Université de Montréal

Description technico-économique de procédés de production du carbure de silicium (SiC)

par

Anne Grenier

Département de génie industriel

École polytechnique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade
de maître es sciences appliquées **(M.Sc.A.)**

mars 1989

Anne Grenier 1989

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Canadian Theses Service
Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada
K1A 0N4

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

The author retains ownership of the copyright in his/her thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège sa thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

ISBN 0-315-58178-6

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE **POLYTECHNIQUE**

Ce mémoire intitulé:

Description technico-économique de procédés de production du carbure de silicium (SiC)

présenté par: Anne Grenier

en vue de l'obtention du grade de: M.Sc.A.

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. Michel Normandin, D.Sc.A., président-rapporteur

M. Daniel Leblanc, **Ph.D.**

M. Michel Rigaud, D.Sc.A.

M. Jorgen Elbrond, **M.Sc.**

SOMMAIRE

L'objectif principal de ce mémoire est d'analyser les possibilités de produire, au Québec, du carbure de silicium utilisable comme matériaux céramiques avancées (MCA). Pour ce faire, nous avons étudié plusieurs aspects dans le domaine des céramiques. Nous avons tenu, avant tout, à démystifier ce que sont ces nouveaux matériaux et, en second lieu, à déterminer l'importance et la place du carbure de silicium en tant que matériau céramique avancée.

Ce mémoire est constitué de six chapitres, qui se regroupent en deux parties: la première partie (chapitres 1, 2, 3) couvrant certaines généralités sur l'ensemble des céramiques avancées; et, la seconde partie (chapitres 4, 5, 6) s'intéressant, cette fois, plus spécifiquement au carbure de silicium.

Les deux premiers chapitres donnent une brève description des céramiques et mentionnent leurs principales applications industrielles. Quant au troisième chapitre, il décrit les différents procédés de fabrication des céramiques, alors que les deux chapitres suivants s'intéressent essentiellement à la production du carbure de silicium MCA, soit par le procédé Acheson (chapitre 4), soit par de nouveaux procédés de synthèse (chapitre 5). Le dernier chapitre, pour sa part, établit une comparaison entre les différents procédés élaborés au Canada et souligne également les avantages reliés à chacun. Finalement, la .:onclusion donne un aperçu de la

situation canadienne et s'interroge sur l'orientation et les mesures à adopter, si l'on veut se tailler une place enviable dans le développement de ces nouveaux matériaux.

ABSTRACT

The main purpose of this study is to analyse the possibilities of producing, in Québec, a viable silicon carbide such as advanced ceramics materials (ACM). Toward this end, we have examined the discipline of ceramics from many angles. We aim to demystify these new materials and deterrnine the importance of silicon carbide, especially advanced cerarnic material.

This dissertation consists of six chapters organized into two parts. The first section (chapters one, two and three) covers selected generalizations about the body of advanced ceramics. The second section (chapters four, five and six) concentrates specifically on silicon carbide.

The first two chapters offer a brief description of ceramics, with emphasis on their main industrial applications. The third chapter specifies various procedures for making ceramics. The ensuing two chapters concern, for the most part, the process of producing silicon carbide (ACM) according to the Acheson process (chapter four), and some new methods of producing synthetic carbides (chapter five). The last chapter compares the various, elaborate procedures now common in Canada, giving special attention to the advantages of each. The conclusion presents an overview of Canada's situation, examining the orientation and measures to_be adopted if Canada wishes to carve out a favorable place for itself in the development of these new materials.

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'a,bord mes directeurs de recherche, les professeurs Daniel Leblanc et Michel Rigaud. Enfin, je remercie également le professeur Michel Normandin du département de génie industriel ainsi que le professeur Jorgen Elbrond du département de génie minéral qui ont, tous deux, accepté d'être les lecteurs de ce mémoire.

Je tiens à souligner que sans les précieux conseils des professeurs Daniel Leblanc et Michel Rigaud et de certains experts de l'industrie, la rédaction de ce mémoire n'aurait pas été possible.

Finalement, je remercie Traitement de texte Mareil et Giguère pour la dactylographie et la mise en page de ce texte.

TABLE DES MATIERES

page

SOMMAIRE iv

ABSTRACT vi

REMERCIEMENTS vii

LISTE DES FIGURES x

LISTE DES TABLEAUX xi

INTRODUCTION 1

1. DESCRIPTION DES CÉRAMIQUES 4

1.1 Définition 4
1.2 Propriétés des céramiques 6
1.2.1 Avantages 6
1.2.2 Désavantages 9

2. APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES CÉRAMIQUES 12

2.1 Applications industrielles du carbure de silicium 12
2.1.1 Les pièces thermomécaniques 15
2.1.2 Les pièces thermiques 20
2.1.3 Les outils de coupe 21

3. PROCÉDÉS DE FABRICATION DE LA CÉRAMIQUE..... 23

3.1 Développements dans la fabrication des céramiques 24
3.1.1 Synthèse des poudres et traitement 25
3.1.2 Mise en forme du produit et cuisson 34
3.1.3 Finition du produit et tests de contrôle 40

TABLE DES MATIÈRES (suite)

page

4. LA PRODUCTION DU CARBURE DE SILICIUM PAR LE PROCÉDÉ ACHESON 41

4.1 Généralités 41
4.2 Description du procédé Acheson 42
4.2.1 Consommation d'énergie 47
4.2.2 Coûts de fabrication 49
4.3 Traitements additionnels 55
4.3.1 Procédés de granulation 56
4.3.2 Coûts reliés à l'étape additionnelle de broyage 58

5. PRODUCTION DU CARBURE DE SILICIUM PAR DE NOUVEAUX PROCÉDÉS DE SYNTHÈSE 63

5.1 Procédé au laser 63
5.1.1 Description du procédé 64
5.1.2 Matières requises et conditions de fabrication 66
5.1.3 Caractéristiques des poudres 68
5.1.4 Coûts de fabrication 70
5.2 Procédé Cancarb 74
5.2.1 Description du procédé 74
5.2.2 Caractéristiques des poudres 75
5.2.3 Coûts de fabrication 75
5.3 Procédé de C-Axis Technology 75
5.3.1 Caractéristiques 76
5.3.2 Coûts de fabrication 77
5.4 Comparaison des coûts (prix) estimés 77

6. AVANTAGES ET RECOMMANDATIONS PROPRES À CHACUN DES PROCÉDÉS 80

6.1 Procédé Canbarb 80
6.2 Procédé Acheson 81
6.3 Procédé de C-Axis Technology 82

7. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES 84

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 88

LISTE DES FIGURES

page

Figure 1 Champs d'utilisation des céramiques avancées 5

Figure 2 Progrès dans les propriétés de matériaux 11

Figure 3 Fonctions, propriétés et applications des matériaux céramiques avancées . . 14

Figure 4 Progrès accomplis dans l'augmention de la t ° à l'entrée d'une turbine 17

Figure 5 Importance de la géométrie et de la chimie des particules dans la performance des céramiques 26

Figure 6 Organigramme du procédé par polymérisation 32

Figure ,7 Distribution des coûts selon les facteurs de production 39

Figure 8 Organigramme du procédé Acheson 43

Figure 9 Échelle de prix pour le SiC 61

Figure 10 Chambre de réaction 65

LISTE DES TABLEAUX

page

Tableau 1 Propnetes des cerarmques 7

Tableau 2 Résumé des coûts de production pour le SiC Acheson 55

Tableau 3 Caractéristiques des différents procédés de granulation 58

Tableau 4 Prix reliés à la grosseur des particules 59

Tableau 5 Conditions requises pour le traitement du Si, Si_3N_4 et SiC 68

Tableau 6 Caractéristiques de la poudre du Si, Si_3N_4 et SiC 69

Tableau 7 Propriétés des trichites 76

Tableau 8 Coûts de fabrication - prix de vente 78

INTRODUCTION

Au cours des dernières années, des développements considérables ont été accomplis dans de nombreux secteurs de pointe nécessitant, par le fait même, l'élaboration et la mise au point de nouveaux matériaux aux propriétés mécaniques, électriques, chimiques et thermiques supérieures.

Un survol des différentes études effectuées sur le sujet nous montre, à quel point les céramiques avancées constituent un enjeu important dans le développement des nouveaux matériaux. Jusqu'à maintenant, les scientifiques ont démontré leur faisabilité technique ainsi que les avantages économiques et environnementaux rendus possible grâce à leur utilisation dans de nombreux secteurs tels les pièces de moteurs, les outils coupants, les échangeurs de chaleur, les pièces résistant à l'usure, etc.

Bien que plusieurs matériaux céramiques avancées semblent très prometteurs, nous nous intéresserons ici au carbure de silicium (SiC).

Pourquoi le carbure de silicium ? Premièrement, parce que l'importance pour l'industrie canadienne de se tailler une place au sein de ce nouveau groupe de matériaux est primordiale. En effet, on constate que sa production mondiale a atteint 400 000 tonnes par an en 1960, qu'elle a connu un sommet de 475 000 tonnes

au-delà des années 70, mais qu'elle est retombée à 400 000 en 1981 et maintient un niveau de 450 000 tonnes aujourd'hui. La cause principale de ce déclin est due au fait que 95% de la production totale du carbure de silicium a été consommé par l'industrie des abrasifs, des réfractaires et métallurgique et que, par conséquent, la présence de substituts moins coûteux dans ces secteurs contribue à diminuer la demande et à empêcher la croissance qui pourrait être créée par de nouveaux marchés.

Ainsi, l'habileté à mettre au point des nouveaux procédés pour la synthèse du SiC MCA constitue un facteur déterminant pour la croissance de l'industrie du carbure du silicium, car si elle ne réussit pas à s'accaparer une part de ce nouveau marché, sa production totale ne fera que décroître ou, tout ou plus, restera stable.

Enfin, un dernier point pour justifier notre intérêt pour la production du carbure de silicium est, que le choix de l'endroit pour l'implantation d'une usine dépend, en grande partie, du prix et de la disponibilité de l'énergie électrique et, qu'actuellement, nous possédons cet avantage au niveau énergétique.

Voici d'une façon plus détaillée, ce qu'on retrouve dans ce mémoire. Dans le premier chapitre, nous donnons une description des céramiques en faisant la distinction entre les céramiques traditionnelles et les céramiques avancées. Nous mentionnons également les principales propriétés des céramiques avancées et les

avantages qu'elles offrent par rapport aux métaux. Le deuxième chapitre énumère les différentes applications des céramiques avancées en insistant, par après, sur les applications du carbure de silicium. Quant au troisième chapitre, il s'intéresse aux développements et aux progrès connus au cours des dernières années, et ce, à partir de la synthèse des poudres jusqu'à la finition du produit et tests de contrôle. Le chapitre suivant se concentre strictement sur la production du carbure de silicium par le procédé Acheson et des possibilités, à partir de celui-ci, de produire du SiC utilisable comme matériau céramique avancée. Encore une fois, le cinquième chapitre porte sur la production du SiC MCA mais, cette fois, par de nouveaux procédés de synthèse. Le dernier chapitre, quant à lui, fait le point sur les différentes possibilités de fabriquer, au Canada, du carbure de silicium pour les secteurs de haute technologie. Enfin, pour terminer, une brève analyse de la situation canadienne apparaît à la fin de ce mémoire. Celle-ci tient compte, d'une part, de la meilleure orientation à choisir pour le Canada et, d'autre part, des obstacles qui devront être surmontés, si l'on veut devenir compétitif dans le domaine de ces nouveaux matériaux.

1. DESCRIPTION DES CÉRAMIQUES

En premier lieu, cette section définit ce que sont les céramiques. Par la suite, nous mentionnons les propriétés qui les caractérisent en insistant sur les avantages et désavantages qui en découlent.

1.1 Définition

Les céramiques sont des matériaux inorganiques, traités et consolidés à des températures élevées. Pour encore plus de 50% des céramiques en poids, les matières premières proviennent de roches silicoalumineuses (composées de silicium, d'aluminium et d'oxygène). Ces matériaux sont des composés métal-métalloïdes, pouvant être cristallisés ou amorphes (SiO_2 : quartz ou silice vitreuse). Les céramiques peuvent être divisées en deux groupes: l'un englobant les céramiques traditionnelles; l'autre, les céramiques avancées.

Les céramiques traditionnelles sont celles qui correspondent à l'industrie des silicates produits à base d'argile, ciments et verres. Les utilisations de ces céramiques sont généralement limitées aux domaines de la construction et des biens de consommation. On peut citer principalement: la brique, les carreaux: en céramique, la poterie, la vaisselle, les isolants, les appareils sanitaires, les abrasifs, le verre et les matériaux: réfractaires.

Quant aux céramiques avancées, elles sont de nouveaux matériaux que l'on retrouve parmi les oxydes, les carbures, les borures, les nitrures et, plus fréquemment, sont une combinaison de ces diverses matières (Al_2O_3, ZrO_2, UO_2, Si_3N_4, SiC, etc...).

Un contrôle plus rigoureux dans la composition des matières premières ainsi que l'utilisation de nouvelles techniques dans leur traitement et mise en forme amènent une amélioration générale de leurs propriétés par rapport aux céramiques conventionnelles. De plus, on a mis au point de nouvelles compositions de matériaux qui possèdent des propriétés supérieures.

En général, ces céramiques à plus haute valeur ajoutée servent de composants dans le domaine de l'électronique, de l'outillage, de l'équipement industriel, des pièces de moteur et de la médecine avec la bio-céramique. La figure 1 énumère les différents champs d'utilisation que peuvent avoir ces céramiques de pointe.

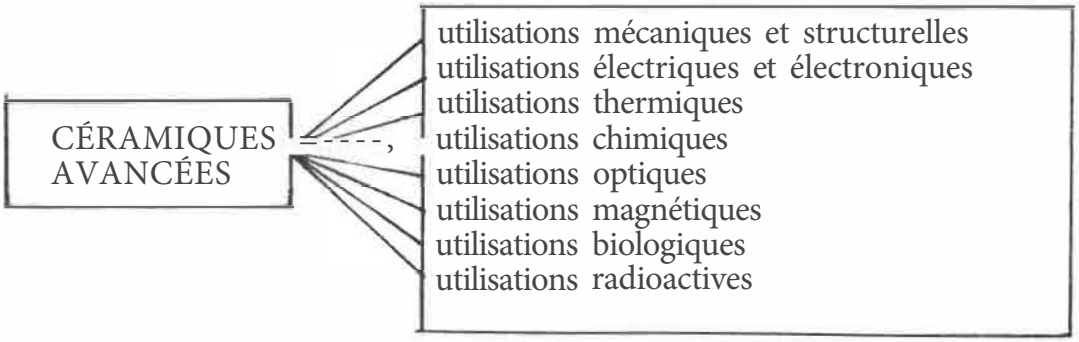


Figure 1
Champs d'utilisation des céramiques avancées

1.2 Propriétés des céramiques

Les propriétés des céramiques sont dues à la nature et à l'intensité des liaisons atomiques. Les produits céramiques ne se caractérisent pas par des propriétés uniques, mais peuvent présenter des caractères semblables dus à la nature similaire de leur liaison. En jetant un coup d'oeil sur le tableau 1, lequel indique leurs caractéristiques, on remarque que plusieurs d'entre elles présentent à la fois des propriétés remarquables et d'autres médiocres.

Voyons d'une façon détaillée, les avantages et désavantages de leurs utilisations en comparaison avec celles des métaux.

1.2.1 Avantages

• **Matières premières** - Elles sont obtenues à partir de matières premières très abondantes. Les roches d'où elJes proviennent constituent 95% de l'écorce terrestre.

- **Masse volumique** - Les céramiques possèdent des masses volumiques inférieures à celles de l'acier et de la fonte grise. L'allégement des moteurs et turbines dû à leur utilisation permettrait une économie de carburant, aussi bien dans le secteur des transports routiers qu'aériens.

Tableau 1

Proprit5tés des céramiques

	Du,M1f	CaCNkin1 ◊ dtbUtiOl'I	Conduni.,j1t ttw,ffi'q- IW/mKI	Mdlo.t cf'tla.atiritf tGpal	--..,11,... M'Itrx,Îon/ COffifil"I'•kon IMP,I	T,.r111i1rt i"111i◊ution M&Jltm1.. !°CI	t..,... •.,. •t111lon C°CI	T"ach6 IK1CI .. ,,Y...	R•lluanc.e 6 la Uu.lon 6 lem- pfnh,1,w •m• bJant• IMPa)
••• METAUX									
ç:1.,g..: ◊·11um1nium	21	21	160	IS	2JO	¹00	600-650	25	nO
Fonit 91,ur	1.6		◊	110	280	650	1600	40	2&0
N1monic	1.3	15	,0	210	I 100	1000	1370	80	1100
•• CERAMIOU[S									
Al.,1mint hiltft Carbu,r ck silicium	4	•	11	380	ISOIOOO	1.00	2000	•	JOO
t,111t (SSC)	3,1	4,6	100	400	500/J 500	1650	2600'	4,6	600
N1:i.,,t dt' 1ihc1um tuttf p:., ,hctiun	1.,	3	18	110	300/I ,00	1450	1800'	2.6	200
H,11u1t ur 11i1tium p1cut a ch-1ud	3.2	3,b	25	310	I00{7 600	1400	1IOO'	1	700
Sa,ion 211co11r panirlirmtl'II	3.2	4,1	,0	290	I00I3 000	1450	1800'	—	460
Jt1bil,1fr	P	,••	2.S	200	,SON 100	1100	2680	•	600
T,un:i1r d'aluminium	3.2	2,S	2	IS	50/S50	1200	1700	1	JS
C, FIBRES CERAMIQUES J..011GUES	Drm11rf	Oi.mlu• tuml	Lonp.,ru! 1mm)						
t,,w,rdr 1,l,cium } Nippon C..-Lion	'IS'	10• 10	LOnl•nuu	201 a 234	3!,00	1250			
Alumine } Tvto	3,99	2W•	Continur,	460	2400	2000			
Sumi1omo	3.2		Con1inur1	2!0	2600	1JOO			
H I	2,5	H	Contt'L>n	1!>0	17!,0	1300			
Duponl	395		Con1inut1	:190	JOOO	1100			
d1N1mollrl									
0 - FIBRES CERAMIOUES COURIIS									
(11k◊1tt dt ,.i,,iym } Toi.•• h1rho	3.11	0.1-0,5	o.os ·0,2	400-700	3000-IfIOO	IOO			
	3.21	0,OS -0,:I	0,01 ·O.IM	400	21 000	100			
Alurninr• S,t,ct ICI	3J	u	0,15-!>0	300	2000	1,00			
• T◊r,n,.,,. Œ S41b/,,n,oon									

SOURCE: D. Cotto *et* al. [9].

- **Dureté** - Leur dureté est en général très élevée, ce qui les rend très résistantes à l'usure et, par conséquent, en font des matériaux de choix pour les outils de coupe, les pièces de frottement et certaines prothèses chirurgicales (par exemple, la hanche).

- **Fusion** - Les céramiques résistent aux hautes températures. En plus d'être utilisées comme réfractaires, on peut les utiliser dans les parties très chaudes des moteurs.

- **Conductivité thermique** - Généralement, les céramiques démontrent une conductivité thermique assez faible. Si tel est le cas, elles seront d'excellents isolants thermiques. Par ailleurs, si elles possèdent une conductivité thermique plus élevée, comme c'est le cas pour le SiC, elles deviennent alors de bons conducteurs.

- **Stabilité chimique** - Lès céramiques démontrent généralement une faible réactivité chimique. Ainsi, elle sont résistantes à la corrosion (les oxydes sont insensibles à l'oxydation).

- **Résistance à la compression** - Sa limite est très supérieure à la résistance en traction, ce qui est avantageux lors de la fabrication.

1.2.2 Désavantages

- **Fragilité** - La fragilité des céramiques se manifestent de plusieurs façons:

1° **Ductilité** - Elles ne possèdent pratiquement aucune ductilité, c'est-à-dire que contrairement aux métaux, qui peuvent supporter des déformations plastiques avant de se rompre sous l'effet d'une charge, la déformation plastique des céramiques est très faible (0,1% à peine). Elles sont comparables aux métaux pour ce qui est de la charge à la rupture, mais si une déformation trop forte leur est imposée, leur manque de plasticité aboutit à une rupture brutale.

2° **Ténacité** - La ténacité des céramiques, c'est-à-dire leur résistance aux microfissures, est environ dix fois plus faible que celle de l'acier et quatre fois plus faible que celle de la fonte. Ce qui les rend sensibles aux défauts internes et externes.

3° **Chocs thermiques** - Les céramiques y résistent d'autant mieux que leur module d'élasticité et leur coefficient de dilatation sont faibles. Et, étant donné, que la plupart des céramiques possèdent un coefficient de dilatation élevé, cela constitue généralement un désavantage puisqu'il peut y avoir rupture par déformation thermique particulièrement dans les machines fonctionnant à températures variables. Il existe cependant des exceptions comme le carbure de silicium par exemple, qui

possède une faible coefficient de dilatation et, par conséquent, le rend intéressant pour ce genre d'applications.

Malgré les nombreux avantages d'utiliser les céramiques comme substituts aux métaux, cela reste encore impossible pour plusieurs applications. D'un côté, le manque de ductilité rend impossible la mise en forme du matériau à l'état solide comme dans le cas des métaux. Cela signifie que les pièces en céramiques devront être fabriquées avec une extrême précision. D'autre part, la distribution des micro-fissures dans les matériaux céramiques est aléatoire. Cette hétérogénéité est un obstacle à la production de pièces en série.

Il est donc primordial de surmonter le problème de la fragilité si l'on veut élargir les champs d'utilisation des céramiques de pointe. En ce sens, de nombreuses recherches ont été effectuées depuis les dix dernières années, lesquelles ont permis aux céramiques de gagner un terrain considérable en charge à la rupture, ténacité, tenue au fluage et résistance aux chocs thermiques. La figure 2 laisse voir les améliorations de certaines propriétés du carbure et du nitrure de silicium connues durant la dernière décennie.

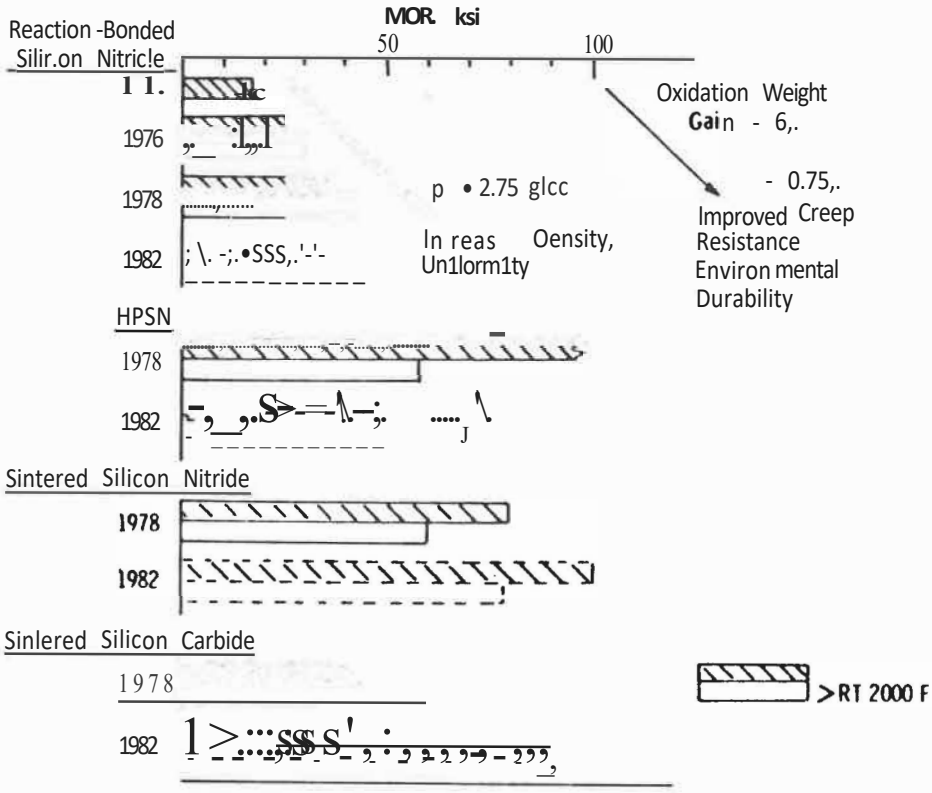


Figure 2

Progrès dans les propriétés de matériaux céramiques

SOURCE: E.M. Lenoe et al. [19], p.5.

2. APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES CÉRAMIQUES

Depuis longtemps, les céramiques sont largement utilisées dans les domaines du bâtiment, des abrasifs et des réfractaires. De plus, elles connaissent depuis quelques années des développements majeurs dans une multitude de nouveaux secteurs industriels. La figure 3 se veut une présentation des diverses fonctions de ces matériaux, tout en mentionnant d'une façon détaillée, les propriétés et les nouvelles applications qui sont rattachées à chacune de ces fonctions. Quant à la section 2.1, elle portera principalement sur les applications industrielles du carbure de silicium.

2.1 Applications industrielles du carbure de silicium

La production commerciale du carbure de silicium à atteint environ 400 000 tonnes par an en 1960. Au début des années 70, elle a atteint dans le monde un sommet de 475 000 tonnes, mais eJle est retombée en 1984, à environ 450 000. La consommation mondiale du carbure de silicium se répartit ainsi:

Applications industrielles	Consommation (%)
Abrasif	40
Produits réfractaires	55
Électricité et nouvelles applications	5

Fonctions	Propriétés	Matériaux	Applications
Mécanique et structurale	Dureté	Alp_3, SiC Si_3N_4, WC	Outils coupants, joints d'étanchéité, pièces rapportées de poinçonneuses
	Résistance à l'usure	Alp_3, $Zr0_2$	Paliers, tuyères de fusées outillage de décapage au jet de sable, coulisseaux
	Résistance à haute température	SiC, Si_3N_4 PSZ, Sialons	Moteurs diesels, turbines à gaz, buses de brûleurs
Électrique et électronique	Isolation diélectrique	Alp_3, MgU, HeO	Substracts de microcircuits et de circuits multicouches pour des circuits hybrides, bases de diodes. transistors d'énergie et résistances
	Ferroélectriques	$BaTi0_3$. $SrTi0_3$	Condensateurs en céramiques
	Piézo-électriques	PZT	Vibrateurs, oscillateurs, filtres, transducteurs, générateurs d'étincelles, etc.
	Semi-conducteurs	$BaTi0_3$, SiC. ZnO - Bip_3, V_20_5	Then11is1ances (!\TC, PTC, CTR, couche épaisse) Détecteuis de 1emp:'ratwe, compen-saleurs, éléments chauffants, détecteurs de chaleur, cellules solaires
	Conduction ionique	B - Alp_3 $Zr0_2$	Électrolytes solides pour accumulateurs Détecteurs d'oxygène Génératrices thermo-électriques
Thermique	Dilatation	$LiAl_2Si0_6$, $Si0_2$, $MgAl_2Si_20_6$	Régénérateurs Récupérateurs, Jointsd'étanchéité encéramique-métal
	Conductivité	Al_20_3, $Si0_2$, $Zr0_2$ silicates, MgO	Isolation thermique Éléments chauffants Isolation
	Non combustibles	Verres et fibres céramiques, $Zr0_2$,Alp_3, $Si0_2$, BN, $AJB0_3$	Sécurité et protection contre l'incendie
	Absorption et radiation	Silicium amorphe, CDS	Éléments chauffants Collecteurs solaires Génératrices et absorbeurs de rayons infrarouges

Figure 3

Fonctions, propriétés et applications des matériaux céramiques avancées

Chimique	Inenie	A1203, SnO, ZnO, NiO, Ti02, Silicates	Protection contre la corrosion Contrôle des matériaux corrosifs
	Réactivité	Alz03, SnO, ZnO, NiO, Ti02, Silicates	Détecteurs de gaz Détecteurs d'humidité
	Catalyse	MgO, A1z03, Si02 Silicates	Suppons de catalyseurs Traitement biochimique
Magnétique	Ferrite tendre	Mn, Zn, Fe	Tê tesd'enn:gistrementmagnétiques, noyaux de télévision, etc. Enregistreurs vidéo et audio Périphériques d'ordinateurs
	Ferrite _dure	Ba6Fe	Hauts-parleurs, moteurs, aimants permanents
Optique	Transparence	Alz03, MgO, Yz03, Th02 Fluorures	Lampes au sodium, fenêtres à infrarouge Fenêtre électromagnétiques Matériaux pour laser
	Mémoire	Céramiques PIZ!	Affichage et entreposage vidéo Éléments de mémoire, Modulation de la lumière oplo-électronique des obturateurs
Biologique	Inenie	Al203	Implants chirurgicaux, Os anificiels
	Compatibilité	Ca10(Po4MOH)2	Applications dentaires

Figure 3 (suite)

Fonctions, propriétés et applications des matériaux céramiques avancées

SOURCE: G. B. Kenney et H. K. Bowen [18]

Comme l'indique les données, l'utilisation du carbure de silicium dans la fabrication des produits réfractaires absorbe la majeure partie de sa production mondiale, soit 55%. Les abrasifs arrivent au deuxième rang en s'accaparant 40% de sa production totale. Le reste, environ 5%, est consommé par les domaines de haute technologie tels les composants électriques, les pièces thermomécaniques, les pièces thermiques, les outils de coupe, etc...

Bien que ces derniers débouchés n'absorbent qu'un très faible pourcentage de la consommation du carbure de silicium, ils ne sont pas sans importance. En effet, ce sont particulièrement les recherches effectuées dans le but de satisfaire ces nouveaux secteurs, qui permettront une expansion possible de l'industrie du SiC. Cette section tentera d'évaluer les domaines de pointe les plus prometteurs pour cette céramique avancée et mentionnera les raisons qui motivent ces choix.

2.1.1 Les pièces thermomécaniques

Depuis les années 1960, les spécialistes ont compris que l'utilisation des céramiques, pour les emplois moteurs, pouvait rendre possible la réalisation d'économies importantes. En effet, la combinaison des propriétés du nitrure de silicium (Si_3N_4), du carbure de silicium (SiC) et de la zircone permet d'accroître la température de fonctionnement des moteurs et de fait, améliorer leur rendement énergétique. Pour leur part, le SiC et le Si_3N_4 sont particulièrement intéressants à

cause de leur résistance élevée aux hautes températures, aux chocs thermiques, à la corrosion et à l'érosion. L'intérêt de la zircone vient du fait qu'elle possède une faible conductivité thermique[1], une dureté acceptable, une bonne résistance à l'oxydation et une dilatation thermique similaire à celle des autres matériaux utilisés dans les moteurs.

De plus, la réduction du poids et de l'inertie attribuée à leur faible densité permet, encore une fois, une amélioration du rendement du moteur.

Enfin, un autre avantage considérable est que comparativement aux superalliages présentement utilisés, on s'attend à ce que le coût des pièces en céramiques soit sensiblement inférieur. Bien entendu, l'atteinte de cet objectif nécessitera beaucoup de recherches pour la mise sur pied de techniques de fabrication commerciale et de production en série.

En ce qui concerne l'utilisation du SiC dans les moteurs, l'intérêt semble être vers les turbines à gaz pour les avions et automobiles, les moteurs à essence et certaines composants pour les moteurs diesels.

---

1. Selon le cas, on exigera d'un matériau thermomécanique qu'il soit isolant ou conducteur thermique. Le SiC qui est un bon conducteur justifiera son emploi pour des organes d'échangeurs, mais sera déconseillé s'il s'agit d'adiabatiser une enceinte.

i) **Moteurs à turbine à gaz pour les 3\'ions**

L'efficacité du fonctionnement d'un moteur à turbine à gaz s'accroît selon l'augmentation de la température à l'entrée de la turbine. La figure 4 démontre le progrès accompli dans la poursuite de ce but au cours des trente dernières années. De façon évidente, Je carbure et le nitrure de silicium démontrent un avantage

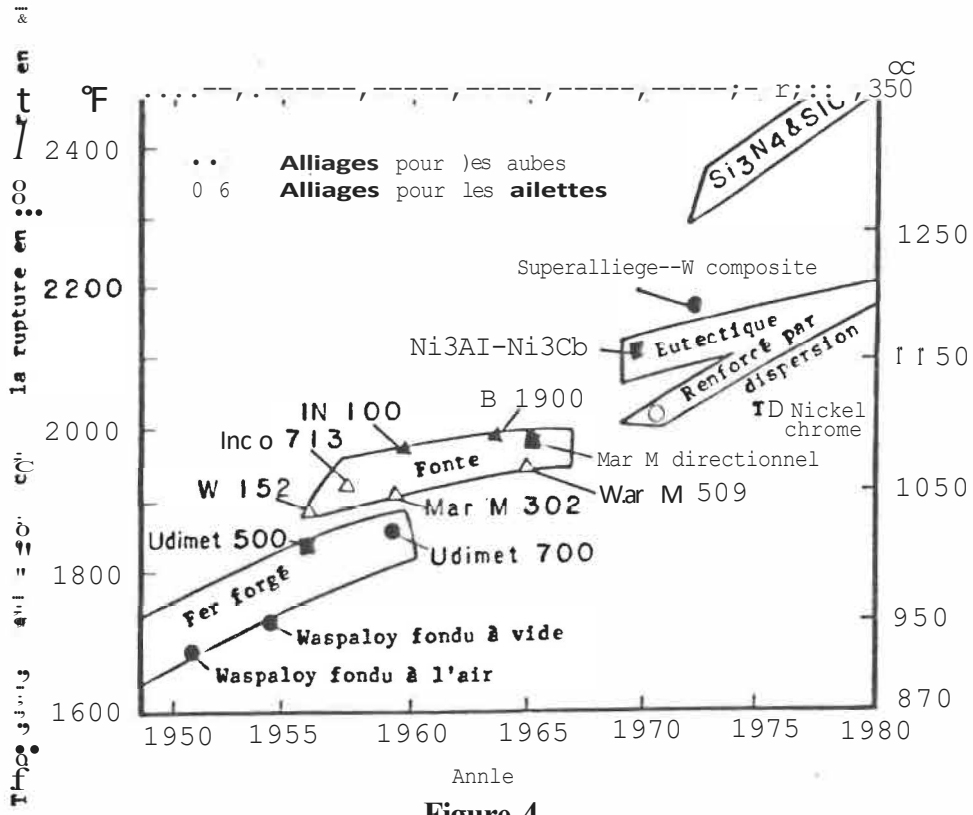


Figure 4

Progrès accomplis dans l'augmentation de la t °

à l'entrée d'une turbine

SOURCE: M.K. MurthJ [24], P.24.

remarquable dans l'atteinte de cet objectif. Cependant, en raison de l'extrême sécurité requise dans la fabrication aéronautique, des efforts intensifs doivent être faits si l'on veut en arriver, dans un avenir prochain, à utiliser des éléments en céramiques dans les moteurs d'avions.

Actuellement, presque tous les fabricants de moteurs d'avions poursuivent des travaux de recherches dans ce domaine, mentionnons: United Technologies (Pratt and Whitney), General Electric Company, Garrett Corporation et Rolls Royce.

ii) Moteurs d'automobiles à turbine à gaz

Sans lui être identique, le moteur à turbine à gaz pour les automobiles est similaire au moteur à turbine à gaz utilisé pour les avions. Encore une fois, pour les pièces de moteurs, les matériaux choisis sont le nitrure et le carbure de silicium. Grâce à eux, de grands progrès ont pu être réalisés dans la mise au point de ce genre de moteurs. Les principaux fabricants d'automobiles responsables de ce succès sont, entre autres, Ford Motor Company, General Motor, Volkwagen, Daimler Benz, Volvo et Saab.

iii) Moteurs à essence

Les deux secteurs où l'on s'attend à ce que le carbure de silicium soit utilisé

comme éléments dans ce type de moteurs sont les pièces d'usure et les turbocompresseurs. La fabrication des turbocompresseurs en SiC est présentement étudiée par la société Carborundum Co. pour la compagnie Volkwagen, alors que cette dernière analyse la possibilité de commercialisation de ces mêmes turbocompresseurs.

iv) Moteurs diesels

Les céramiques ont suscité beaucoup d'intérêt pour le développement d'un moteur diesel adiabatique pour les camions et les automobiles. Les diesels conventionnels sont non-adiabatiques (refroidis), cela est dû au fait que les métaux ne puissent supporter de hautes températures. Ainsi, puisque les céramiques tolèrent des températures plus élevées, elles permettent aux diesels, non seulement d'avoir un meilleur rendement énergétique, mais aussi ils ne requièrent plus de système de refroidissement, lequel exige un entretien régulier et ajoute aux coûts et au poids du moteur.

Pendant plusieurs années, l'armée américaine a supporté les recherches effectuées par Curmnins Energie Co. sur les diesels adiabatiques pour les camions militaires. Ce moteur expérimental est fabriqué avec du zirconium partiellement stabilisé **(PSZ)** ainsi qu'avec d'autres céramiques telles le carbure de silicium **(SiC)** et le nitrure de silicium (Ni_3SO_4).

2.1.2 Les pièces therrnigues

i) Échangeurs de chaleur - Récupérateurs

Les échangeurs de chaleur peuvent être fabriqués en métaux ou en céramiques. Ceux en métaux représentent un avantage au niveau des coûts, mais ceux en céramiques peuvent être utilisés à des températures plus élevées (au moins 500° F de plus).

Le marché pour les échangeurs de chaleur est en voie de développement. Le SiC est le matériau d'avenir pour cette application et, jusqu'à présent, la poudre de carbure de silicium utilisée pour produire ces tubes est celle obtenue par le procédé carbothermique traditionnelle.

ii) **Les brûleurs**

En matière de brûleurs, il est impératif de prendre conscience de l'aspect «utilisation rationnelle de l'énergie» dans la conception et la mise en oeuvre de brûleurs industriels, notamment dans les usages à haute température comme la céramique. Par conséquent, il s'agit d'adapter à un coût raisonnable des matériaux dans des formes appropriées à la réalisation de brûleurs ou d'éléments de ce dernier. La République Fédérale d'Allemagne, pour sa part, a déjà commercialisé

des brûleurs jet à ouvreau en carbure et en nitrure de silicium.

2.1.3 Les outils de coupe

Depuis leur introduction au début des années 50, l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) a été le matériau céramique dominant dans les outils de coupe, mais sans pour autant être capable de pénétrer significativement le marché. Celui-ci est estimé à environ 3%. La raison à ce manque de pénétration est reliée à la fragilité des céramiques. Depuis la fin des années 70, des nouvelles céramiques plus résistantes ont été introduites, notamment les nitrures et plus récemment, les composites céramiques-Sic. On s'attend à ce que ces céramiques rongent une part du marché des outils en céramiques, mais aussi qu'elles pénètrent le marché des outils en carbure.

2.1.4 Les composantes électriques

L'utilisation des céramiques en électronique est basée sur leurs propriétés électriques. En général, les céramiques sont des isolants électriques; i.e. que les électrons de valence, liés aux atomes, ne peuvent se déplacer sous l'effet d'un champ électrique. Cependant, comme cela se passe pour certains matériaux, des impuretés peuvent fournir des charges électriques (électrons ou trous) mobiles. Par ailleurs, certains ions peuvent se déplacer sous l'effet d'un champ électrique, à cause de la

présence de défauts de structure. Puisque le nombre de ces défauts augmente avec la température, la conductibilité électrique augmente elle aussi. C'est le cas notamment pour le carbure de silicium, lequel est dit semi-conducteur.

Le carbure de silicium de haute pureté chimique est donc un candidat intéressant pour la fabrication des semi-conducteurs et des résistances.

2.1.5 Les composantes à matrice céramique

La technologie des composites à matrice céramique n'a eu que très peu d'applications dans le commerce jusqu'à maintenant. Parmi celles-ci, l'exemple le plus connu est celui des plaquettes pour outils de coupe en céramique renforcée de trichites de carbure de silicium. Il existe aussi d'autres exemples d'applications dans l'électronique; les résistances variables de verre - SiC. Dans ce cas, le verre sert à lier les particules de SiC, lui donnant sa forme, sa maniabilité et sa stabilité, alors que les particules de SiC donnent à l'ensemble, des propriétés de résistance non linéaires.

3. PROCÉDÉS DE FABRICATION DE LA CÉRAMIQUE

En règle générale, les principales étapes à la fabrication des céramiques sont:

- la production de la poudre; celle-ci peut être obtenue à partir d'une source minérale naturelle (céramiques traditionnelles) ou encore formée à partir d'un procédé chimique (céramiques avancées);

- la préparation de l'objet incluant la mise en forme et le séchage;

- le pressage et la cuisson à haute température, laquelle permet le frittage des particules, c'est-à-dire que celles-ci se soudent en se rapprochant;

- la finition et les tests de contrôle.

Cela peut paraître relativement simple, mais la réalité est beaucoup plus complexe. D'un côté, la densification de l'objet et la diminution de la porosité entraînent un retrait linéique de 15 à 20%. Celui-ci doit être connu avec précision et pris en compte lors de la détermination de la forme et de la grosseur de l'objet avant sa cuisson.

Par ailleurs, pour les céramiques non-m.y1des (Si_3N_4 SiC, B_4C,...), le frittage

peut être difficile, voire impossible, pour différentes raisons: lorsque les énergies de surface du matériau à l'état cuit ne sont pas inférieures aux énergies de surface à l'état cru; lorsque la mobilité des atomes est trop lente pour permettre la formation de joints de grains et, finalement; lorsque qu'il existe un film de silice enrobant chaque grain dans le cas des carbures et des nitrures. Afin de surmonter ces problèmes, plusieurs tentatives ont été faites. Citons, par exemple, le frittage sous charge, le frittage par réaction et l'ajout de produits organiques dont l'effet est de nettoyer les surfaces des grains et ainsi permettre le frittage naturel.(!>

3.1 Développements dans la fabrication des céramiques

Les techniques de fabrication se développent ou s'améliorent continuellement pour les céramiques de pointe. Les facteurs qui contribuent à cette nouvelle génération de matériaux céramiques sont: 1) un plus grand contrôle dans la pureté des poudres; 2) les changements dans la composition des matières et additifs; 3) l'utilisation de nouvelles technologies ou la variation de certains paramètres (t°, temps, pression) dans la mise en forme et procédures de cuisson.

Voyons, en gros, où en sont les développements pour les différentes étapes de fabrication.

---

1. Ces méthodes sont explicitées davantage à la section 3.1.2.

3.1.1 Synthèse des poudres et traitement

Un développement majeur dans la technologie des céramiques est d'avoir réalisé l'importance des poudres de départ dans la détermination des propriétés du produit. · L'idée a été de réduire la taille et la concentration des défauts pré-existants dans la céramique par un contrôle de la géométrie et de la chimie des particules, c'est-à-dire, utiliser des particules ultrafines, ultrapures, sphériques et de grosseur uniforme.

Comme on peut le voir à la figure 5, le but est d'obtenir un compactage plus dense et un positionnement ordonné des particules. Ces facteurs contribuent à l'amélioration des performances structurales car, lorsque frittées, de telles particules permettent au matériau céramique obtenu d'avoir un nombre réduit d'espaces vides ainsi que des fissures plus petites.

Conséquemment à ces découvertes, plusieurs traitements pour la synthèse des poudres sont apparus. Les sous-sections suivantes tenteront d'expliquer brièvement quelques-uns de ces nouveaux procédés.<[1]J

---

1. Le lecteur intéressé à en connaître davantage sur le sujet peut se référer à [28].

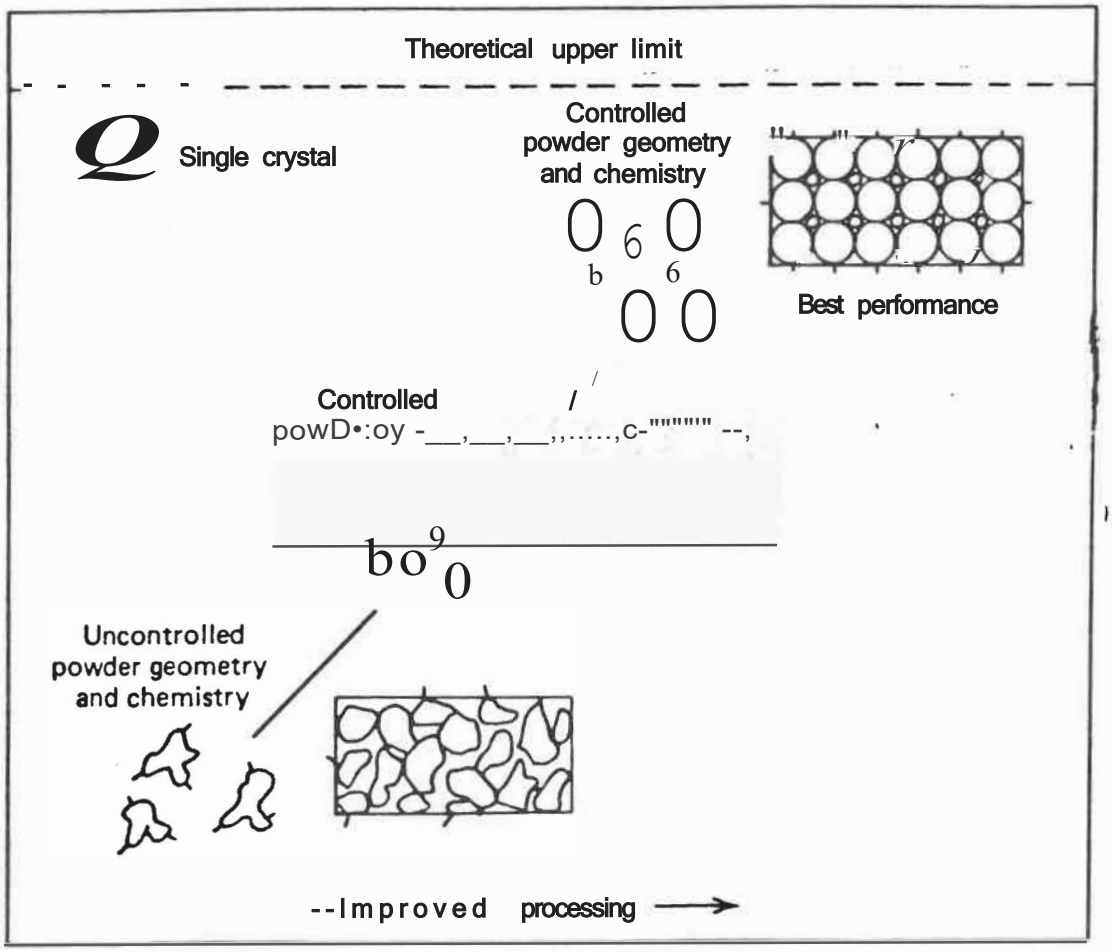


Figure 5

Importance de la géométrie et de la chimie des particules dans la performance des céramiques

SOURCE: D.R. Ulrich et L.L. Hench [28], p. 32.

3.1.1 a) Fahrication de poudres fines

Il est possihle d'ohtenir des poudres fines et pures par les procédés conventionnels. Il s'agit de broyer les poudres grossières et de les trier par la suite. Le problème avec cette approche est que même si les poudres obtenues sont très fines, elles ne sont pas uniformes. De plus, l'opération de broyage peut introduire des impuretés métalliquesY[1]

i) **Méthodes «sol-gel»**

Une façon de fabriquer des poudres pures, ultrafines et de grosseur uniforme est par le procédé sol-gel. En gros, cela implique la conversion d'un sol en un gel. Le mot «sol» décrit la dispersion des colloïdes dans un liquide. Les colloïdes, eux, sont des particules solides ayant un diamètre de 10 à 1000 A, et pouvant contenir chacune 10^3 à 10^9 atomes. Lorsque la viscosité du sol augmente suffisamment, habituellement par une perte partielle de sa phase liquide, il devient semi-rigide. Cette matière semi-rigide est appelée un «gel», et en le chauffant doucement, il perd sa phase liquide et se transforme en poudres de céramiques.

---

2. Ce type de traitement sera vu d'une façon plus détaillée à la section 4.3.

Jusqu'à présent, les différentes recherches sur les poudres préparées par les méthodes sol-gel ont fait ressortir le rôle des espèces protoniques à l'intérieur et à la surface de la poudre, spécifiquement dans les opérations de compactage et de densification. L'intérêt de cet apport est de permettre le contrôle des joints de grains et ainsi d'abaisser la température de frittage.

L'Université Clemson a expérimenté cette approche en combinant un colloïdale Al_2Q_3 avec un sol de polysilastyrène dans le but de produire une molécule du composite SiC/Al_2O_3. Ce matériau possède une microstructure uniforme avec des grains de grosseur similaire à ceux de l'alumine et une dureté deux fois supérieure au matériau monolitique.

Bien que plusieurs matériaux aient été élaborés en utilisant cette technique (mullite, spinelle, niobiate de Pb et Mg, Nasicon, ZnO, GeO_2 SiO_2 SiC et plusieurs composites), les applications majeures se limitent surtout aux verres et aux céramiques oxydes.

ii) **Méthodes «phase-vapeur»**

Récemment, plusieurs scientifiques ont exploré l'idée de fabriquer des poudres superfines à partir d'une phase vapeur plutôt que d'une phase liquide. Un des moyens pour y parvenir consiste à préparer la poudre à l'aide d'une précurseur

organo-métallique en phase vapeur, c'est-à-dire en décomposant la vapeur de façon à produire des particules solides. À titre d'exemple, la poudre de SiC s'obtient par la décomposition thermique de vapeur alkoxyde, laquelle conduit à une poudre oxyde et à la décomposition de la matière $(CH_3)_i SiCl_2$ pour finalement former la poudre.

Une autre façon de produire des poudres est d'évaporer les matières désirées et de précipiter les particules à l'intérieur de la phase vapeur. L'évaporation des matières peut se faire par l'un ou l'autre des traitements thermiques suivants: plasma-RF (radio fréquence), plasma à arc, laser, etc...

Laser[1]

Les études sur l'utilisation du laser effectuées par Dow Chemical, Rutgers University, Exxon et le MIT ont montré que par l'action d'un laser puissant au dioxine de carbone (CO_i) sur un jet de gaz, il est possible d'obtenir des poudres de nitrure et de carbure de silicium (Si_3N_4 et SiC). Les particules sont extrêmement petites puisque la réaction est exposée très brièvement à de très hautes températures et qu'ainsi les grains n'ont que très peu de temps pour croître.

---

1. Cette méthode sera explicitée davantage à la section 5.1.

Plasma à arc

Les industries PPG ont développé un procédé par plasma à arc pour produire des poudres de diborure de titane. Il s'agit d'utiliser de l'hydrogène sous forme de gaz, lequel est passé à travers un arc électrique à haut voltage et ionisé aux environs de 2 500° C. Le plasma d'hydrogène résultant est dirigé à l'intérieur d'une chambre où les gaz réactifs, le tétrachlorure de titanium et le trichlorure de bore, sont chauffés rapidement pour former la poudre céramique. Comme le produit refroidit très vite, le diborure de titane cristallise en fines particules. De plus, comparativement aux poudres conventionnelles, la consolidation se fait à des températures moins élevées et ne requiert pas d'aide pour le frittage.

Ce procédé a aussi été utilisé en laboratoire pour produire du carbure de silicium, du carbure de titanium, du carbure de tungsten et autres poudres.

Plasma-RF

Dans ce cas, les poudres sont obtenues par la réaction de silane et de méthane chauffés par l'extrémité de la flamme d'un système plasma-RF. Les poudres obtenues ont des caractéristiques similaires à celles produites par l'équipe de MIT en utilisant un laser. Comparativement au plasma à arc où l'érosion des électrodes entraîne souvent une contamination importante du produit, l'avantage du plasma-

RF est qu'il conduit à une faible contamination.

3.1.1 b) Fabrication de fibres

Plusieurs méthodes ont été développées pour produire une variété de fibres de céramiques. Pour l'instant les travaux les plus prometteurs sont ceux de l'équipe de Yajima [41] de l'Université de Tohoky, lesquels ont permis de produire une fibre de SiC ayant une force de tension élevée et une bonne résistance à l'oxydation.

Les différentes étapes pour fabriquer des fibres de SiC sont représentées à la figure 6. Tout d'abord, il doit y avoir déchloration et polymérisation du diméthyldichlorosilane ($[CH_3]_2 SiCl_2$) de façon à former du polydiméthysilane ($[-Si(CH_3)_i-]_n$). Cette matière est ensuite chauffée pour être transformée en polycarbosilane ($[-HSiCH_3-CH_2]n$) et, par après, «melt-spun» pour la formation de fibres. Pour briser les bonds organiques de ces fibres ($Si-CH_3$ et C-H par exemple) et ainsi obtenir une chaîne continue d'atomes de silicium (Si) et de carbone (C), la fibre organosilicone doit être chauffée doucement dans une chambre à vide.

3.1.1 c) Fabrication de trichites

Dans le développement, les trichites représentent un intérêt de plus en plus grandissant. Ces particules sont des fibres très fines de moins de 1 um de diamètre.

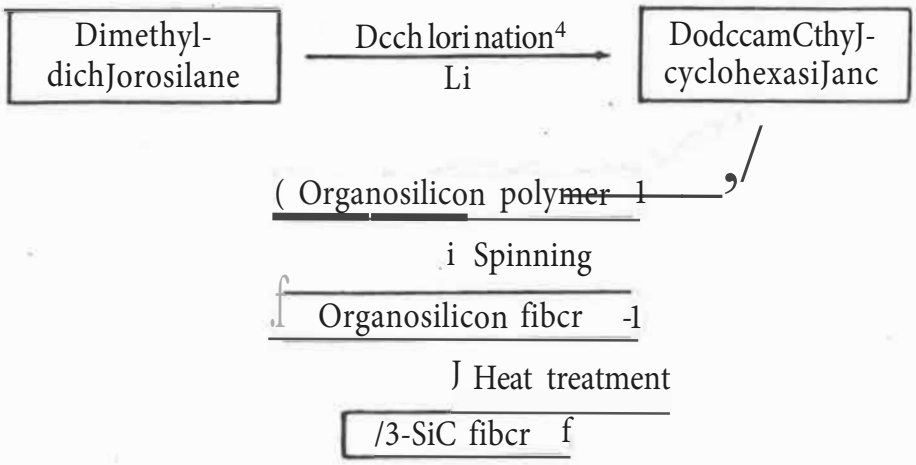


Figure 6

Organigramme du procédé par pOJ)'mérisation

SOURCE: Nippon Carbon Co.

Par exemple, un trichite de carbure de silicium a un diamètre d'environ 0,5 pm alors que celui d'une fibre mesure habituellement 10 JJIBou plus. Les trichites sont également plus petits; leur longueur peut varier entre 10 et 30 pm, tandis que pour les fibres, elles se mesurent généralement en millimètres. Ces différents facteurs font que comparativement aux fibres, les trichites produisent des composites avec une ténacité, une dureté et une résistance mécanique supérieures.

Une des céramiques parmi les plus intéressantes pour la fabrication de trichites est le carbure de silicium. Au début des années 70, Y.B. Cutler de l'Université de Utah, a développé un procédé pour la formation de trichites en chauffant des enveloppes de riz, lesquelles sont d'excellentes sources de silicium et de carbone. En 1976, Cutler vend son procédé à Exxon Enterprises, une filiale de Exxon Corporation. Cette dernière construira l'usine Silag Inc. dans le but de commercialiser les trichites de SiC. Vers la fin des années 1982, Arco Metals achète la compagnie et vend les trichites sous le nom de «Silan> dont l'utilisation principale est de renforcer l'aluminium. Selon la compagnie, ils permettraient d'augmenter la résistance mécanique et la rigidité de l'aluminium d'environ 40% et 100% respectivement.

D'autres organisations développent également des procédés pour produire des trichites de SiC. Mentionnons, en premier lieu, la compagnie japonaise Nippon Carbon qui fabrique, elle aussi, des trichites en SiC par pyrolyse des enveloppes de riz. Une autre compagnie, Cancarb[1], une filiale de TransCanada Pipeline s'intéresse, pour sa part, à la synthèse de particules à partir de grains de silice et de noir de carbone provenant de décomposition d'un gaz naturel. Enfin, pour terminer,

---

1. Plus de détails à la section 5.2

la compagnie Akan[2] et sa filiale C-Axis Technology ont également élaboré un procédé permettant de produire des trichites en SiC-B.

3.1.2 Mise en forme du produit et cuisson

Les progrès accomplis dans ce domaine, ont résulté en un développement de différentes structures internes et externes des céramiques et en une large variété de produits aux formes plus complexes. Les céramiques avancées peuvent être améliorées par: des variations dans la température, le temps et la pression impliqués dans le traitement des poudres; l'utilisation de procédés relativement nouveaux; des modifications apportées dans des procédés plus anciens.

Dans cette section, nous mentionnerons les nouvelles technologies qui ont permis les développements majeurs dans la mise en forme et cuisson des céramiques.

i) Pressage à froid

Le pressage à froid consiste en un compactage des poudres par une pression appliquée par un ou deux pistons. Ce procédé est utilisable pour la fabrication de

---

2. Plus de détails à la section 5.3

forme simple.

ii) Pressage à chaud (HP) ou f'ittage sous charge

Dans ce cas, la mise en forme et la cuisson sont faites simultanément, c'est-à-dire qu'à la différence du frittage naturel, une pression constante est maintenue pendant tout le temps du frittage. Cette technique est limitée aux formes simples.

iii) Pressage isostatique à chaud (HIP)

Alors que la pression dans la méthode HP est appliquée de façon uniaxiale, dans le pressage isostatique à chaud, la pression est appliquée en trois dimensions. Pour ce faire, on encastre la pièce non cuite dans une enveloppe résistante et on la place, ensuite, dans un four où la température et la pression sont très élevées. Ce procédé est adaptable à des formes plus complexes, comme des rotors de turbo-compresseurs. Toutefois, le danger des fours à haute pression restreint son utilisation à des petites pièces.

iv) Frittage réactif

Ici, les poudres sont liées par une série de réactions chimiques. Cette technique n'est pas coûteuse et offre l'avantage que la réaction chimique compense

sensiblement le retrait du frittage.

v) Moulage par injection

Le principe est d'ajouter à la poudre des polymères thermoplastiques permettant de former une pâte. Par après, celle-ci est injectée dans un moule et doit être soumise à une chaleur très faible, afin de détruire les matières organiques. La densification peut alors se faire, soit par un frittage naturel ou encore, par un frittage réactif. Cette méthode est particulièrement intéressante pour la production en série de pièces simples ou complexes.

vi) Coulée en barbotine

Dans cette technique, le compactage de la poudre s'effectue sous l'effet de forces capillaires s'exerçant au sein d'une «barbotine», c'est-à-dire une suspension stable généralement dans de l'eau. L'ajout de produits organiques est responsable de la stabilité et des propriétés rhéologiques de la barbotine. De plus, il contribue à charger électriquement les particules, de façon à ce que les forces répulsives s'opposent aux forces d'attraction de van der Waals. Des suspensions fluides et denses en particules sont ainsi obtenues et coulées, par la suite, dans des moules en plâtre, dont la porosité absorbera le liquide de la suspension et permettra un compactage des poudres sur leurs parois. L'application de cette méthode est utile

pour la fabrication de pièces d'épaisseur constante, de grande taille et de forme creuse et complexe.

Comme nous avons pu le constater, le choix d'un mode de mise en forme est basé principalement sur les caractéristiques géométriques, rhéologiques et tribologiques des pièces. D'un autre côté, lorsque plusieurs techniques sont possibles, des critères économiques interviennent: possibilité d'automatisation, amortissement des équipements, coûts d'usinage, etc.

vii) Frittage par micro-ondes

Un autre aspect important dans le procédé de fabrication des céramiques est la méthode de cuisson. Pour sa part, la cuisson par micro-ondes a suscité beaucoup d'intérêt parce qu'elle a le potentiel de densifier rapidement différents matériaux sans croissance des grains. Un autre avantage est de pouvoir densifier de grosses pièces en moins de temps comparativement aux procédés traditionnels.

Plusieurs compagnies européennes ont déjà utilisé cette forme d'énergie pour sécher plus rapidement les faïences et les moules. Par ailleurs, des chercheurs de }'University of Leeds en Angleterre ont utilisé cette forme d'énergie pour augmenter la capacité d'ouvrabilité des poudres. Les coulées en barbotine conventionnelles doivent contenir 60 à 75% de leur poids en solide lorsqu'on veut obtenir un court

temps de coulée. D'un autre côté, un pourcentage de solide plus faible produit une pièce ayant une meilleure microstructure. Il existe donc un dilemme entre le choix d'obtenir une pièce de qualité supérieure exigeant un temps de coulée plus long et obtenir une pièce de moins bonne qualité, mais où le temps de coulée est plus court. L'utilisation de l'énergie par micro-ondes semble être une solution à ce problème. En effet, en appliquant cette forme d'énergie au moule, le temps de coulée peut être réduit considérablement. Par conséquent, une quantité moindre de solide nécessitera un temps de coulée plus court et permettra d'obtenir un objet aux propriétés améliorées.

Un autre avantage à l'utilisation de l'énergie par micro-ondes pourrait être celle d'une réduction des coûts d'énergie dans la production des pièces en céramiques.

À ce sujet, une étude récente a été effectué par Rothman [31), laquelle conclut que l'énergie consommée par la fabrication d'une pièce typique en céramique avancée (où le procédé commence avec des poudres) ne compte que pour 1% de la valeur totale des coûts de production. La figure 7 donne la distribution des coûts attribuée aux différents facteurs de production.

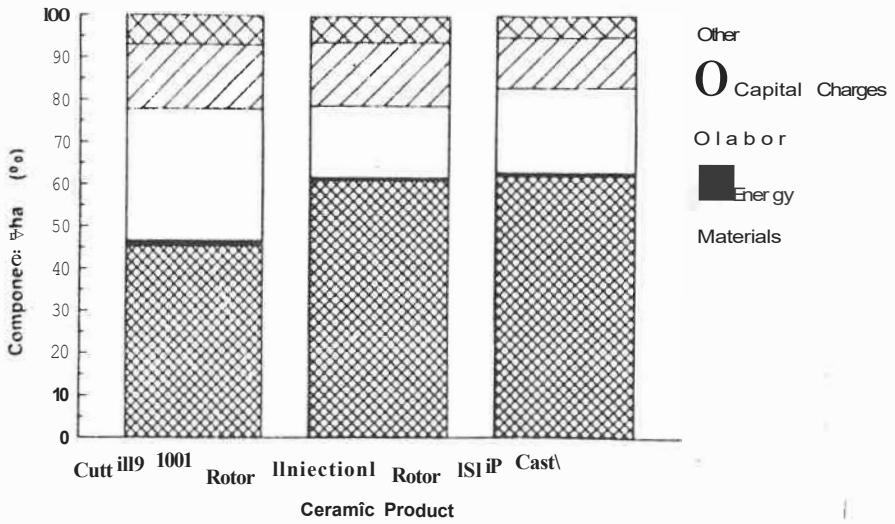


Figure 7

Distribution des coûts selon les facteurs de production

SOURCE: E.P. Rothman et al. [31].

De plus, en se basant sur les projections faites aux États-Unis par le Department of Commerce, Rothman prévoit que la consommation d'énergie nécessaire à la production américaine de toutes les pièces en céramiques avancées, ne totalisera qu'environ 15 PJ pour l'année 1984. En considérant que l'adoption de cette nouvelle technologie permettrait d'atteindre une efficacité énergétique de 100%, c'est-à-dire une réduction approximative de 8 PJ, cela semblerait très faible

comparativement à la consommation totale d'énergie aux États-Unis, laquelle atteignait 78 EJ durant cette même période.

Ainsi, pour ces raisons, l'économie d'énergie ne constitue pas, en soi, un atout important pour cette nouvelle forme d'énergie ou autres formes envisageables.

3.1.3 Finition du produit et tests de contrôle

Même si les progrès accomplis dans la fabrication des pièces en céramiques permettent d'éliminer une grande partie des défauts, des dommages importants peuvent survenir dans n'importe quelles étapes du traitement du produit. D'une part, pour la finition de la pièce, c'est-à-dire lorsqu'on veut obtenir la grandeur, la forme et la texture de surface désirées, il est préférable d'utiliser de l'outillage spécial à prix très élevé, afin de diminuer les risques d'une catastrophe. D'autre part, puisque des défauts peuvent s'introduire durant chacune des étapes du procédé, la recherche pour développer des méthodes d'essais non-destructifs et de détection des défauts avant que le produit ne soit commercialisé, s'avère aussi une nécessité.

4. LA PRODUCTION DU CARBURE DE SILICIUM PAR LE PROCÉDÉ ACHESON

Comme nous l'avons indiqué auparavant, notre étude se concentrera davantage sur la production du carbure de silicium. Dans un premier temps, nous décrirons la méthode carbothermique traditionnelle (procédé Acheson) ainsi que les différents coûts de production reliés à ce procédé. Par après, nous mentionnerons les étapes ou traitements additionnels requis, afin de rendre le SiC utilisable comme matériau céramique avancée, c'est-à-dire répondant à certaines exigences concernant la grosseur des grains et la pureté.

4.1 Généralités

La carbure de silicium a été découvert en 1891 par E.G.Acheson. Après avoir reconnu certaines de ses propriétés, entre autres, le SiC est un des matériaux connus les plus durs (9.15 sur l'échelle Mohs comparé à 10 pour le diamant), Acheson fonda la compagnie Carborundum. Cette dernière produit du SiC pour des utilisations commerciales telles les abrasifs et les réfractaires. Encore aujourd'hui, le procédé Acheson équivaut à 95% de la consommation totale de ce matériau.

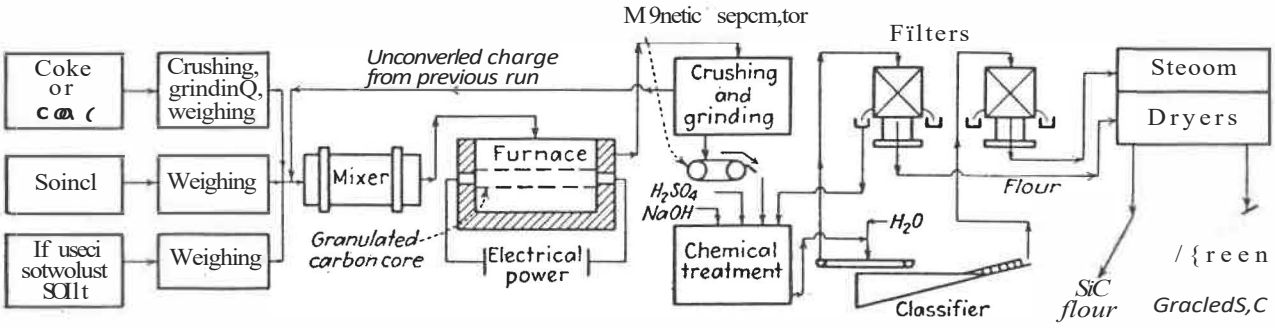
Malgré l'utilisation industrielle ancienne du carbure de silicium, ce n'est que

depuis peu qu'on a reconnu son importance en céramique. Il semblerait que les problèmes initiaux affectant le SiC, notamment les problèmes de frittage auraient été des causes du commencement des travaux qui ont permis sa mise en valeur. En particulier, l'intérêt a porté sur les différentes formes cristallines du SiC. Il en existe deux: la forme a (structure hexagonale) et la forme B (structure cubique). La forme o est connue depuis longtemps et, actuellement, c'est celle qu'on retrouve sur le marché. L'autre, la forme ß, est connue depuis peu, mais on y accorde de plus en plus d'importance pour les raisons suivantes: 1) elle est frittable naturellement; 2) sont taux de croissance des grains est plus faible que celui de la forme o. D'ailleurs, certains chercheurs [4] ont constaté qu'à une température inférieure à 2 100° C, sa structure était stable, et ce, peu importe la durée du traitement thermique. Le résultat est une poudre toujours :: 1 *pm*. Cette condition s'avère nécessaire pour l'utilisation du SiC en tant que M.C.A.

4.2 Description du procédé Acheson

La figure 8 est un organigramme de la production du carbure de silicium par le procédé Acheson. Ce dernier consiste à faire chauffer un mélange de sable de silice de haute qualité (98% à 99,5% de SiO_2) et de carbone sous forme de coke ou d'anthracite. On ajoute également du carbure de silicium non synthétisé, obtenu

lors des réactions précédentes[1], de l'oxyde d'aluminium, des sciures de bois et du graphite synthétique.



Scmd	167 ton	]
Coke	1.08 ton	(Per ton finished silicon corbide
Sawdust (if used)	ô.22 ton	j (including unconverted chortJe)
Soit (if usedl	0.11 ton	
Eledricity	7000-8000 kwh	;

Figure 8

Organigramme du procédé Acheson

SOURCE: C.L. Mantell [22].

---

1. Cela se fait pour la production du SiC noir mais pour la production du SiC vert, on ne peut recycler des matières non synthétisées.

Une électrode en graphite est utilisée pour transmettre l'énergie électrique à travers la silice et le carbone. Les sciures de bois assurent une porosité permettant aux gaz produits, pendant la synthèse, de circuler librement à travers la charge. Enfin, l'oxyde d'aluminium sert à noircir le carbure de silicium durant la réaction.

La formation du carbure de silicium est effectuée dans un four dont les dimensions sont en moyenne (15 mètres X 3 mètres X 3 mètres). Les murs de briques réfractaires des deux extrémités du four sont permanents et contiennent chacun une électrode de carbone raccordée à un transformateur de courant continu. Les deux électrodes sont reliées l'une à l'autre par un noyau de graphite synthétique autour de laquelle le mélange est placé. Les murs des côtés du four sont amovibles.

Les matières premières sont d'abord pesées et mélangées selon les proportions suivantes:

. Sable de silice	55 pour cent
. Carbone	35 pour cent
. Sciures de bois	7 - 10 pour cent
. Sel marin	3 - 5 pour cent

Le remplissage s'effectue en 3 étapes: 1) il s'agit de verser le mélange dans le four jusqu'au niveau des électrodes; 2) ajouter le graphite synthétique servant à relier les

électrodes et, finalement; 3) finir le remplissage avec le mélange restant. À ce stade, il ne reste plus qu'à appliquer les bancs d'alimentation électrique aux électrodes de carbone.

La réaction entre la silice et le carbone se fait doucement. Tout d'abord, elle requiert une période de 18 heures pour atteindre une température d'environ 2 200 à 2 400° C et, par après, une autre période de 18 heures, afin de permettre les réactions chimiques nécessaires à la formation du carbure de silicium. À une température comprise entre 1 400 et 1 800° C, le produit est du SiC-B, la forme cubique. Au-dessus de cette température, la structure est hexagonale, dite SiC-a, et c'est cette forme qui est généralement produite par le procédé Acheson.

L'étape suivante consiste à laisser refroidir le produit pendant 40 heures. Avant le triage, la couche supérieure du mélange est enlevée pour être recyclée. Par après, la charge est séparée en 3 parties: 1) le graphite qui sera réutilisé; 2) le mélange non synthétisé qu'on recyclera; 3) les amas de cristaux de SiC, lesquels seront broyés, nettoyés avec des produits alcalins ou acides et séchés. Le mélange partiellement transformé sera vendu à l'industrie métallurgique ou recyclé pour la production ultérieure de carbure de silicium de plus haute pureté. Les grains bruts de SiC seront de nouveau broyés, triés par grosseur et, finalement, passés sous des aimants pour enlever la contamination due au fer provenant des broyeurs. L'obtention des poudres de grosseur variée, exige un traitement complexe partant

des systèmes de broyage, de tamisage, de séparation et de cantation des particules fines. Toutefois, les poudres les plus fines pouvant être obtenues avec ce procédé mesurent environ 10 um. Celles-ci sont trop grossières pour être utilisées comme M.C.A. et, par conséquent, requiert une étape additionnelle de broyage ou un tout autre traitement[41].

Le cycle complet de fabrication dure environ 108 heures et se répartit ainsi:

OPÉRATION	DURÉE (HEURES)
Élévation de la température (0 - 2 400° C)	18
Réaction chimique (2 000° C)	18
Refroidissement dans le four	20
Enlèvement de la couche supérieure	4
Refroidissement dans le wagon	32
Enlèvement de la charge non synthétisée	4
Déchargement / chargement du wagon	8
Temps additionnel	4

En général, les fours peuvent être opérés de façon à produire trois types de SiC. La couleur détermine le degré de pureté des grains. Le premier type et le SiC vert dont le degré de pureté est le plus élevé, soit 99,8% pour le vert pâle et 99,5% pour le vert foncé. Dans l'industrie des réfractaires, il trouve son utilisation dans les produits spéciaux tels les éléments chauffants et les produits frittés ou recristallisés.

1. Nous y reviendrons à la section 4.3.

Du côté des abrasifs, il constitue l'abrasif lié (meule) par excellence. Le deuxième type, le SiC noir, lequel est moins pur et moins friable que le SiC vert, possède tout de même le double avantage d'être plus dur et moins coûteux. Pour ces raisons, il est utilisé dans plusieurs secteurs, mais il est particulièrement intéressant pour les produits réfractaires autoliants[1] de SiC. Enfin, le dernier type, dit «métallurgique», est gris-noirâtre et possède le degré de pureté le plus faible (90 à 99%). Il trouve peu d'applications dans les réfractaire et, dû au fait qu'il peut contenir des matières non synthétisées, il peut être recyclé ou vendu à l'industrie métallurgique.

Au Canada, la production du SiC se compose strictement de grains noirs et gris-noirâtres. Le SiC vert est fabriqué seulement par quelques compagnies européennes.

4.2.1 Consommation d'énergie

La réaction globale pour la formation du SiC noir est:

$SiO_2 + 3C \longrightarrow SiC + 2CO$

203,3 28 53,6 K calories

60 + 36 —> 40 + 56 poids moléculaire

---

1. Autoliant «Bonded-SiC»: qui ne nécessite aucun additif extérieur pour la synthétisation du produit.

L'énergie requise pour la réaction est donc:

203,3 - 28 -53,6 = 121,7 calories

ou 1,61 Kwh/lb de produit.

Si nous supposons [40] que le tiers du mélange est converti en SiC, alors pour chaque livre de SiC formée, nous pouvons considérer qu'il restait trois livres de sable de silice et deux livres de coke dans le four. Ainsi, la chaleur contenue dans les matériaux à la fin du cycle est:

1 livre de SiC à 2 000° C	273 K calories
3 livres de sable de silice à 1 000° C . .	302 K calories
2 livres de coke à 1 000° C	284 K calories
	859 K calories

ou 1.00 Kwh/lb de produit.

L'énergie totale requise est:

Chaleur de la réaction	1,61 Kwh/lb
+	
Chaleur contenue dans les matériaux à la fin du cycle	1,00 Kwh/lb
=	
Énergie totale	2,61 Kwh/lb

Cette valeur correspond toutefois à un estimé théorique et serait valable si les fours étaient efficaces à 100%. La réalité est autre et, à ce sujet, les études consultées [12,2] rapportent que l'énergie consommée pour produire une livre de SiC noir peut varier entre 3 et 4 Kwh/lb de produit. Considérant la valeur mitoyenne, soit 3,5 Kwh/lb, cela permet de conclure à un niveau de rendement énergétique d'environ 74%, comparativement à un taux de 71 % calculé par Whittemore [40].

Par ailleurs, des informations obtenues par la compagnie Norton permettent d'établir un niveau de consommation d'énergie d'environ 7,0 Kwh/lb de SiC vert produit. Selon eux, la production du SiC vert est deux fois plus énergivore que celle du SiC noir et ce, pour les raisons suivantes: 1) pour un même chargement, on obtient une proportion de SiC noir supérieure à celle du SiC vert; 2) l'utilisation d'un mélange contenant strictement[1] des matières premières de plus haute pureté nécessite un temps de chauffage plus long.

4.2.2 Coûts de fabrication

Cette sous-section tente d'établir les coûts de fabrication du carbure de silicium vert obtenu par le procédé Acheson. Cela est fait en se basant sur les coûts de

1. Ne contient pas de matières recyclables

production du carbure de silicium noir, et en considérant certaines données sur la production du carbure de silicium vert. Les coûts de production_ du SiC noir nous ont été fournis par la compagnie Norton située à Shawinigan, alors que les informations concernant la production du SiC vert parviennent de la compagnie située en Norvège.

Production maximale d'un four[1] par chargement

Comme point de départ, nous savons qu'un four chargé au maximum produit 9,5 tonnes de SiC noir et 6,7 tonnes de SiC vert (≃70% de la production du SiC noir).

Production maximale d'un four par année

Temps d'opération

365 X 24 heures = 8 760 heures par année

temps d'utilisation = 92% des heures disponibles

temps d'opération = .92 X 8 760 = 8 064 heures par année

Temps de cuisson d'un chargement

Le temps de cuisson d'un chargement est 36 heures pour le carbure de silicium noir et 42 heures pour le carbure de silicium vert. Leur production annuelle

---

1. Four typique de la compagnie Norton à Shawinigan (15 X 35 pieds)

respective est donc:

Sic noir

$$\text{Nombre de charges par année} = \frac{8\ 064 \text{ heures}}{36 \text{ heures}} = 224$$

$$\text{Production annuelle} = \frac{224 \text{ charges} \quad X \quad 9{,}5 \text{ tonnes}}{\text{charge}} = 2\ 128 \text{ tonnes}$$

Sic vert

$$\text{Nombre de charges par année} = \frac{8\ 064 \text{ heures}}{42 \text{ heures}} = 192$$

$$\text{Production annuelle} = \frac{192 \quad X \quad 6{,}7 \text{ tonnes}}{\text{charge}} = 1\ 286 \text{ tonnes}$$

Composition de la charge

En gros, il y a 90 tonnes de mélange par chargement. Les matières premières principales constituant ce mélange sont le sable de silice et le coke de pétrole.

MATIÈRES UTILISÉES	SIC NOIR (tonne)	SIC VERT (tonne)
Sable de silice	14,3	47,7
Coke de pétrole	11,8	41,8
Matières non synthétisées obtenues lors des réactions précédentes	63	-
Autres (graphite, sciures de bois, oxyde d'aluminium)	2 - 3	2 - 3
Production du SiC	9,5	6,7

Coût des matières premières

Pour la fabrication du carbure de silicium noir, le sable de silice utilisé par la compagnie Norton provient du nord de Montréal et coûtait, au premier trimestre de l'année 1988, $36,00 la tonne[1]. Cela est différent pour la production du carbure de silicium vert, laquelle exige une silice plus pure devant être importée des États-Unis. Selon certains experts de la compagnie Norton, on peut évaluer son prix à environ 20% supérieur à celui de la silice québécoise, soit à $43,00 la tonne[1].

En ce qui concerne le coke de pétrole, il provient entièrement des États-Unis. Encore une fois, sa pureté (c'est-à-dire sa teneur en carbone) est un facteur déterminant de la qualité du carbure de silicium. Ainsi, pour la production du SiC noir, la compagnie Norton débourse actuellement $93.00/tonne de coke de pétrole,

1. Incluant le transport

alors que celui-ci se vend environ $120.00/tonne, lorsqu'il satisfait les exigences pour la fabrication du carbure de silicium vert.

Coûts de production du SiC noir

Silice (14,8 t X $36.00) / 9,5 t	$56.00
Coke de pétrole (11,8 X $93.00) / 9,5 t	$116.00
Autres* (sciures de bois, oxyde d'aluminium, huile, etc.) $330/9,51	$40.00
Électricité 3,5 Kwh/lb = 7 000 kwh/t 7 000 Kwh X 2,5 ç	$175.00
Main-d'oeuvre * (incluant les avantages sociaux) La main-d'oeuvre annuelle nécessaire par four est évaluée à $240 064 $240 064/2128t	$113.00
Total	$500.00
Entretien (10% des frais variables)	$50.00
Total des frais variables	$550.00
Frais fixes *	$144.00
Total des coûts de production par tonne	$694.00

* Ces chiffres correspondent aux frais encourus par la compagnie Norton au premier trimestre 1988.

Coûts de production du SiC vert

Silice (477 X $43.00)/ 6,7t	$306.00
Coke de pétrole (41,8 X $120,00) /6,7t	$748.00
Autres On alloue ici le même montant par chargement que celui de la production du SiC noir. $380.00 / 6,71	$57.00
Électricité 7,0 Kwh/lb = 14 000 Kwh/t 14 000 Kwh X 2,5 ç	$350.00
Main-d'oeuvre $240 464 / 1 286 t	$187.00
Entretien	$85.00
Total des frais variables	$1 733.00
Frais fixes $ 144 X (2128t/1286 t)	$238.00
Total des coûts de production par tonne	$1971.00

Tableau 2

Résumé des coûts du SiC Acheson *

	SiC noir	SiC vert
Coût par tonne	$694.00	$1971.00
Coût par livre	34.70 ç	98.50 ç
Coût par tonne métrique	$765.00	$2 172.00
Coût par kilogramme	76.00 ç	$2.17

* Ces coûts sont calculés pour l'année 1988.

4.3 Traitements additionnels

Dans cette sous-section, l'intérêt est de savoir comment les poudres obtenues par le procédé Acheson peuvent être traitées pour fabriquer des céramiques fines, c'est-à-dire des poudres inférieures à un micron.

Partant avec des particules de haute pureté dérivées du procédé Acheson, il s'agit de les broyer très finement par frottement avec des billes d'acier. Cependant, la haute charge tribochimique de cette matière conduit à une augmentation de la contamination causée principalement par l'oxygène et le fer. Une étape de purification est nécessaire afin de les éliminer. À ce moment, un traitement à l'acide hydrochlorique est appliqué, lequel après la neutralisation est suivi par un

enlèvement du SiO_2. Après plusieurs lavages, le produit neutre est séché et désagrégé. La frittabilité est rendue possible grâce à l'ajout de matières telles le carbone et l'aluminium. Il est possible d'obtenir un mélange très homogène, en dispersant la poudre de SiC avec de la poudre d'aluminium et une résine de type phénol-formaldéhyde dans un solvant organique. La poudre dopée est alors mise en forme par un procédé compatible avec la géométrie du produit final (pressage, isostatique, moulage par injection, coulage en barbotine, etc...).

Après une étape de cokéfaction servant à carboniser la résine et enlever les solvants organiques, le façonnage et le frittage du produit vert sont effectués.

4.3.1 Procédés de granulation

Les grandes attentes que les chercheurs ont envers les composantes structurales en céramiques peuvent être atteintes seulement par une combinaison des mesures suivantes: l'élimination des agglomérats durs, l'ajustement de la microstructure en grains fins, l'exclusion des défauts dans la microstructure, une densité uniforme, un traitement sans défauts et l'élimination des contraintes résiduelles. Toutefois, la finesse et la haute pureté des poudres de base nécessaires à l'atteinte de ces objectifs conduisent à des problèmes considérables durant la production de la poudre. En effet, de telles poudres ne sont pas idéales pour l'opération de compactage puisqu'elles possèdent un faible taux d'ouvrabilité. Il est

donc nécessaire de les traiter par un procédé additionnel de granulation, qui leur permettra de couler librement. Cependant, l'exigence d'une microstructure sans agglomérat du produit fritté et, en même temps, une granulation permettant un compactage économique sont contradictoires et rend alors cette étape très critique.

Actuellement, il existe plusieurs procédés de granulation et plusieurs types d'équipement disponibles. Cependant, nous mentionnerons ici que les procédés les plus efficaces, c'est-à-dire ceux permettant d'obtenir les meilleurs rapports qualité/prix. Ces méthodes sont:[1]

. Broyage du produit vert et triage

. Granulation par lit fluidisé

. Séchage par atomisation

. Mélange Eirich

Les caractéristiques concernant la distribution granulométrique des particules, la densité, l'ouvrabilité, la stabilité mécanique, la pressabilité et la tendance à l'agglomération sont représentées au tableau 3. Un coup d'oeil sur celui-ci indique que la méthode du séchage par atomisation et celle du mélange Eirich sont les plus intéressantes pour la production de grains de carbure de silicium convenables comme matériaux céramiques avancées.

---

1. Pour la description de ces procédés, se référer à [39]

Tableau 3

Caractéristiques des différents procédés de granulation

p caractéristiques	broyage du produit vert et triage	granulation par lit fluidisé	séchage par atomisation	mélange Eirich
distribution granulométrique des particules	grossières plusieurs fines	étroite plusieurs fines	étroite	très grossières
densité	faible	relativement	relativement élevée	très élevée
ouvrabilité	très faible	pas assez suffisante	très bien	excellente
stabilité mécanique	pas suffisante	pas complètement suffisante	très bien	assez stable
pressabilité	partiellement possible	suffisante	excellente	bien
agglomération	oui	oui	non	tendance à s'agglomérer

4.3.2 Coûts reliés à l'étape additionnelle de broyage

Pour des raisons de confidentialité, nous n'avons pu obtenir aucun coût concernant l'étape additionnelle de broyage. Cependant, nous avons obtenu[1] les

1. Ces informations ont été obtenues lors d'une communication privée entre J.S. Haggerty et W.R. Cannon.

prix de vente actuels du SiC Acheson en fonction de la grosseur des particules. Le tableau 4 donne ses prix de vente par lot de 5 000 kg. On constate que le prix est essentiellement constant pour les poudres de grosseur supérieure à 100 µm. Au-dessous de 100 pm, le prix augmente rapidement avec la diminution des particules. Les deux dernières données ont été estimées par extrapolation de la relation entre le prix et la grosseur des particules. La courbe obtenue à partir de cette relation est de la forme y= a+b (1/d)

Tableau 4

Prix reliés à la grosseur des particules

grosseur des particules (µm)	prix/kg ($) (en lot de 5000 kg)
650	5
200	5
100	5
80	6
60	7
50	8
10	25
9	40
7	62
5.5	85 *
1	325 *

* Données estimées

Malheureusement, ces prix ne révèlent aucunement les coûts réels encourus par les compagnies, puisque nous n'avons aucune idée des profits générés par la vente de telles poudres. Bien sûr, nous pourrions supposer que ces compagnies font des profits normaux mais tout porte à croire,qu'au contraire, ils soient très élevés. En effet, à l'heure actueIIe, rien n'incite les producteurs à descendre leur prix, et ce, étant donné la faible concurrence et les prix également très élevés du SiC MCA produit par les nouveaux procédés de synthèse.

Un article publié par Hunold [16] donne également des informations sur les prix du carbure de silicium, mais, cette fois, en établissant une échelle de prix selon les différentes tapes de fabrication (figure 9). Le point intéressant à retenir, ici, est qu'il faut considérer le prix des grains fins (≈ 1pm) comme étant quatre fois supérieur à celui des grains grossiers.

Comme on a pu le constater, les valeurs estimées par Haggerty et Hunold sont très éloignées l'une par rapport à l'autre. En effet, alors que le prix estimé par Haggerty pour de la poudre de SiC s $1\mu m$ est de $325.00/kg, celui de Hunold est plus de dix fois inférieur, soit $32.00 /kg. L'utilisation de ces deux approches a, toutefois, constitué la base de nos hypothèses sur l'estimation des prix du SiC.

En fait, pour la première estimation, nous avons, tout comme Hunold, supposer que le broyage d'une poudre en grains 2 lpm quadruple son prix. Ainsi,

puisqu'à la section 4.2.2 nous avons établi le coût de production pour des grains grossiers de SiC vert à $2.17/kg, nous fixerons donc le prix du SiC MCA Acheson à $8.68/kg. Nous pouvons également supposer que cette relation (X4) existe

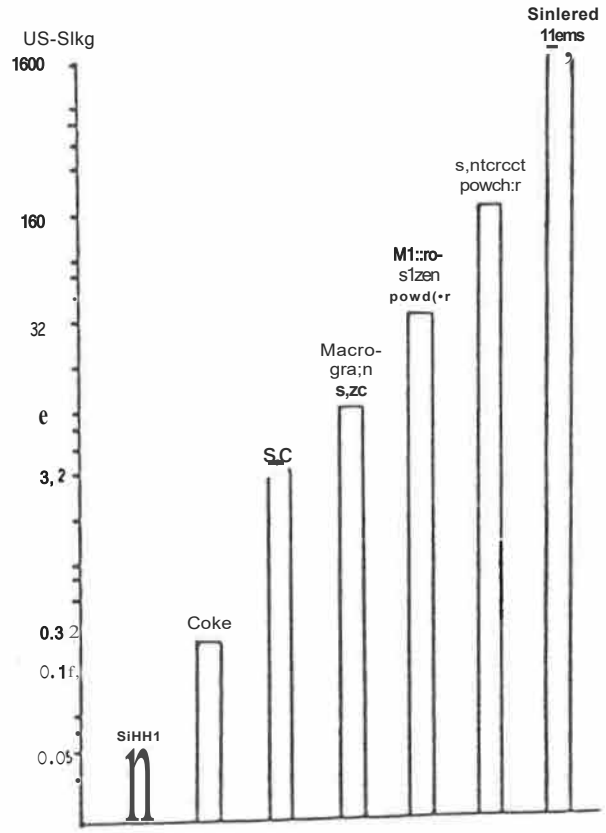


Figure 9

Échelle de prix pour le SiC

SOURCE: K. Hunold [16]

seulement si la poudre est déjà très fine et que, contrairement à Hunold qui aurait choisi une poudre d'environ 50 pm[1], nous considérerons une poudre dont la grosseur des grains est aux alentours de 5 pm. Par conséquent, pour notre deuxième estimation, nous obtenons un prix de $340/kg. En effet, puisque la poudre de *5pm* vaut déjà $85.00/kg[2] et que nous avons supposé, encore une fois, que l'étape additionnelle de broyage quadruplait le prix de la poudre, on obtient donc $85.00 X 4 = $340.00.

Bien sûr, on constate que selon les hypothèses, les deux prix que nous avons estimés sont très éloignés. À la section 5.4, nous verrons, cependant, que chacun des prix estimé_s ($8.68/kg et $340.00/kg) se compare avec l'un ou l'autre des prix ou coûts estimés pour les autres procédés.

---

1. En se référant au tableau 4, un prix de $8.00/kg correspond à une grosseur de 50 *µm*.

2. En se référant au tableau 4, un prix de $85.00/kg correspond à une grosseur de 5,5 *pm*.

5. PRODUCTION DU CARBURE DE SILICIUM PAR DE NOUVEAUX PROCÉDÉS DE SYNTHÈSE

Cette section est une extension de la section 3.1.1 dans laquelle nous avons tenté, lorsque les informations disponibles l'ont permis, d'apporter une description plus détaillée ainsi qu'une évalution des coûts de fabrication, mais cette fois, en excluant les procédés européens et japonais. La raison est que nous nous intéressons principalement aux chances de succès que pourrait avoir une usine implantée au Québec, et, de ce fait, il semble peu réaliste, du moins dans l'immédiat, de croire qu'on puisse s'accaparer une part des marchés européens ou japonais. Par conséquent, dans cette section, nous nous sommes limités aux procédés élaborés en Amérique du Nord, soit le procédé au laser, le procédé Cancarb et celui de C-Axis Technology.

5.1 Procédé au laser

Cette partie résume les principaux développements du procédé de synthèse de poudres développé par les chercheurs du MIT. Leurs expériences ont démontré que les méthodes à partir d'une phase vapeur pouvaient produire des poudres peu coûteuses ayant les caractéristiques idéales, soit: grosseur des particules uniforme, petites particules, formes équiaxiales, absence d'agglomérats et absence d'impuretés ou de déviations par rapport à la stoechiométrie désirée. Quant au traitement

thermique, en considérant les avantages offerts par chacune des possibilités (chauffage optique, RF et micro-ondes, plasmas, arcs, tubes chauffés, etc...), ils ont choisi le chauffage optique. Cependant, bien que celui-ci offre plusieurs sources utilisables pour chauffer les gaz, elles sont habituellement inefficaces. Cela est dû au fait que les gaz possèdent qu'une très faible quantité de lignes d'absorption et que, dans un tel procédé, les gaz sont chauffés par absorption des photons IR. Le laser peut, quant à lui, être très efficace lorsque les lignes d'absorption et les lignes d'émission coïncident. Les caractéristiques importantes qu'il est possible d'atteindre avec celui-ci sont: la création d'une petite zone bien définie; toutes les molécules de gaz sont sujettes à un temps et une température similaires; le traitement des variables peut être manipulé d'une façon définie et reproductible; et, enfin, l'atmosphère peut être contrôlée. Spécifiquement, l'équipe du MIT utilise des lasers au Co_2 lesquels offrent l'avantage d'être économiques, contrôlables et extrêmement fiables.

5.1.1 Description du procédé

La majorité des recherches ont conduit à la cellule de réaction représentée à la figure 10. À partir de celle-ci, les poudres peuvent être synthétisées soit par jet de gaz à contre-courant, soit par jet de gaz à courant transversal.

Dans la configuration à courant transversal, le faisceau laser entre à l'intérieur

de la cellule en passant par une fenêtre KCI. Les gaz réactifs, prémixés et dilués à un gaz inerte, passent à travers un ajutage en acier inoxydable localisé 2 à 3 mm au-dessous du faisceau laser. Les pressions dans la cellule sont maintenues entre .08 et .90 atm. avec une pompe mécanique et une valve. Un courant coaxial d'argon est utilisé pour entraîner les particules dans le jet de gaz et, à ce moment, la poudre est capturée dans un filtre microfibre situé entre la chambre de réaction et un pompe à vide. Plus tard, les particules seront collectées par précipitation électrostatique ou par séparation avec un fluide utilisé pour la dispersion.

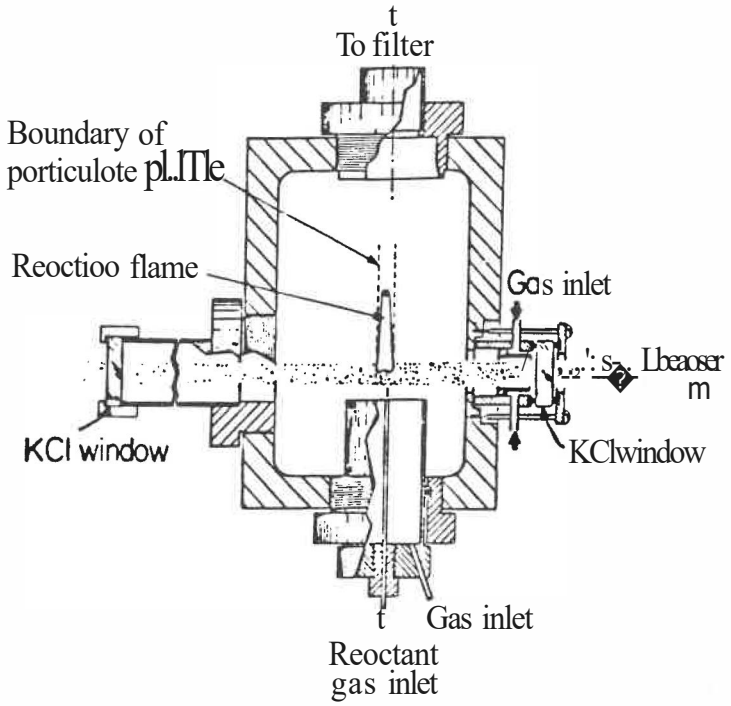


Figure 10

Chambre de réaction

SOURCE: D.R. Ulrich et L.L. Hench [28), p.355.

Bien que ce procédé fonctionne bien, une utilisation beaucoup plus efficace de l'énergie au laser, laquelle est très coûteuse, est essentielle pour une production commerciale. Son inefficacité est due, en grande partie, au fait que pour assurer une intensité uniforme du laser à travers les réactifs, le jet de gaz doit être optiquement très fin et, par conséquent, cela ne permet aux réactifs qu'une absorption d'environ 2 à 5% de la lumière incidente.

En ce qui concerne maintenant la configuration à contre-courant, cette dernière permet simultanément une capture complète de l'énergie sous forme de lumière, ainsi qu'une température et un temps uniformes. Quoiqu'elle constitue une alternative qui satisfasse probablement les exigences de production, cette configuration n'est pas vraiment intéressante pour les programmes expérimentaux nécessitant une manipulation des variables.

5.1.2 Matières requises et conditions de fabrication

Jusqu'à présent, les efforts se sont concentrés principalement sur les poudres de Si, Si_3N_4 et SiC. Elles ont été fabriquées à partir de combinaisons des gaz SiH_4, NH_3 et C_2H_4. Des recherches ont été faites avec du méthane (CH_4), mais les chercheurs ont trouvé qu'avec les conditions requises pour un traitement thermique au laser, le gaz ne réagissait pas pour former du SiC. D'autres gaz tels le CH_3-SiH_3 et le Cl_2SiH_2 ont aussi été explorés pour le SiC et, quoique plusieurs des

recherches sur les procédés ne considèrent qu'un ensemble très limité de composés et de réactifs, il apparaît cependant que les réactions induites au laser soit applicables à une variété assez large de matières.

Les conditions requises pour fabriquer des poudres de SiC sont résumées au tableau 5. Il est possible d'estimer avec précision les taux de chauffage, les taux de nucléation, les taux de croissance et les températures. Pour ce faire, il s'agit de se baser sur une zone mesurée, sur la dimension des particules, sur la vélocité calculée du gaz et, enfin, sur des températures déterminées approximativement à l'aide d'un pyromètre. Pour des conditions typiques de réaction employant un gaz réactif ayant une vélocité d'environ 100 cm^3/ min et une pression de 0,2 atm., le taux de circulation du gaz décroît aux environs de 500 cm/sec à l'ajutage jusqu'à 350 cm/sec au centre du faisceau laser. Avec une flamme NH_3/ SiH_4, la réaction commence 3-5 mm à l'intérieur du faisceau laser. Par conséquent, le temps d'exposition nécessaire pour amorcer la réaction est théoriquement 10^{-3} seconde. Pour une température de réaction se situant vers 1 000° C, cela indique un taux de chauffage du gaz d'environ 10^{6}° C/sec. Le temps et la température, quant à eux, sont considérés comme étant une fonction des différents paramètres du procédé. Ils sont donc estimés en tenant compte des vélocités calculées, des intensités du laser et des taux d'absorption qui ont été mesurés.

Tableau 5

Conditions requises pour le traitement du Si, Si_3N_4 et SiC

Process Variable	Si	ShN	SiC
ICell pressure (atm)	0.2-0.9	0.2-0.9	0.2-0.8
SiH_4 Flow rate (cm^3/min)	5.4-110	*5.4-40*	11-45
NH_3 Flow rate (cm^3/min)	0	44-110	0
C_2H_4 Flow rate (cm^3/min)	0	0	9.0-45
lArFlow rate to annulus plus window (cm^3/min)	560-1450	1000-1100	1000
Laser intensity (W/cm^2)	176-5.4 x 1<>3	530-1 x JOS	530-5.2 x 10'
Reaction zone ten/perature (°C)	750-1390	675-1390	865-1930

SOURCE: D.R. Ulrich et L.L. Hench [28], p.356.

Pour terminer, mentionnons que pour plusieurs conditions du processus, les réactifs sont presque entièrement consommés. Ce fait n'est pas sans importance, surtout lorsqu'il s'agit de réactifs très coûteux.

5.13 Caractéristiques des poudres

La poudre de SiC, fabriquée avec le processus au laser, a démontré les mêmes caractéristiques que celles d'une poudre idéale telle que décrite précédemment. Le

tableau 6 résume les propriétés atteintes avec cette céramique particulière.

Tableau 6

Caractéristiques de la poudre du Si, Si_3N_4 et SiC

Powder Type	Si	SÏJN4	SiC
Mean diameters (À)	190-1700	75-500	200-500
Standard deviation of diameters (% of mean)	46	23	-25
Impurities (ppm by weight)			
02	680-7000	3000	3300-13,000
Total others	200	100	NA
Major elements	Ca,Cu,Fe	AI,Ca	NA
Stoichiometry (%)	—	**0-60**	**0-10**
		(Excess Si)	**(Excess C or Si)**
Crystallinity	**Crystalline** -amorphous	Amorphous -crystalline	**Crystalline Si and SiC**
Grain size : Mean diameter	**!-!**	**- j**	**l-1**

SOURCE: D.R. Ulrich et L.L. Hench [28], p.357.

Une photomicrographie MET de poudres typiques de carbure de silicium montre que les particules sont sphériques et uniformes dans leur grosseur. Le diamètre sphérique équivalent en BET et le diamètre mesuré par les micrographies MET ont toujours été sensiblement égaux. Cela indique que les particules ont des surfaces lisses, pas de porosité possible à la surface, une distribution granulométrique très serrée et des formes presque sphériques. De plus, la densité des poudres mesurée par la pycnométrie à l'hélium indique que les particules n'ont pas de porosité interne.

Par ailleurs, la stoechiométrie de la poudre varie substantiellement, dépendant des conditions du processus. L'utilisation de C_2H_4/ SiH_4 produit des poudres de SiC avec un excès de C ou Si pouvant atteindre jusqu'à 10% du poids. Apparemment, cet excès serait distribué uniformément à travers les particules individuelles.

5.1.4 Coûts de fabrication

Le coût des poudres produites par le processus chauffé au laser a été estimé par l'équipe du MIT. Pour ce faire, ils se sont basés sur la méthode simplifiée d'estimation des coûts décrite par Peter et Timmerhaus [27]. Les coûts des matières, des services publics, de l'énergie et de la main-d'oeuvre sont traités conventionnellement. La simplification majeure est que le coût de l'usine est supposé être un multiple du coût de l'équipement, et que le coût annuel de cette usine équivaut à .202 du coût total de l'usine. L'expérience dans l'industrie chimique démontre que le multiple du coût de l'usine devrait être 4,74 pour un tel processus. Le coût de la main-d'oeuvre est considéré comme étant 1,79 X les salaires directs. Le coût annuel du bâtiment ne sera pas considéré ici, puisque ce dernier n'est pas significatif.

Cette analyse est basée sur les mêmes conditions d'opération employées en laboratoire. Ces dernières sont:

. Diamètre de la buse d'injection	2,0 cm.
. Vélocité du gaz	500 cm/sec.
. Pression du gaz	1 atm
. Efficacité de la réaction	100%
. Efficacité de la capture	100%
. Chauffage par résistance de O- 700° C	
. Chauffage par laser de 700 - 1 000° C	
. Aucune chaleur n'est récupérée	
. Énergie totale requise (Kwh/kg)	1.9

L'utilisation d'une buse d'injection ayant un diamètre de 2 cm est la seule différence significative qui a été supposée. Cette valeur représente approximativement la pénétration maximum du faisceau laser permettant encore de produire des intensités locales uniformes avec de multiples faisceaux diamétralement opposés. Afin de minimiser l'énergie au laser, ils supposent également que les gaz sont préchauffés avant d'être injectés à l'intérieur du faisceau laser.

L'analyse du MIT sur les coûts de fabrication se base sur un système unique fonctionnant à pleine capacité (365 X 24 X .91 = 8 000 hrs/an) et produisant 54,4 tonnes métriques par année. Les coûts annuel considérés sont les suivants:

Usine 95 750$

Le coût de l'équipement est évalué à environ 100 000$. Par conséquent, le coût annuel à considérer pour l'usine est 4,74 X $100 000 X .202.

Main-d'oeuvre 44 750$

Un système fonctionne pendant 8 000 heures et une personne est requise pour trois systèmes. Cela suppose 2 666 heures par système. Le coût est évalué à environ 25 000$ pour les salaires directs. Ainsi, le coût total de la main-d'oeuvre est 25 000$ X 1,79.

Services publics 115 000$

Matières premières 96 300$ à 87 965$

Les coûts du NH_3 et du C_2H_4 sont supposés être $.52/kg et $.50/kg respectivement. Selon des sources informelles, le coût pour le silice peut varier entre $2 et 18$/kg. Étant donné la qualité exigée, les chercheurs du MIT estiment qu'un niveau de $10-15/kg paraît approprié.

Entretien	0$

Ce facteur n'a pas été considéré puisque l'équipe du MIT considère que le coût estimé pour l'installation est déjà surévalué dû au fait qu'il est basé sur un seul système au laser.

Les résultats de l'analyse sur les coûts de fabrication sont les suivants:

Coût total par année (54,4 tonnes métriques)	248 000$ à 1 031 650$
Coût par tonne métrique	4 564$ à 18 964$
Coût par kilogramme	4.56$ à 18.96$

L'hypothèse faite sur le coût du silane, nous permet ici de situer le prix de la poudre aux alentours de $12.00/kg.

Selon l'équipe du MIT, il semble maintenant clair que le processus de synthèse des poudres au laser fonctionne. Il est stable, efficace et les caractéristiques des poudres satisfont un ensemble rigoureux d'exigences. Ce sont la stabilité et l'habileté inhérentes à faire des diagnostics sur le temps réel qui rendent possible l'obtention de poudre de haute qualité. La simplicité ainsi que l'efficacité du matériel et de l'énergie permettent, par ailleurs, aux coûts d'atteindre des niveaux économiques intéressants. Il faut toutefois mentionner qu'un gros

désavantage est la forte sensibilité du coût de la poudre aux variations dans les prix du silane. Par conséquent, si pour une raison quelconque le prix du silane subissait une forte hausse, le coût de la poudre augmenterait tout autant.

5.2 Procédé Cancarb

Ce procédé a été prouvé à l'échelle laboratoire, au Ministère de !'Énergie, des Mines et des Ressources dans les locaux du Canmet, à Ottawa. Les travaux ont été conduits par le Dr M. Kristic, au laboratoire des sciences minérales, entre 1984 et 1986. Depuis, le Dr. Kristic est passé à l'université Queen's à Kingston. À l'heure actuelle, la compagnie Cancarb, détentrice des brevets d'invention, en est à construire un montage à l'échelle pilote. Le tout devrait être en opération vers la fin de 1988.

5.2.1 Description du procédé

Pour l'instant aucun renseignement technique n'est sorti concernant cette unité. En principe, il s'agit de la synthèse pure et simple du SiC à partir de grains purs de silice et de noir de carbone, obtenu dans un four à vide, fonctionnant à 2 000° C. La pression sous vide n'est pas mentionnée, mais devrait se situer aux alentours de 10^{-3} à 10^{-6} atm. Le noir de carbone provient de la décomposition catalytique de CH_4, gaz naturel purifié à la source, dans une usine de Cancarb, en

Alberta. Il s'agirait d'un carbone finement divisé, très réactif, de granulométrie bien contrôlée. La silice serait du sable de quartz.

5.2.2 Caractéristiques des poudres

Les caractéristiques de ce carbure de silicium ne sont pas encore connues. En fait, nous ne savons même pas s'il s'agit d'une poudre ou d'une petite fibre, mais tout porte à croire, qu'il s'agirait d'une fine particule dont le rapport D/L serait inférieur à 10.

5.2.3 Coûts de fabrication

Aucune information n'est encore disponible sur les coûts inhérents à ce procédé, sans aucun doute, très énergivore.

5.3 Procédé de C-Axis Technology

La compagnie Alcan est également très active dans la production du SiC. Sa nouvelle filiale C-Axis Technology, laquelle est une extension de son laboratoire de recherche à Arvida, a mis au point un procédé permettant l'obtention de trichites monocristallins et, éventuellement, de fibres non continues. Tout ce que nous savons sur le procédé est que la cuisson se fait dans un four à résistance en graphite

nécessitant une t° de 2 000° C, donc très énergivore.

5.3.1 Caractéristiques

Quelques-unes des propriétés des trichites fabriqués à Arvida sont énumérées au tableau 7. Quant aux fibres, nous savons qu'elles ont l'apparence du Saffil, Fibermax et Kaowool. Elles sont polycristallines, possèdent un diamètre variant de

Tableau 7

Propriétés des trichites

Structure cristallographique: phase-B Diamètre: 0,3 à 1 μm Ratio: 20 à 50 Surface: lisse Densité: 0,1 -0,2 g/cm^3 Gravité: 3,21g/cm^3 Aire de surface: **(B.E.T.):** 3-4m^2/g

SOURCE: Durai Aluminium Composites Corporation

10 μ à 15 p et mesurent entre 200 JJ et 300 p. Enfin, cette nouvelle fibre dont l'utilité est de renforcer l'aluminium possède le double avantage d'être plus tenace intrinsèquement que ces semblables d'une part, et de ne pas dégrader les propriétés d'autre part.

5.3.2 Coûts de fabrication

Nous ne possédons, encore une fois, aucun coût sur la production de ces fibres et trichites. Nous savons toutefois que les trichites typiques (0,8 μ de diamètre X 40 JJ de longueur) se vendent actuellement entre 200$ et 300$/lb, mais qu'on prévoit pouvoir les vendre aux alentours de 50$/lb d'ici 2 ans. C-Axis est supposée, en plus, commercialiser un trichite de qualité inférieure; moins pur et de plus petit diamètre (0,3 p **à** 0,5 *μ).* Celui-ci devrait se vendre aux alentours de 5$ à 10$/lb. En ce qui concerne les fibres, il est encore trop tôt pour établir les prix. Cependant, si C-Axis désire s'accaparer une part du marché extérieur, elle ne devra pas se contenter d'améliorer les propriétés, mais devra également vendre à des prix compétitifs.

5.4 Comparaison des coûts (prix) estimés

Une comparaison des prix ou coûts estimés pour chacun des procédés étudiés (tableau 8), nous amène à classer les différents produits en deux catégories. Une première classe incluant les poudres et les trichites de première qualité produits respectueusement par le procédé Acheson ($340.00/kg) et par C-Axis ($440.00 à $660.00/kg), et une deuxième classe comprenant, pour sa part, les poudres et les trichites de deuxième qualité fabriqués également par le procédé Acheson ($8.68/kg) et par C-Axis ($11.00 à $22.00/kg). Quant à la poudre produite par le

procédé au laser, il est difficile de la placer dans l'une ou l'autre des catégories car,

Tableau 8

Coûts de fabrication - prix de vente

Procédé	prix de vente ($/kg)
Acheson	
1• qualité	340.00
c-Axis technology	
1• qualité	
prix actuel	440.00 à 660.00
prix prévu d'ici 2 ans	110.00
2• qualité	
(sur le marché d'ici 2 ans)	11.00 à 22.00

Procédé	coûts de production ($/kg)
Acneson	
2• qualité	8.68
Cancarb	??
Laser	10.00

d'une part, ses propriétés en font un produit de premières qualité mais, d'autre part, son coût estimé correspond davantage à celui des produits de deuxième qualité. Étant encore en stade expérimental, cela peut s'expliquer tant par une estimation des coûts que par une évaluation des propriétés trop optimistes faites par l'équipe du MIT. Pour ces raisons, nous préférons l'exclure de notre comparaison.

Par ailleurs, si on compare les deux produits de première qualité, il est

impossible de savoir si les prix de vente reflètent les coûts de fabrication encourus par les producteurs, mais, si tel était le cas, le SiC Acheson démontrerait un avantage financier par rapport aux trichites produits par Alcan[1]. Il ne faut pas oublier, cependant, que les travaux concernant l'application du SiC Acheson dans des secteurs de haute technologie ne sont pas très nombreux et que, jusqu'à présent, on a pas encore établi qu'il pouvait être utilisé comme matériau céramique avancée. En plus, même si les recherches dans ce domaine s'avéraient fructueuses, la relation entre le prix et la grosseur des particules sur laquelle notre estimation se fonde, fait en sorte que si les domaines d'applications nécessitaient des grains inférieurs à 1 pm, le prix de vente augmenterait considérablement et pourrait même atteindre un niveau supérieur à celui des trichites de C-Axis.

En ce qui concerne les produits de deuxième qualité, il semble réaliste de croire en se basant sur le coût et le prix estimés du SiC Acheson ($8.68/kg) et des trichites ($11.00 à $22.00/kg), que pour être compétitif, les coûts de production devront, en général, se situer aux alentours de $10.00/kg. Bien sûr, nous ne sommes pas certains, encore une fois, que les deux produits se retrouvent dans les mêmes domaines d'utilisation. Quoi qu'il en soit, lorsqu'un de ces matériaux satisfera aux exigences d'un secteur en particulier, on peut établir que les prix ne devraient pas dépasser ($20.00/kg).

---

1. C-Axis Technology est une filiale de Alcan

6. AVANTAGES ET RECOMMANDATIONS PROPRES À CHACUN DES PROCÉDÉS

Quelles sont les chances de réussite pour les procédés élaborés au Canada[1]? Il n'est pas facile de répondre à cette question et, c'est pourquoi, nous essayerons plutôt de commenter chacun des procédés en faisant ressortir les aspects positifs qui les caractérisent. Évidemment, cela ne donnera qu'une idée très vague quant à leurs chances de succès, mais une chose est certaine, c'est qu'ils devront tous répondre aux exigences fondamentales qui sont: des prix compétitifs, une bonne qualité et un approvisionnement fiable.

6.1 Procédé Canbarb

Actuellement, le procédé Canbarb est un des rares procédés canadiens connus[2] à offrir la possibilité d'applications dans la fabrication de pièces entièrement en carbure de silicium. Cela s'explique par le fait que selon certains experts, la carbure de silicium utilisable pour de telles applications doit avoir une structure B et que, jusqu'à présent, il n'y a que par le procédé Canbarb que de

---

1. Les procédés étudiés à la section 5, c'est-à-dire Cancarb, Acheson et C-Axis Technology.

2. Présentement, c'est le seul que nous connaissons.

telles poudres sont produites au Canada[1]. Par conséquent, il est donc le seul susceptible de concurrencer directement le procédé au laser mis au point par l'équipe du MIT lequel, d'ailleurs, si les coûts estimés[2] sont adéquats, s'avère très prometteur pour les applications de haute technologie.

Malheureusement, le procédé du Dr Kristic(Cancarb) accuse un sérieux retard sur le procédé au laser et, de plus, avant même de penser à sa commercialisation, de nombreuses recherches restent à faire. Ainsi, pour s'assurer d'une progression plus rapide, le gouvernement canadien devrait élaborer un programme afin d'encourager la recherche au niveau des entreprises privées. Nous pensons, entres autres, aux entreprises de l'industrie chimique qui, d'ailleurs, pourraient investir d'importantes sommes d'argent dans l'espoir de trouver de nouveaux débouchés.

6.2 Procédé Acheson

On ne sait pas encore si les particules produites par le procédé Acheson, lesquelles ont une structure a, pourront avoir, tout comme les poudres B, des applications dans les éléments fabriqués en carbure de silicium ou encore, si elles pourront trouver d'autres débouchés tels les renforts, les composites de pointe, etc.

---

1. Les particules produites par C-Axis Technology ont également une structure B, mais cette dernière fabrique surtout des fibres et/ou des trichites.

2. Voir la section 5.1.4.

Ainsi, il serait intéressant d'en connaître davantage sur les applications potentielles de ce type de carbure de silicium, car celles-ci pourraient constituer de nouveaux débouchés pour l'industrie traditionnelle du carbure de silicium. Un autre facteur incitatif pour encourager la recherche dans cette industrie est, qu'au Québec, tout comme dans d'autres provinces canadiennes, l'infrastructure industrielle est déjà existante et, de ce fait, ne nécessiterait pas de dépenses aussi importantes que les dépenses que devrait encourir l'industrie chimique. En plus, étant donné le caractère incertain des débouchés potentiels d'une part, et un marché se faisant très captif d'autre part, les entreprises de l'industrie chimique peuvent hésiter longtemps avant d'investir de grosses sommes d'argent dans le développement du SiC MCA.

6.3 Procédé de C-Axis Technology

Jusqu'à présent, les recherches effectuées dans les laboratoires de C-Axis Technology ont été orientées de façon à satisfaire une demande interne de l'entreprise Alcan, soit la mise au point de trichites et de fibres en carbure de silicium pour les matériaux à matrice métallique.

Le transfert de leur technologie sur les matrices à composites métalliques constituerait un apport important pour l'industrie du carbure de silicium. L'aspect positif serait de profiter de l'expérience acquise dans les laboratoires d'Alcan sur les

composites de pointe. Une expérience qui, en fait, pourrait aboutir à des résultats intéressants sur la technologie des composites à matrice céramique, laquelle se fonde, avant tout, sur la recherche réalisée dans le domaine des composites à matrice métallique.

Enfin, pour terminer, mentionnons que même si les matrices céramiques en sont encore à des utilisations très limitées, on entrevoit plusieurs débouchés dans les secteurs de l'aérospatiale, l'automobile, les pièces de machinerie, les renforts et autres produits créneaux tels les prothèses et les bottes de sécurité.

7, CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES

Depuis quelques années, la connaissance des matériaux en Europe, au Japon et aux États-Unis fait des pas de géant et, par conséquent, de nouveaux matériaux viennent se substituer aux matériaux traditionnels avec une rapidité croissante. Le Canada étant l'un des plus grands producteurs et exportateurs de métaux au monde, les pressions concurrentielles exercées par ces nouveaux matériaux, en particulier les plastiques, pourraient menacer la croissance de certains marchés. De plus, l'importance pour le Canada de développer et de mettre au point des nouveaux produits à plus haute valeur ajoutée n'est plus discutable. Devant ces faits, il n'est donc pas étonnant que, lors d'une enquête effectuée par l'Association des manufacturiers canadiens, la première place ait été donnée aux développements de matériaux à haute valeur ajoutée.

Ce sur quoi il faut maintenant s'interroger, c'est sur l'orientation que le Canada doit prendre s'il tient à jouer un rôle actif dans le développement de nouveaux matériaux. Pour plusieurs raisons, le secteur des matériaux céramiques avancées semble un choix stratégique pour le Canada et, plus spécifiquement, les poudres semblent un créneau intéressant pour le Québec. Les nombreux avantages motivant ce choix sont:

- l'accès à des sources énergétiques abondantes et peu dispendieuses;
- un accès facile à toute la gamme des matières premières dont l'industrie

a besoin;

- l'infrastructure industrielle déjà existante (la compagnie Norton à Shawinigan par exemple);
- l'expérience et l'expertise éprouvées dans le domaine des matériaux céramiques (les compagnies Norton, Alcan, etc.);
- et, le fait qu'au niveau international, les dépenses importantes pour la recherche et développement ont surtout été orientées vers la mise au point, les essais et la commercialisation des produits finis. Ainsi, les pays tels le Japon, les États-Unis, l'Allemagne et l'Angleterre ont déjà pris une avance considérable dans ces secteurs d'activité, et il serait difficile pour le Canada de les rattraper.

Sans s'arrêter spécifiquement à la production du carbure de silicium, la majorité de ces avantages constituent, sans contredit, les principaux arguments à invoquer pour justifier la production au Québec de matériaux industriels. D'ailleurs, les méga-projets en cours ou annoncés depuis peu, notamment dans le secteur de l'aluminium, démontrent à quel point ces avantages présentent des atouts importants pour le Québec. Ces projets sont ceux d'Alumax, producteur américain d'aluminium, qui investira $1 milliard pour la construction d'une aluminerie dans la région du Québec, d'Alouette pour la construction d'une aluminerie de $1,7 milliard à Sept-Iles, d'Alcan pour son usine de Laterrière évaluée à $800 millions et de Reynolds et d'ABI qui investissent, toutes deux, $500 millions pour

l'agrandissement de leur usine située respectivement à Baie Corneau et à Bécancour. De plus, on s'attend à ce que ces investissements dans le secteur de l'aluminium stimulent grandement la recherche au niveau de l'élaboration de nouveaux produits à haute valeur ajoutée ainsi que dans le développement de nouvelles technologies. À l'heure actuelle, le gouvernement a déjà annoncé la mise sur pied d'un Bureau des retombées et d'un Institut de recherche et de développement de l'aluminium afin de maximiser l'impact économique de ces gros projets au Québec. On compte déja un certain nombre de projets au Québec, dont Montupet pour une usine de pièces d'automobile, Reynolds pour une usine de jantes de roues et, finalement, Alcan pour une usine de dural, un matériau composite d'aluminium et de carbure de silicium.

Nonobstant ces nombreux avantages, il reste toutefois que la taille modeste du marché interne canadien, si on compare aux autres pays, constitue un sérieux handicap pour le développement des céramiques avancées, à moins bien sûr que la production soit orientée vers les marchés d'exportations. Cela peut paraître très optimiste mais il ne faut pas oublier qu'étant donné le nombre relativement faible de producteurs de poudres fines au niveau international, les manufacturiers étrangers, s'ils veulent commercialiser davantage leurs pièces en céramiques, auront besoin de sources sûres, fiables et peu dispendieuses. Pour cette raison, il peu donc paraître naturel de compter sur les marchés extérieurs.

En dépit de tout cela, on doit maintenant s'assurer qu'il existe un marché international pour le SiC MCA. On retrouve dans la littérature un grand nombre d'estimations et prévisions du marché actuel et futur des céramiques avancées. Malgré des différences notables dans les méthodes de prévision, les différentes études consultées [18, 24, 29] confirment qu'il existe effectivement un marché pour les céramiques avancées, et que celui-ci devrait atteindre un taux de croissance oscillant entre 10 et 20% d'ici 10 ans. À ce sujet, une enquête Delphi sur la pénétration des matériaux céramiques avancées dans les moteurs a été menée par D. Leblanc et M. Rigaud [44]. Un des résultats intéressants de cette enquête est l'estimation d'une demande pour chacun des matériaux céramiques avancées. La valeur estimée pour la demande des matériaux à base de carbure de silicium[1] se situe aux alentours de 35 000 tonnes par an pour les applications dans les moteurs en l'an 2 000.

En résumé, on peut donc affirmer qu'il existe, à long terme, un marché pour le SiC MCA et ce, même avec une faible progression des produits finis car, d'une part, la quantité de poudres requise pour produire une pièce en céramique sera toujours très importante et, d'autre part, les poudres produites pourront trouver une utilité dans n'importe quel secteur.

---

1. Cette estimation inclut le carbure de silicium en tant que céramique monolithique dense et les matériaux à matrice métallique suivants: SiC/Al et Al_2O_3/Al.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Agarwal, T.C., "Process Economies and Strategies in the Advanced Ceramics lndustry". Adv. Cer. Mat., pp. 332-334, Vol. 1, No. 4 (1986).

2. Ault, N.N., "Raw Materials For Refractories: SiC and Si_3N/ . Ceram. Eng. and Science proc., pp. 186-193 (January 1983).

3. Austin, G.T., "Shreve's Chemical Process Industries" (5th Edition). McGraw Hill, N.Y. (1984).

4. Baumann, H.N., "The Relationship of Alpha and Beta Silicon Carbide". J. of the Electroche. Soc., pp. 109-114 (March 1952).

5. Boch, P., «Matériaux céramiques à vocations thermomécaniques». Matériaux et techniques, pp.155-162 (avril-mai 1985).

6. Bunsell, A., «Les matériaux composites à matrice métallique au Japon». L'industrie céramique, p. 642 No. 830, 9 (1988).

7. Cannon, W.R., Haggerty, J.S. et al., "Sinterable Ceramic Powders From Laser-Driven Reactions: I, Process description and Modeling". J. Am. Ceramic. Soc., pp. 324-335, vol. 65, No. 7 (1982).

8. Colombam. P., «Poudres sur mesure: La clé des céramiques fiables ?». L'industrie céramique, pp 250-252, No. 815, 4 (1987).

9. Cotto, D., Gauthier, M. et Lawure, C., «Les programmes «moteurs avancés» du Département Américain de !'Énergie». L'industrie céramique, pp. 232-235, No. 815, 4 (1987).

10. Das, S. et Curlee, T.R., "Microwave Sintering of Ceramics: Can We Save Energy ?" Am. Cer. Soc. Bull, pp. 1093-94, vol. 66, No. 7 (1987).

11. Dickson, T., "Silicon Carbide - Through Hard Times". Industrial Minerals, pp. 65-71 (December 1980).

12. Dickson, T., "Niagara Falls - Power to the Minerals". Industrial Minerais, pp. 39-42 (February 1983).

13. Douspis, M., «Axes de développement actuels en matière de cuisson céramique au gaz». L'industrie céramique, pp. 24-26, No. 812, 1 (1987).

14. Finlay, G.R., "Calculated Energy Requirements of Electric Furnace Products". Chemistry in Canada, Norton Company, pp.25-28 (Feburary 1952).

15. Fisher, G., "Strategies Emerge for Advanced Ceramic Business". Ceramic Bulletin, pp. 39-41, vol. 65, No. 1 (1986).

16. Hunold, K., "High Performance Ceramics: Silicon Carbide (SiC), and Old Acquaintance". Advanced Ceramics, pp. 35-39, No. 1 (1988).

17. James, J. et Rao, M.S., "Characterization of Silica in Rice Husk Ash". Am. Ceramic Soc. Bull., pp. 1177-80, vol. 65, No. 8 (1980).

18. Kenny, G. B. et Bowen H.K., "High Tech Ceramics in Japan: Current and Futur Markets". Ceramic Bulletin, pp. 590-596, vol. 62 No. 5 (1983).

19. Lenoe, E.M., Katz, R.N. et Burke, J.J., "Ceramics for High-Performance Applications III Reliability". Plenum Press, N.Y. (1979).

20. Levine, L.D. "Manufacturing Processes for High-Temperature Structural Ceramics: A Patent Trend Analysis". Gaz Research Institute (December 1986).

21. Li, W.L., Huang, X.Z., Tan, S.H. et Yen, T.S., "Preparation of Sorne High Purity Ultrafine Non-oxide Powders". Cer. Powders, pp. 403-412 (1983).

22. Mantell, C.L., "Electrochemical Engineering" (4th Edition). McGraw Hill, N.Y. (1960).

23. Mintolle, L., «Nouvelles céramiques et utilisations nouvelles». Matériaux et techniques, pp. 149-153 (avril-mai 1985).

24. Murthy, M.K., "Advanced Ceramics: Technology Situation Report". Ottawa (September 1985).

25. Niel, B., «Ceramiques dans le moteur diesel: voies ouvertes vers l'industrialisation". L'industrie ceramique, pp.88-92, No. 824, 2 (1988).

26. Pask, A.J. et Fulrath, R.M., "Ceramic Microstructure 76". West View Press Colorado (1977).

27. Peter, N.S. et Timmerhaus, R., "Plant Design and Economies for Chemical Engineers" (2th Edition). McGraw Hill, N.Y. (1968).

28. Ulrich, D.R. et Hench, L.L., "Ultrastructure Processing of Ceramics, Glasses, and Composites". John Wiley and Sons (1984).

29. U.S. Department of Commerce, "A Competitive Assessment of the U.S. Advanced Ceramics Industry". Washington (March 1984).

30. Retout, O., «Les céramiques dans les moteurs». Matériaux et techniques, pp. 13-15 (janvier - février 1987).

31. Rothman, E.P., Clark, J.P. et Bowen, H.K., "Cost Modeling of Structural Ceramics". Adv. Cer. Mat., pp. 34-38, vol. 2, No 1 (1987).

32. Sanders, H.J., "High-Tech. Ceramics". Chemical and Engineering News, pp. 26-40, vol. 62, No. 19-35 (July 1984).

33. Sheppard, L.M., "Canada Chases the Ceramics Market". Adv. Mat. & Processes, pp. 11-14, 3 (1987).

34. Sheppard, L.M., "Ceramics at the Cutting Edge". Adv. mat. & processes, pp. 73-79, 8 (1987).

35. Thompson, M., "Theoretical and Applied Electrochemistry" (3rd Edition). The MacMillan Company, N.Y., (1989).

36. Torre, J.P., «Fabrication de pièces mécaniques en céramiques». Matériaux et techniques, pp. 143-148 (avril-mai 1985).

37. Wang, F.Y., "Treatise on Materials Science and Technology: Ceramic Fabrication Processes". Academic Press, N.Y. vol. 9 (1976).

38. Wei, G.C., "Beta SiC Powders Produced by Carbothermic Reduction of Silica in a High-Temperature Rotary Furnace". Comm of the Am. Ceram. Soc., pp. C-111 - C-113 (July 1983).

39. Werner, H., "Industrial Processing Engineering". Publishing House Vogel, Würzburg (1980).

40. Whittemore, O.J., "Energy Consumption in Ceramic Processes". Ceramic Bulletin, pp. 456-457, vol. 53, No. 5 (1974).

41. Yajima, S., Okamura, K., Hayashi, J. et Omori, M., "Synthesis of Continuous SiC Fibers with High Tensile Strength". J. of the Am. Cer. Soc., pp. 324-327, vol. 59, No. 7-8 (August 1976).

42. Conseil des sciences du Canada, «Les technologies-clés: porte ouverte sur notre compétitivité future». Ottawa (février 1989).

43. Larsen, **R.P.,** et Vyas, **A.D.** «The outlook for ceramics in heat engines, 1990-2010: Results of a worldwide Delphi survey», Society of automotive engineers, Inc, #880514 (March 1988)

44. Leblanc, D. et Rigaud, M., «Enquête Delphi sur la pénétration des matériaux céramiques avancées dans les moteurs», Ministère du transport du Québec (octobre 1987).

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
3 9334 00242635 9