caractéristiques particulières. Sa dureté exceptionnelle le classe parmi les matériaux les plus durs tel que le diamant et le corindon. Afin de compenser son manque de ductilité, il est nécessaire de lui ajouter un liant. Le matériau apparaît sous forme de cristaux de carbure de tungstène enrobés par le liant. Le matériau bénéficie de la dureté des grains en carbure de tungstène et de la ductilité du liant. Le liant est l'élément faible mécaniquement et surtout chimiquement. La corrosion au niveau du liant peut entraîner la détérioration du matériau (déchaussement de grains). Comparativement aux autres matériaux, les pièces en carbure de tungstène sont plus dures et plus fragiles. Par ailleurs il est très sensible aux chocs thermiques et sa densité est très élevée (15).

4.2 *Produit de base*

De la poudre de tungstène et de carbone sous forme de noir de fumée sont soigneusement dosés et mélangés. L'ensemble est porté à la température de 1500 °C. Les éléments se combinent alors pour donner du carbure de tungstène. Ce dernier est concassé puis mélangé à un liant. Il s'agit généralement de nickel ou de cobalt. A ces composants, sont ajoutés des oxydes métalliques chargés d'améliorer la résistance mécanique à chaud.

Le tout est finement broyé pour obtenir une poudre ayant une granulométrie d'environ 15 µm.

4.3 *Mode d'élaboration*

L'opération de frittage consiste à compacter la poudre à la forme désirée avant de la comprimer dans une matrice. La pression est de l'ordre de quelques hectobar et la température atteint environ 1 500°C. A cette température, le liant est partiellement liquide et il y a réorganisation des particules de carbure de tungstène et formation de grains plus gros. Le frittage réduit la porosité entre les grains en provoquant leur agglomération. Ceci entraîne naturellement un retrait de quelques pour cent. La pièce finale a des cotes inférieures à la pièce avant frittage. L'usinage de finition (mise à la cote, polissage, surfaçage) ne peut être effectué qu'avec des outils diamantés. Le frittage est présenté au paragraphe 5.2. Il est également utilisé pour la fabrication des céramiques et des carbones que nous présenterons dans les prochains chapitres.

4.4 *Comportement du carbure de tungstène*

Pompes alimentaires

BURGMANN et BORG-WARNER, les deux fournisseurs de garnitures pour les pompes alimentaires, au cours des années 1970/1980 ont utilisé des grains en carbure de tungstène avec plus ou moins de satisfaction. Cela concernait les tranches classiques 600 MW et les tranches nucléaires 900 MW CP1 et CP2. L'exploitation de ces garnitures a mis en évidence un certain nombre de dégradations.

Le principe de maintien des grains fixes et tournants étaient différents d'un constructeur à l'autre. BURGMANN frettait les grains dans des porte grains en acier. Les dégradations se traduisaient par l'apparition de criques dues à des chocs thermiques. Les déformations permanentes de la face de frottement pouvaient entraîner une usure prématurée de pièces en carbone.

BORG - WARNER utilisait un montage différent où le grain en carbure était monté "flottant" sur des joints toriques. Les chocs thermiques provoquaient également des criques mais de plus, sous l'effet des contraintes internes, l'anneau non maintenu se rompait avant de "labourer" la contreface. L'étanchéité était alors totalement inefficace et l'arrêt de la pompe immédiat pour intervention. Certaines garnitures ont cassé après seulement quelques heures, d'autres ont fonctionné plusieurs milliers d'heures sans problème.

Les essais réalisés sur banc EDF-DER ont mis en évidence les mêmes types de dégradations.

Deux liants sont utilisés pour le carbure de tungstène: le cobalt ou le nickel. Le premier apporte une meilleure tenue du carbure de tungstène que le second. Malheureusement l'emploi du cobalt est proscrit dans le nucléaire. Le nickel est sensible à la corrosion et tout particulièrement à l'eau déminéralisée. Cette corrosion entraîne une décohésion des grains qui se déchaussent.

Pompes de sauvegarde

Ces pompes sont nettement moins sollicitées que les pompes alimentaires et malgré des essais en eau chargée et des chocs thermiques, aucune détérioration n'a été décelée. Le fonctionnement en exploitation a confirmé le résultat des essais.

4.5 *Processus de dégradation des faces de frottement des pompes alimentaires*

En fonctionnement normal, la puissance dégagée par le frottement des faces atteint 10 à 20 kW. Lors de fonctionnements transitoires, le film d'eau peut disparaître et la puissance dégagée croît considérablement. La face de frottement subit une élévation brutale de température très superficiellement. Sous l'effet de la chaleur, la surface se déforme et le carbure subit une dilatation localisée. Compte tenu de l'énergie subitement dissipée, le matériau ne peut pas évacuer spontanément la quantité de chaleur dégagée. Des analyses sur des pièces dégradées ont permis de déterminer que la température a pu atteindre près de 600 °C. Les matériaux frittés offrent une résistance médiocre à la traction et la dilatation entraîne la formation de criques thermiques. Lors du retour à la température normale, la face criquée ne retrouve pas une parfaite planéité. Des variations brutales de température ou des contraintes mécaniques élevées peuvent aussi entraîner la rupture de la pièce. En effet ce type de matériau est à la fois très dur et hétérogène (grains durs, liant ductile, porosité). Les criques qui s'initient, se propagent très rapidement et peuvent atteindre des longueurs importantes conduisant à la rupture brutale de la pièce.

La contre face en carbone est insensible aux chocs thermiques. En revanche, la surface criquée peut se transformer en un redoutable outil en usant et détruisant très rapidement la contre face.

En fonctionnement normal, l'usure par 1 000 heures est non mesurable sur le grain dur et de l'ordre de quelques μm sur l'anneau en carbone.

Le fonctionnement aléatoire de garnitures BORG-WARNER équipées de grains en carbure de tungstène était incompatible avec un mode de production industriel. La durée de vie attendue d'un tel organe est de deux ans (environ 18 000 h) sans intervention. Chaque démontage d'une étanchéité immobilise une TPA pendant 48 heures entraînant une perte de production de 300 MW. Le coût d'intervention atteint plusieurs centaines de milliers de francs

Les garnitures BURGMANN étaient moins sujettes aux ruptures de grains. Leur usure était malgré tout supérieure aux valeurs exigées

Les Directions de l'Équipement, de la Production et des Études et Recherches ont fait pression auprès des fournisseurs pour utiliser un matériau plus fiable. En 1980, les premiers grains en céramique massive ont été montés.

5 PRÉSENTATION DES CÉRAMIQUES MASSIVES

5.1 *Rappel sur les céramiques*

Les céramiques sont définies comme des matériaux solides dont la structure est polycristalline, non organique et non métallique.

Les céramiques massives sont composées de grains, agglomérés au cours d'une cuisson dont l'ensemble des réactions à haute température constitue le frittage. Ces grains ont une taille allant du micron au millimètre.

Les paramètres des procédés d'élaboration sont propres à chaque fournisseur et tenus secrets. Certains matériaux présentent un intérêt stratégique vis à vis de la défense nationale. Ils présentent par ailleurs un intérêt économique très important pour les firmes qui les développent et celles qui les utilisent. Des contrats de développement sont existes entre les fournisseurs et les utilisateurs. Les procédés de fabrication, mis au point théoriquement, nécessitent de longs mois établis. Les utilisateurs bénéficient alors d'une exclusivité d'utilisation leur permettant de pénétrer de nouveaux marchés.

5.2 Modes d'élaboration

Les céramiques sont obtenues *uniquement par frittage*. Il s'agit d'une technique de cuisson au cours de laquelle les grains sont agglomérés.

Le principe de frittage peut être résumé de la façon suivante.

La matière première est réduite à l'état de poudre finement broyée, de l'ordre de quelques microns. Des additifs chargés de faciliter la réaction sont ajoutés. Le mélange est ensuite mis à la forme de la pièce par compression, moulage ou extrusion, etc.

La pièce "cru" ou "vert" est ensuite placée dans un four à haute température pouvant atteindre, pour certains matériaux, 1 700°C. Lors du frittage, il y a alors réorganisation de la structure cristalline, réaction avec les liants, diminution de la porosité, retrait dimensionnel, agglomération des grains. Il existe différents modes de frittage : frittage naturel, frittage réaction, pressage isostatique.

La réalisation de pièces par frittage est délicate. De nombreux paramètres peuvent influencer la qualité du produit : préparation de la poudre, respect des températures et des pressions, vitesse de montée en température, nature des liants. La variation de ces paramètres peut donner naissance à des matériaux possédant des caractéristiques différentes : taux de porosité, taille des pores, taille des grains, résistance mécanique, etc...

Le procédé est décrit en détail paragraphe 6.

5.3 Propriétés des céramiques

Les propriétés dépendent naturellement de la nature du produit de base mais aussi de la granulométrie de la poudre de départ.

Nous ne nous intéresserons qu'aux céramiques dites "techniques" à usage thermo-mécanique. Nous excluons naturellement les céramiques à usage électrique ou électronique.

Toutes les céramiques possèdent de façon plus ou moins marquée les propriétés communes énoncées ci-dessous :

Caractéristiques physiques

- bonne tenue à la corrosion,
- grande dureté,
- masse volumique faible,
- vitesse de propagation des fissures bien supérieure à celle d'un acier.

Caractéristiques mécaniques

- module d'élasticité élevé,
- charge à la rupture élevée,

- bonne résistance à l'usure (érosion-frottement),
- déformation plastique pratiquement nulle à faible température,
- fragilité, mauvaise tenue aux chocs,
- usinage difficile nécessitant l'emploi d'outils diamantés.

Caractéristiques thermiques

- haute température de fusion et de décomposition,
- conductibilité thermique généralement faible.

Caractéristiques électriques

- conductivité électrique généralement faible.

Facteurs économiques

- obtention à partir de matières premières souvent abondantes peu coûteuses et non sujettes aux variations de prix des matières premières (exemple silicium);
- préparation de la poudre et frittage onéreux, mais l'augmentation des quantités permet d'abaisser les coûts de fabrication. Cette tendance devrait se poursuivre et s'amplifier avec les débouchés dans l'automobile;
- usinage coûteux à l'aide d'outils diamantés.

Les concepteurs de matériels utilisant des matériaux céramiques ainsi que leurs utilisateurs doivent impérativement tenir compte de ces caractéristiques. Si un grand nombre d'entre elles sont séduisantes, certaines nécessitent de revoir un certain nombre de points : forme des pièces, procédure de montage, régimes de fonctionnement transitoire.

5.4. Les familles de produits

Les familles de produits sont très nombreuses. Pour les applications étanchéité, nous retiendrons trois familles :

- les carbures (carbure de silicium),
- les oxydes (alumine, zircon),
- les nitrures (nitrure de silicium).

5.4.1 Les oxydes

Aucun oxyde ne peut supporter les contraintes thermo-mécaniques imposées à une garniture mécanique hydrodynamique haute performance.

En revanche, l'alumine est utilisée pour le joint n°1 hydrostatique des pompes primaires constitué de deux anneaux identiques séparés en permanence par un film d'eau. C'est son excellente résistance à l'abrasion qui est exploitée. Compte-tenu du grand diamètre des anneaux et de la vitesse de rotation, tout frottement entraînerait une destruction immédiate des faces. L'alumine est couramment utilisée pour des garnitures mécaniques d'étanchéité peu sollicitées, par exemple pour les paliers de tambours de machines à laver.

La zircon est particulièrement appréciée pour ses qualités réfractaires. Sa tenue mécanique très limitée peut être améliorée par des additifs. Ses possibilités restent insuffisantes.

L'oxyde de titane convient pour des pièces d'usure sans sollicitation thermique : guide-fil, anneaux pour cannes à pêche.

5.4.2 Les nitrures

Le nitrure de silicium est utilisé pour des usages mécaniques (billes de roulements, pièces de moteurs Diesel, broyeurs) et pour des applications réfractaires (sondes à oxygène pour aluminium liquide).

Les applications garnitures mécaniques sont peu répandues compte-tenu de son coût par rapport aux caractéristiques.

5.4.3 Les carbures

Le carbure de silicium est le plus usité en garniture mécanique. Il a des caractéristiques mécaniques voisines du nitrure de silicium et il possède une capacité d'échange thermique bien supérieur. Il sert à confectionner des échangeurs thermiques. Sa tenue aux produits corrosifs est très bonne. Son coût est nettement inférieur à celui du nitrure de silicium.

6 LE CARBURE DE SILICIUM

6.1 Présentation du SiC

Le carbure de silicium est une matière dure, réfractaire, résistant bien aux chocs thermiques. Sa densité (environ 3) est nettement plus faible que celle du carbure de tungstène.

Le carbure de silicium est obtenu par frittage. Il existe le frittage sans pression, le plus couramment utilisé et le frittage sous pression offrant une compacité maximale mais pénalisant en terme de coût. Il s'agit naturellement d'une présentation des principes. Chaque fournisseur apporte les améliorations qu'il juge nécessaire (traitement de la poudre, additifs, cycles de cuisson) en fonction de ses connaissances théoriques et des retours d'expérience.

Le carbure de silicium existe sous deux formes cristallographiques :

- alpha-SiC, hexagonal, stable à haute température, obtenu par réduction de sable de silice par le carbone dans un four à arc ;
- beta-SiC, cubique, stable à basse température, se transformant en alpha-SiC à des températures supérieures à 2 000 °C.

Les produits finis contiennent les deux types de cristallographie dans des proportions variant en fonction des modes d'élaboration. Ceci conduit à l'existence de plusieurs types de carbures de silicium, présentant des caractéristiques différentes.

6.1.1 Le frittage sans pression

6.1.1.1 Le carbure de silicium fritté réaction

Le carbure de silicium fritté réaction est aussi appelé RBSC (Reaction-Bonded SiC)

Un mélange de poudres comprenant, du carbure de silicium-alpha, du graphite et un liant chargé de faciliter l'opération est compacté mécaniquement. L'ébauche compactée poreuse est usinée pour obtenir les dimensions souhaitées, chauffée dans un four à 1 700°C puis imprégnée de silicium fondu par infiltration. Ce dernier est aspiré dans la structure par effet capillaire et réagit avec le carbone pour former du carbure de silicium-beta parmi les grains en carbure de silicium-alpha.

Le produit fini possède une structure dense à grain fin (2 à 50 μm), comprenant des grains enchevêtrés avec la présence d'une proportion de silicium libre (10 à 12 %).

Le procédé se déroule pratiquement sans changement dimensionnel. Il est ainsi possible de produire des formes ayant des tolérances dimensionnelles serrées mais dont l'épaisseur ne peut pas dépasser 20 mm. La réaction fortement exothermique pourrait entraîner la fissuration de la pièce.

Le RBSC possède un haut niveau de résistance jusqu'à une température de 1 400 °C.

6.1.1.2 *Le carbure de silicium fritté naturel (Sintered SiC)*

Ce procédé permet de densifier le carbure de silicium sans avoir recours à une charge statique ou à l'introduction d'une seconde phase comme précédemment. Le frittage naturel est une opération délicate pour laquelle le soin apporté à la préparation de la poudre est prépondérant.

La poudre est composée de carbure de silicium-béta. Le mélange est finement broyé et purifié afin de supprimer toute trace de silice, de silicium libre et d'oxygène. Le frittage est effectué sous atmosphère neutre (hélium) à une température de 2100°C. La réaction est favorisée par l'ajout d'activateurs tels que, l'aluminium, le bore et des résines qui disparaissent au cours de la cuisson.

Ce matériau présente une excellente tenue à la corrosion.

6.1.2 *Le frittage sous pression*

Les poudres de carbure de silicium sont mélangées avec des additifs. Le frittage sous pression permet de réduire considérablement la porosité et d'augmenter la résistance mécanique. En contrepartie il entraîne un retrait important.

Il faut distinguer deux types de pressage

6.1.2.1 *La compression à chaud*

La matière première sous forme de poudre ou de pièce compactée est chargée dans un moule en graphite où elle est soumise à une pression pouvant atteindre 20 MPa. Ce procédé plus onéreux que le frittage naturel est limité pour des pièces de formes simples.

6.1.2.2 *Le pressage isostatique à chaud*

Le carbure de silicium pressé à chaud (HPSC : Hot Pressed SiC) constitue un procédé de production de haut niveau technologique. La matière de base est placée dans une enceinte sous pression contenant un gaz inerte et soumise à l'application simultanée d'une pression isostatique élevée 100 à 200 MPa et d'une haute température atteignant 2 000°C.

Le produit fini possède de nombreuses qualités :

- granulométrie très fine,
- porosité nulle,
- excellente résistance thermo-mécanique.

Son coût élevé le réserve à des applications haut de gamme.

6.1.3 Comparatif des différents modes d'élaboration

L'application garniture mécanique nécessite l'emploi d'un matériau offrant une résistance mécanique suffisante pour un coût modéré. Le pressage à chaud certes très performant ne se justifie pas.

Le carbure de silicium fritté sans pression présente des caractéristiques mécaniques moyennes et une excellente tenue à la corrosion.

Le carbure de silicium fritté réaction offre le coût de fabrication le plus faible. Ses caractéristiques mécaniques sont très bonnes pour des températures inférieures à 1 400°C.

C'est donc ce dernier qui est le plus utilisé en garniture mécanique. Il est produit entre autre par TENMAT en Grande Bretagne et par plusieurs fournisseurs allemands.

7 LES PREMIÈRES UTILISATIONS DE CARBURE DE SILICIUM EN GARNITURE MÉCANIQUE

Les premiers résultats ont été assez mitigés. Les caractéristiques particulières de ces matériaux ont fait émerger un certain nombre de problèmes inconnus et insoupçonnés. Nous avons regroupé ci-dessous les principaux problèmes.

Fretage des grains en SiC

BURGMANN frette ses grains dans des pièces en acier inoxydable. Le processus est le suivant. Le porte grain est chauffé dans un four et le grain est mis en place. Lors des premières réalisations, un grain sur deux cassait lors du refroidissement. Burgmann a dû diminuer le serrage exercé par le porte-grain, le carbure de silicium n'étant pas en mesure de supporter le même niveau de contrainte que le carbure de tungstène.

Montage des garnitures

Lors des interventions de montage et de démontage, les monteurs sont parfois amenés à choquer accidentellement les pièces. Le carbure de silicium est très sensible aux chocs, même faibles, tout particulièrement à proximité des angles. Les chocs produisent des écaillages qui rendent les pièces inutilisables. Les montages cartouche ont permis de limiter ces incidents.

Amorces de ruptures dans les changements de section

Nous avons vu précédemment que les fissures se propageaient très rapidement. Il est indispensable de bannir les formes qui peuvent entraîner des concentrations de contraintes : angles vifs, changements de section, alésages, etc.

Les concepteurs de garnitures ont dû revoir la forme des grains pour supprimer ces zones à risques.

Des écaillages ont également été rencontrés au niveau des surfaces d'appui des pions d'entraînement. Le contact pion cylindrique / grain tournant s'effectue sur une génératrice. Lors de transitoires, la pression de contact peut être importante et occasionner des écaillages. Certains constructeurs de garnitures ont augmenté le diamètre des pions ou/et réalisé des méplats afin d'augmenter la surface de contact.

L'appellation des produits

Nous avons vu précédemment que les termes génériques tels que, carbure de silicium, couvrent une vaste gamme de produits pouvant être élaborés de multiples façons et possédant des caractéristiques différentes. Certains constructeurs de garnitures, parfois mal informés ou devant faire face à des ruptures de stock en ont fait la dure expérience.

Deux carbures de silicium d'origines différentes avaient lors du fonctionnement des comportements et des tenues à l'usure très différents. Sous la pression des utilisateurs, les fournisseurs ont fourni des informations complémentaires sur les modes d'élaboration et sur leurs caractéristiques. En fait, il ne faut pas parler de bon et mauvais carbure de silicium, mais de ceux qui sont ou non adaptés à l'application visée.

En ce qui concerne l'application garniture mécanique, les carbures de silicium frittés réaction sont mieux adaptés aux contraintes thermo-mécaniques que les carbures de silicium frittés naturellement. En revanche ces derniers ont un excellent comportement en milieu corrosif et conviennent parfaitement par exemple pour des échangeurs de chaleur à haute température.

Les fournisseurs

Au début des années 1980, de nombreux fournisseurs de produits céramique étaient présents sur le marché et les débouchés paraissaient importants dans le secteur des pièces mécaniques en général et dans l'automobile en particulier. Les développements d'applications ont nécessité de gros investissements. Malheureusement, les nombreux problèmes techniques rencontrés ont freiné cette expansion et donc les retours d'investissement. Quelques années plus tard, les fournisseurs ont pour la plupart été repris par des groupes industriels de taille internationale qui ne peuvent se permettre de poursuivre les investissements en attendant des jours meilleurs. Pour répondre à des impératifs de standardisation, les gammes de produits ont été profondément remaniées. Les clients ont dû mener leurs propres investigations pour déterminer les matériaux les plus approchants et procéder à de nouveaux essais de qualification.

Afin de centraliser les informations relatives aux principaux produits distribués et à leurs fournisseurs, le département MACHINES a réalisé en 1989, un fichier matériau. Ce document, d'accessibilité EDF contient :

- un présentation rapide des matériaux à usage thermo-mécanique,
- des tableaux fournisseurs/produits, utilisation/matériaux.

Pérennité de la qualité des produits

Chaque fabricant de garnitures a sélectionné deux ou trois fournisseurs de matériaux. Les nuances à utiliser sont en général définies après des essais de qualification. L'expérience a montré que des nuances ayant des références identiques faisaient apparaître des matériaux aux caractéristiques lointaines. Il fut très difficile d'obtenir des informations de la part des fournisseurs. Certains reconnaissaient que leur nuance avait (favorablement) évolué mais qu'ils préféraient conserver l'appellation bien connue et appréciée de leurs clients.

Les caractéristiques peuvent varier d'un lot de fabrication à l'autre. Nous avons vu dans les chapitres précédents que les modes d'élaboration sont très pointus et parfois difficiles à reproduire. Des pièces frittées en même temps peuvent également présenter des caractéristiques différentes en fonction de leur position dans le four : porosité importante, surfrittage, etc..

Contrôles

Les pièces en céramique sont difficiles à contrôler à l'issue de la fabrication. Les contrôles dimensionnels, de dureté ou de densité ne posent aucun problème. En revanche les autres contrôles sont pour la plupart destructifs, ils ne peuvent être réalisés que sur des échantillons souvent non représentatifs des pièces réelles. Il n'est pas concevable de procéder à des essais destructifs sur des pièces neuves. Le matériel nécessaire à l'analyse de ces produits est très spécifique et les laboratoires métallurgiques classiques n'en disposent pas.

Lorsque nous avons rencontré des détériorations inexplicables, nous avons confié les pièces aux fournisseurs pour expertise. A chaque fois, ces derniers n'ont pas pu fournir d'explication et ont conclu que leurs matériaux n'étaient pas en cause. Nos demandes répétées et insistantes n'ont pas abouti.

Normalisation

Ces nouveaux matériaux souffrent cruellement d'un manque de normalisation. La procédure de normalisation a démarré timidement il y a quelques années. Cela concerne actuellement la préparation des poudres à usage thermo-mécanique, la densité apparente, la dureté et la porosité (ouverte et totale) des produits finis.

Les caractéristiques indiquées dans les documentations ont été obtenues après essais réalisés par les fournisseurs eux-mêmes. Certains d'entre eux reconnaissent que les caractéristiques peuvent évoluer dans une fourchette de plus ou moins 15%. Naturellement les fournisseurs ne réalisent pas les essais dans les mêmes conditions : flexion 3 ou 4 points, dureté, etc.

Les comparaisons entre différents matériaux sont rendues difficiles voir impossibles. Une norme expérimentale concernant la résistance à la rupture par flexion a été ébauchée en 1989 et elle devrait voir le jour prochainement.

Certains critères comme la résistance aux chocs thermiques n'apparaissent que sous forme de remarques subjectives : excellente résistance aux chocs thermiques. Excellente par rapport à quoi ?

Afin d'y voir plus clair, nous avons fait réaliser à plusieurs reprises des essais de caractérisation dans des laboratoires universitaires. Ces essais ont mis en évidence une grande dispersion de résultats. Différents échantillons d'un même matériau, approvisionnés en même temps ont été soumis successivement à des conditions d'essais identiques. Pour les essais en flexion, par exemple, la dispersion des résultats est très importante. Ceci s'explique par la structure non homogène des matériaux céramiques. Si une contrainte traverse une zone contenant un gros pore, une fissure s'initie et c'est la rupture à plus ou moins court terme. En revanche, si le matériau est localement très dense, l'échantillon est intact après plusieurs milliers de cycles.

CONCLUSIONS

Ces exemples mettent en évidence que l'utilisation d'anneaux en céramique nécessite d'étudier tous les aspects. Il est indispensable de raisonner spécialement vis-à-vis des céramiques, tant au niveau bureau d'études, qu'au niveau achat ou montage.

Ceci est valable pour toutes les applications thermo-mécaniques. Cette "culture" a mis un certain temps à passer dans les moeurs et les matériaux céramiques ont subi de nombreuses contre-références qui ont accentué la méfiance des utilisateurs et freiné le développement. C'est le cas particulièrement pour les moteurs automobiles. Dans les années 80, les programmes de recherche sur les moteurs entièrement céramisés étaient très ambitieux. Il s'agissait de construire un moteur "adiabatique" capable de fonctionner à 2 000 °C. Dix ans plus tard il n'a toujours pas vu le jour et seules quelques inserts en céramique sont apparus dans les moteurs.

Heureusement, dans le domaine des garnitures mécaniques d'étanchéité, les problèmes ont pu être isolés et résolus.

8 LA RECHERCHE DES CARBURES DE SILICIUM APPROPRIÉS

Face à ces incertitudes, EDF a fait pression auprès des fournisseurs de garnitures pour qu'ils garantissent une qualité constante d'approvisionnement. Ces derniers ont défini des appellations internes. BURGMANN préconise depuis plus de 10 ans l'emploi du BUKA 20. Il s'agit d'un carbure de silicium fritté réaction. Sa provenance n'est pas donnée et il est probable que Burgmann s'approvisionne chez au moins deux fournisseurs différents.

LATTY ou ROPAC jouent la transparence en nous communiquant le nom de leur fournisseur.

Les constructeurs ont dans un premier temps procédé à des essais élémentaires comparatifs des carbures de silicium disponibles. Différents couples de matériaux ont été successivement testés dans des conditions identiques. Les essais ont été réalisés avec des anneaux de petite dimension immergés dans l'eau et soumis à des conditions de fonctionnement peu sévères : faibles pressions et faibles vitesses. Il s'agissait surtout de juger l'adéquation des deux matériaux dans l'eau.

Le ou les matériaux ayant donné les meilleurs résultats ont ensuite été testés par le constructeur sur des bancs d'essais permettant de recréer les conditions nominales de fonctionnement.

Enfin, à l'issue de la qualification chez le constructeur, la garniture mécanique était essayée aux conditions nominales et accidentelles sur le banc EDF des Etudes et Recherches avant l'essai industriel d'un an en centrale.

Ce long processus de qualification appliqué aux étanchéités des pompes alimentaires et de sauvegarde a permis de mettre en évidence un certain nombre de problèmes et d'y remédier.

Actuellement les carbures de silicium proposés par les fournisseurs de garnitures donnent entière satisfaction.

9 LES CARBONES FRITTÉS

9.1 *Présentation*

Les produits à base de carbone sont très anciens et largement utilisés dans l'industrie mécanique : coussinets de paliers, segments de pistons, garnitures mécaniques d'étanchéité, palettes pour pompes rotatives, etc.

Il existe une infinité de variétés de "carbones" constitués en proportion variable de carbone amorphe, de graphite naturel ou synthétique, de liants, de métaux. Le dosage judicieux de ces composants confère au produit fini des caractéristiques lui permettant de supporter les contraintes imposées pour une application donnée.

L'oxydation du carbone croît rapidement avec la température. En atmosphère oxydante, son utilisation est limitée à 500 °C.

Le carbone est chimiquement inerte et sa porosité varie entre 10 et 20%. En mécanique, afin d'accroître sa résistance mécanique, il est nécessaire de combler les porosités à l'aide d'un imprégnant. Le produit fini ne possède alors plus toutes les caractéristiques du carbone : inertie chimique, tenue en température, porosité, etc.

9.2 *Produit de base*

Le carbone est largement présent sur notre planète. Les produits naturels comprennent de nombreuses impuretés qu'il est nécessaire d'éliminer avant de les utiliser. Les produits de base sont généralement constitués de :

- cokes dérivés de houille ou de résidus de distillation de pétrole brut,
- de noirs de fumée obtenus par combustion de pétrole brut ou de gaz en atmosphère oxydante,
- de graphite naturel.

9.3 *Mode d'élaboration*

Les matériaux de base sont réduits en poudre, mélangés à un brai ou un goudron et moulés par pression ou extrusion aux formes et dimensions désirées.

Le produit alors obtenu est chauffé à 1 000°C en atmosphère neutre. A l'issue du frittage, la pièce finie est constituée de carbone amorphe ou carbone graphite selon le matériau de base. Le brai disparaît lors de la cuisson en donnant naissance à la porosité.

Un traitement complémentaire à une température de 2 500 °C permet de transformer le carbone amorphe en électro-graphite à structure cristalline. C'est en fait du graphite synthétique.

Le carbone amorphe et le graphite sont complémentaires. Le premier possède une résistance mécanique bien supérieure au second. En revanche, en raison de sa structure cristalline, le graphite présente un pouvoir autolubrifiant important, une conductibilité électrique et thermique améliorée et une meilleure résistance à l'oxydation.

Les carbones et graphites sont poreux. Afin de les rendre étanche et pour améliorer leur résistance mécanique, il est nécessaire de les imprégner. Il s'agit généralement de résine phénolique, insensible à la corrosion, limitée en température (200°C) ou d'antimoine (température maxi 350°C) sensible à la corrosion et **interdit dans le circuit primaire !**

9.4 *Comportement*

Les premiers carbones utilisés pour les garnitures mécaniques haute performance étaient imprégnés de résine phénolique. Les incidents rencontrés avec les faces en carbure de tungstène ont mis en évidence une tenue à la température trop limitée des carbones. A partir de 200 °C la résine flue. Dès 1980, les carbones imprégnés d'antimoine les ont progressivement remplacés. Leur température maximale d'utilisation est de 350 °C. Pendant plusieurs années, aucune anomalie n'a été constatée.

Les premières dégradations sont apparues il y a quelque années sur les TPA des paliers 900 MW CP2.

9.5 *Nature des incidents*

La détérioration de la face en carbone peut entraîner un débit de fuite important nécessitant son remplacement. Ce type d'incident s'est répété à plusieurs reprises, parfois après quelques milliers d'heures seulement. Plusieurs constructeurs de garnitures ont été confrontés au même problème.

9.6 Analyse des incidents

Certaines pièces usagées, défailtantes ou non, présentent le même type de dégradation. L'aspect visuel de la face de frottement est inhabituel : aspect poreux, présence de cratères plus ou moins importants. Des investigations ont été menées par les exploitants des centrales concernées : qualité de l'eau, conditions de fonctionnement des pompes.

Des analyses effectuées sur ces pièces ont révélé une corrosion sélective de l'antimoine. Cette corrosion est favorisée par la vitesse de glissement au niveau des faces de frottement et par la porosité de la matrice en carbone. Il s'agit en fait non pas du taux de porosité, mais de la taille des pores. L'antimoine est chargé de combler les porosités ouvertes. Si les pores ont à l'échelle macroscopique une taille importante, l'antimoine offre une surface de contact élevée avec le fluide et accélère la corrosion. Le palier 900 MW CP2 est le plus pénalisant vis à vis de la vitesse de glissement des faces : 48m/s contre 44 m/s pour le N4, 43 m/s pour le CP1 et 40 m/s pour le palier 1300 MW.

9.7 Résolution des incidents

Pour des raisons de tenue en température il est impératif d'utiliser des carbones imprégnés d'antimoine. Les fournisseurs proposent d'utiliser des carbones à granulométrie très fine. Les premières utilisations semblent donner satisfaction.

10 LE CARBONE SILICÉ

10.1 Présentation

C'est un composé de carbone synthétique à coeur et de carbure de silicium en surface. Ce matériau a été élaboré dans le but de regrouper les avantages de ces deux composants c'est à dire la ductilité du carbone et la dureté de surface du carbure de silicium. Des essais ont été réalisés en 1981 sur le banc EDF-DER à CHATOU avec des garnitures BURGMANN.

Ce matériau développé dans un premier temps par SCHUNK et EBE doit permettre d'aboutir à un coût de production peu supérieur à celui d'un carbone.

10.2 Procédé de fabrication

Le carbone silicé résulte de l'imprégnation d'un électrographite relativement poreux par du silicium en fusion. La pièce en carbone est usinée aux cotes finales. Elle est ensuite plongée dans un bain de silicium liquide porté à 2 000 °C. Cette opération est effectuée sous vide. Le silicium migre au travers des porosités ouvertes du carbone et réagit avec celui-ci. La pièce est ensuite débarrassée du silicium résiduel par un décapage à la soude.

Schunk et Ebe produit trois nuances de carbone silicé, SiC 20, 30 et 40. C'est la nuance SiC 30, offrant le meilleur compromis résistance mécanique, conductibilité thermique, profondeur d'imprégnation, qui a été retenue pour l'application garniture mécanique.

La réaction n'est pas totale et le produit final est constitué de trois phases dont les proportions sont à peu près les suivantes :

- carbone libre : 55 %,
- SiC : 45% (dont 95% de carbure de silicium beta),
- silicium libre : moins de 1 %.

La profondeur d'imprégnation ne peut pas excéder 10 mm. Cette imprégnation entraîne un gonflement de 2 à 3 % en volume. Il est nécessaire de reprendre la pièce en polissage avec outils diamantés pour obtenir la cote finale.

Le carbone silicé possède une excellente résistance aux chocs thermiques (à peu près égale à celle de l'électrographite) et une étanchéité absolue.

10.3 *Caractéristiques*

Ce matériau hybride semble bien adapté à l'application garniture mécanique qui réclame une dureté de surface associée à une ductilité du produit et une conductibilité thermique la plus élevée possible.

Comme pour les céramiques, les propriétés physiques du carbone silicé dépendent de :

- la taille des grains et des pores,
- la proportion de la conversion en carbure de silicium,
- la profondeur d'imprégnation.

La résistance en flexion et la dureté augmentent avec la finesse du grain.

Inversement, la profondeur d'imprégnation, la teneur en silicium résiduel, la conductibilité thermique et la résistance aux chocs thermiques augmentent avec la taille des grains.

Enfin, le module d'élasticité diminue quand le grain s'affine et quand la profondeur d'imprégnation diminue.

10.4 *Résultats des essais effectués par EDF-DER*

Une garniture équipée d'un anneau en carbone silicé face à un anneau en carbone liant résine a été essayée pendant 3 600 heures. Le débit de fuite était instable et trop important pour être admissible en permanence sur une pompe en exploitation. A l'issue du démontage, l'expertise des pièces n'a révélé aucune anomalie des faces de frottement. Faute d'explication, les essais ont été abandonnés.

10.5 *Utilisation du carbone silicé*

L'utilisation de ce matériau ne s'est pas développée pour les garnitures d'étanchéité fonctionnant en eau. La supériorité de ce matériau n'a pas été clairement démontrée. Son fournisseur le recommande en frottement contre lui-même pour des fluides visqueux tel que les huiles ou le pétrole.

11 LES COUPLES DE MATÉRIAUX RETENUS

Matériau dur

Le carbure de silicium a progressivement remplacé le carbure de tungstène monté d'origine sur les pompes alimentaires des paliers nucléaires 900MW CP1 et CP2. Il a équipé d'origine les paliers suivants (1300 MW, N4). En ce qui concerne les pompes de sauvegarde la démarche a été identique.

Les dégradations de carbures de silicium sont maintenant très rares et ponctuelles. Ceci peut s'expliquer par la qualité des modes de fabrication qui a progressé depuis douze ans et par les

critères de sélections imposés par les constructeurs de garnitures. La plupart des fournisseurs de matériaux céramiques proposent des lignes de produits évoluant peu.

Pour les applications nous concernant, c'est le carbure de silicium fritté réaction qui offre le meilleur rapport qualité/prix. Le pressage à chaud plus coûteux ne se justifie pas, en revanche le frittage naturel ne présente pas de qualités mécaniques suffisantes.

Matériau tendre

Le carbone imprégné d'antimoine donne globalement satisfaction. Les problèmes de corrosion sélective de l'antimoine sont apparemment expliqués. L'utilisation de carbones ayant une porosité plus fine doit être en mesure d'éviter les dégradations.

12 REMISE EN ÉTAT DES ANNEAUX CARBONE ET CARBURE APRÈS USAGE

Lors de révisions périodiques ou d'incidents sur les pompes, les étanchéités sont démontées. Chaque composant de la garniture est inspecté. Les anneaux carbone et carbure font l'objet d'un examen détaillé. Plusieurs types de dégradations sont possibles et nécessitent la remise en état ou le changement de la pièce.

Dégradation hors face de frottement

Il s'agit le plus souvent d'écaillages. Ils peuvent être dûs à des chocs lors d'interventions ou être situés au niveau des points de contact avec les pions d'entraînement. Généralement la pièce n'est pas réparable.

Dégradation au niveau des faces de frottement

Il s'agit en général de rayures, de déchaussements de grains ou d'éclats. Pour les pièces en carbure de silicium, si la profondeur n'excède pas 2/10 mm, le resurfaçage est possible. Au delà, il faut remplacer la pièce. En ce qui concerne les anneaux en carbone, il suffit de vérifier qu'après resurfaçage la hauteur du nez de carbone soit suffisante pour fonctionner jusqu'au prochain démontage programmé.

Ces opérations de resurfaçage s'effectuent chez les constructeurs de garnitures. Certaines centrales nucléaires disposent de machines de polissage. Le contrôle de la planéité doit être effectué par méthode interférométrique (lame de quartz à faces parallèles) et lumière monochromatique. La visualisation des franges d'interférence requiert une grande habitude. Par ailleurs, le profil d'origine de certains interfaces n'est pas plan.

13 LES PRÉCAUTIONS A PRENDRE AVANT DE CHOISIR ET D'UTILISER UN MATÉRIAU CÉRAMIQUE

Avant de choisir un matériau céramique, il est indispensable de prendre en compte toutes les caractéristiques. Le matériau universel n'existe pas et le choix doit reposer sur le meilleur compromis.

Voici un certain nombre d'écueils à éviter. La liste n'est pas exhaustive et votre expérience actuelle et à venir vous permettra de la compléter.

- ne pas se polariser sur sa dureté mais prendre en compte sa fragilité,
- vérifier sa bonne conductibilité thermique afin de ne pas concentrer la chaleur,

- s'assurer de sa résistance aux chocs thermiques,
- raisonner en terme de couple en considérant la compatibilité avec le matériau opposé,
- ne pas remplacer une pièce en acier par une pièce en céramique sans tenir compte des caractéristiques particulières d'une céramique (fragilité, amorces de ruptures et écaillages dans les angles vifs, coût des usinages) regarder la compatibilité avec les pièces environnantes (dilatation différentielle)
- vérifier que les éléments entrant dans la composition du produit soient autorisés en milieu nucléaire (cobalt, antimoine, plomb...)
- s'assurer que la qualité du produit est constante dans le temps et si possible de la "solidité" financière du fournisseur.