

# CANMET

Canada Centre  
for Mineral  
and Energy  
Technology

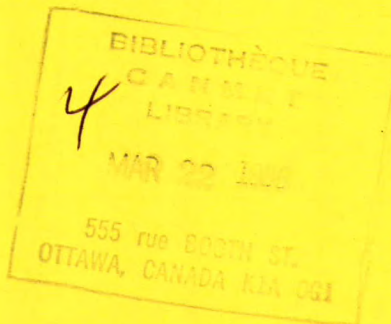
Centre canadien  
de la technologie  
des minéraux  
et de l'énergie

## RAPPORT 80-11F

*SLR  
622 (21)  
C212 tc  
F*

### EXAMEN DES ISOLANTS MINÉRAUX

AA. WINER ET S.B. WANG



PROGRAMME DE RECHERCHE SUR LES MINÉRAUX

LABORATOIRES DES SCIENCES MINÉRALES

FÉVRIER 1980



Energy, Mines and  
Resources Canada

Énergie, Mines et  
Ressources Canada

Canada



© Minister of Supply and Services Canada 1981

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1981

Available in Canada through

En vente au Canada par l'entremise de nos

Authorized Bookstore Agents  
and other bookstores

agents libraires agréés  
et autres librairies

or by mail from

ou par la poste au:

Canadian Government Publishing Centre  
Supply and Services Canada  
Hull, Quebec, Canada K1A 0S9

Centre d'édition du gouvernement du Canada  
Approvisionnement et Services Canada  
Hull, Québec, Canada K1A 0S9

CANMET

CANMET

Energy, Mines and Resources Canada,  
555 Booth St.,  
Ottawa, Canada K1A 0G1

Énergie, Mines et Resources Canada,  
555, rue Booth  
Ottawa, Canada K1A 0G1

or through your bookseller

ou chez votre libraire.

Catalogue No.: M38-13/80-11F

Canada: \$2.00

N° de catalogue: M38-13/80-11F

Canada: \$2.00

ISBN: 0-660-90850-6

Other countries: \$2.40

ISBN: 0-660-90850-6

Hors Canada: \$2.40

Price subject to change without notice.

Prix sujet à changement sans avis préalable.

## EXAMEN DES ISOLANTS MINÉRAUX

par

A.A. Winer\* et S.B. Wang\*

## RÉSUMÉ

Les produits isolants minéraux sont fabriqués à partir d'une fibre de verre obtenue en faisant fondre des mélanges de matériaux inorganiques. Ils constituent un élément simple et économique de conservation de l'énergie. La pénurie éventuelle de carburants et l'augmentation des coûts qui en résultera auront un effet sur la plupart des secteurs de l'économie canadienne. Le Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET) participe à un projet sur les isolants minéraux. En conséquence, une revue de la documentation et des visites en industrie ont été effectuées, et des discussions ont été entamées avec des spécialistes de la technologie de l'isolation. La composition du mélange inorganique et la température influencent la structure du verre et c'est cette structure qui détermine les propriétés du verre. Les paramètres importants pour la mise en fibre du verre sont la viscosité, la température, la tension superficielle et la densité. Les diagrammes d'équilibre de phase sont très utiles pour déterminer la composition optimale et la température adéquate de formation des fibres.

La plupart des producteurs de minéraux au Canada utilisent le cubilot et le procédé de centrifugation, mais le four électrique est de plus en plus utilisé à cause de ses avantages intrinsèques notamment la possibilité d'employer une charge plus fine donc plus homogène; celui-ci est aussi plus facile à contrôler et réduit la pollution de l'environnement. Dans la fusion électrique, la conductivité électrique est un important paramètre et est fonction du degré d'ionisation.

Des essais sont effectués sur des produits isolants minéraux afin d'en vérifier la conformité aux normes établies pour l'industrie, les immeubles et le secteur résidentiel. Ces normes diffèrent à travers le pays selon les exigences locales particulières.

---

\*Chercheurs scientifiques, Laboratoire du traitement des minéraux, Laboratoires des sciences minérales, Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa.

## MINERAL INSULATION - A CRITICAL STUDY

by

A.A. Winer\* and S.B. Wang\*

## ABSTRACT

Mineral insulation, a glass fibre product formed from melting mixtures of inorganic material, is a simple and economical component in energy conservation. Because of expected shortages in energy fuels and subsequent increases in costs, all economic sectors will be effected. The Canada Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET) is involved in a project on mineral insulation. As part of this project, a critical study of the literature and field trips to industry have been made and discussions held with experts in insulation technology.

Composition of the inorganic mixture and temperature both influence glass structure, and structure in turn determines glass properties. Important parameters in fiberizing the glass are viscosity, temperature, surface tension and density. Phase equilibria diagrams are very useful in determining optimum composition and correct fiberizing temperature.

Most mineral producers in Canada use the cupola melting furnace and wheel spinning process but the electric furnace is becoming more popular because of its inherent advantages such as the ability to use a finer and therefore more homogeneous charge; it is also more easily controlled and inhibits environmental pollution. In electric melting, electrical conductivity is an important parameter and is related to the degree of ionization.

Tests are performed on mineral insulation products to satisfy standards established for applications in industry, building, and homes. Such standards are not all uniform across the country but may vary according to local requirements.

---

\*Research scientists, Mineral Processing Laboratory, Mineral Sciences Laboratories, Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa.

## TABLE DES MATIÈRES

	<u>Page</u>
RÉSUMÉ .....	i
ABSTRACT .....	ii
INTRODUCTION .....	1
LE VERRE ET LA FIBRE DE VERRE .....	1
Considérations fondamentales .....	1
Le verre et ses propriétés .....	2
Viscosité .....	4
Liquidus .....	8
Densité .....	8
Conductivité électrique et thermique .....	9
Tension superficielle .....	11
MATIÈRES PREMIÈRES .....	12
FABRICATION DE LA LAINE MINÉRALE .....	12
Le cubilot .....	13
Réactions dans un cubilot .....	16
Fours électriques de fusion .....	18
Fours à induction ou fours électriques à haute fréquence .....	19
Autres types de four .....	20
Paramètres de mise en fibre .....	21
Filage .....	21
Soufflage du liquide .....	22
Considérations environnementales .....	22
Evaluation des isolants thermiques .....	22
RÉFÉRENCES .....	25

## TABLEAUX

1. Types de forces de liaison et d'attraction entre les cations et l'anion $O^{2-}$ .....	3
2. Viscosité et résistivité de laitiers à 1500°C .....	5
3. Viscosité de bains de $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ entre 1450 et 1600°C .....	6
4. Viscosités de quelques liquides, roches et minéraux .....	7
5. Variations de la composition d'un verre fondu .....	11
6. Tension superficielle de mélanges fondus dans les systèmes $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ et $CaO-MgO-SiO_2-Al_2O_3$ à 1450°C ....	12
7. Valeurs calculées de la tension superficielle d'oxydes métalliques .....	12
8. Principales matières premières utilisées dans la fabrication du verre .....	14
9. Points de fusion de certains composés entrant dans la fabrication du verre .....	15
10. Types d'émission dans les usines d'isolants minéraux .....	24

## Table des matières (suite)

## FIGURES

1. Liaison de groupes $\text{SiO}_4$ avec des ions oxygène commun .....	2
2. Structure de la silice: a) solide; b) fondue .....	3
3. Relation entre la viscosité et la résistivité .....	5
4. Variation de la viscosité avec la composition dans le système $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ .....	8
5. Variation de la viscosité avec la température et la composition de silicates et d'aluminosilicates fondus .....	9
6. Diagramme de l'équilibre des phases du système ternaire $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ .....	10
7. Diagramme de l'équilibre des phases du système $\text{Na}_2\text{O-CaO-SiO}_2$ .....	11
8. Variation de la densité avec la température pour le système $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ .....	12
9. Variation de la tension superficielle avec la teneur en $\text{SiO}_2$ à $1450^\circ\text{C}$ .....	13
10. Diagramme schématique d'un cubilot utilisé pour la production de fibres de laine de roche .....	16
11. Diagramme schématique des zones de température et des principales réactions dans un cubilot .....	17
12. Diagramme schématique montrant les températures dans les diverses zones de réaction d'un cubilot .....	17
13. Représentation schématique des principes de fonctionnement de deux types de fours à arc électrique ....	19
14. Schéma d'un four à haute fréquence à pression atmosphérique .....	20
15. Fabrication de fibres de verre à partir de mélange fondu .....	21
16. Section transversale de l'avant-corps avec illustration de la filière et de l'écoulement de la fibre de verre .....	22
17. Diagramme schématique d'une usine de laine de roche .....	23
18. Four pochet .....	23
19. Diagramme d'acheminement d'un procédé de fabrication de laine minérale avec les émissions des divers stades dans l'atmosphère .....	24



## INTRODUCTION

Le terme générique "isolants thermiques minéraux" décrit divers produits de verre qui se distinguent les uns des autres par la composition de la charge originale d'alimentation du four. La laine de roche, la laine de laitier et la fibre de verre sont des termes qui correspondent à des produits particuliers. Du point de vue de la minéralogie, toutes les fibres isolantes fabriquées à partir d'une charge de matériaux inorganiques sont assimilées au verre dans sa forme fibreuse finale. Cependant, les "isolants de fibre de verre" classiques sont fabriqués à partir d'un mélange de minéraux industriels semblables à ceux que l'on utilise pour fabriquer du verre. Le terme laine de roche comprend des produits obtenus à partir de matériaux calcaires et siliceux, et les principaux composants de la laine de laitier comprennent des laitiers provenant de hauts fourneaux, de fonderies de cuivre, etc.

Les isolants minéraux ont un rôle vital à jouer dans les économies d'énergie qui occupent maintenant une place de premier plan dans l'économie canadienne. En raison de pénuries prévues de combustibles énergétiques comme le gaz et le pétrole, rares sont les secteurs de l'économie canadienne qui ne seront pas touchés à l'occasion. Le ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources a donc mis l'accent sur les économies d'énergie dans ses programmes de recherche énergétique.

Conscient de la nécessité imminente d'économiser l'énergie, le Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie a lancé un projet visant à produire des isolants minéraux. Les recherches expérimentales se sont déroulées avec succès et le projet se poursuit maintenant à un rythme plus intensif.

### LE VERRE ET LA FIBRE DE VERRE

#### CONSIDÉRATIONS FONDAMENTALES

Du point de vue minéralogique, toutes les fibres minérales qui sont utilisées comme isolants sont formées comme le verre, soit en vrac, soit sous forme fibreuse, au moment du refroidissement

d'une matière inorganique fondue. Morey a défini le verre comme étant une substance inorganique qui est le prolongement de son état liquide et lui est analogue, mais que l'on peut considérer comme rigide étant donné un changement réversible de viscosité pendant le refroidissement (1).

La composition du verre et ses antécédents thermiques, par exemple, la température de fusion, le taux de refroidissement et la température à laquelle se forment les fibres, déterminent ses propriétés. La structure à la température ambiante correspond à la structure d'équilibre que cette composition aurait à l'état liquide à une température élevée. Cette équivalence de structures est la température de configuration (2).

Dans la structure des oxydes solides, les cations métalliques sont entourés par des ions oxygènes dans un réseau cristallin à trois dimensions. Chaque cation est entouré du nombre maximal d'anions oxygène, appelé nombre de coordination, qui ne dépend que de la taille et de la charge des ions. Pendant la fusion, le réseau cristallin est détruit et, à l'état liquide, les liens entre les ions sont rompus par agitation thermique. Les cations sont toujours entourés d'anions, mais moins rigidement, et le nombre de coordination peut varier (3). Loewenstein cite les exemples suivants:

1. Des ions  $\text{Si}^{4+}$  entourés de quatre  $\text{O}^{2-}$  ions forment le groupe  $\text{SiO}_4$ .
2. Des ions  $\text{Si}^{4+}$  ont besoin de 6 ions fluorés en raison des faibles rayons de  $\text{F}^-$  pour former suffisamment de  $\text{SiF}_6$  et assurer une protection convenable du champ électrique (2).

À cet égard, il est important de signaler que la protection requise s'atténue à mesure que la température augmente. Par exemple,  $\text{TiO}_6$  à la température ambiante peut devenir  $\text{TiO}_4$  à des températures élevées.

Les ions essaient de protéger leur champ électrique avec des ions de charge contraire. Cette compétition d'ions de charge différente est reliée au pouvoir polarisant. La résistance du champ d'un ion, mesure du pouvoir polarisant, est donnée par l'expression  $Z/r^2$ , où  $Z$  = la charge de l'ion et  $r$  = le rayon ionique (2). C'est de ces considérations que découlent les énoncés suivants:

- a) Le pouvoir polarisant, qui varie directement comme la résistance du champ, nécessite la présence d'ions de charge contraire dont le nombre est lié à la résistance du champ.
- b) D'après la formule susmentionnée, la résistance de champ est maximale lorsque Z est élevé et r est faible.

À de fortes résistances de champ, les exigences de protection des ions sont si fortes qu'un ion positif entouré d'ions négatifs peut partager ses électrons; la mobilité des ions peut être restreinte, sauf à de très hautes températures. Ce type de liaison intermédiaire entre des électrons communs (liaison covalente) et des électrons donnés (liaison ionique) caractérise les formateurs du verre, la silice ( $\text{SiO}_2$ ) en étant le meilleur exemple.

Un exemple de forces de liaison et de forces attractives est montré à la Fig. 1 dans laquelle la silice contient des anneaux de groupes  $\text{SiO}_4$  avec des ions  $\text{O}^{2-}$  communs aux ions  $\text{Si}^{4+}$ .

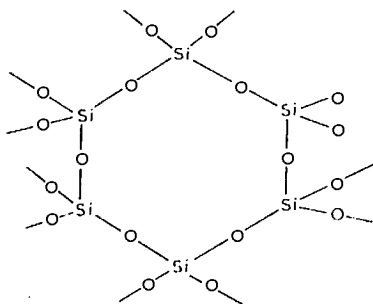
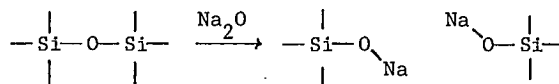


Fig. 1 - Liaison de groupes  $\text{SiO}_4$  avec des ions oxygène commun (2)

Le tableau 1 montre les types de forces de liaison et de forces attractives pour les oxydes de minéraux en scories qui servent à la production d'isolants minéraux.

L'alumine est un type spécial de formateur de réseaux parce qu'elle est amphotère. Elle forme des groupes  $\text{AlO}_4$  dans les verres et a besoin d'ions de charge positive pour garantir une neutralité électrique. Les modificateurs de réseau, comme les oxydes basiques, par exemple,  $\text{CaO}$ ,  $\text{BaO}$ ,

$\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$ , provoquent la rupture des ponts  $\text{Si-O-Si}$  et, par le fait même, réduisent la température de fabrication du verre comme le démontre l'équation suivante:



Chaque ion a un champ électrique associé à la résistance de son champ. L'ion qui s'adapte au réseau est entouré par un certain nombre d'ions oxygène. Le champ électrique de l'ion est convenablement protégé à la température de configuration.

Les oxydes intermédiaires, comme  $\text{MgO}$ ,  $\text{BeO}$  et  $\text{TiO}_2$ , peuvent adopter des positions en fonction de la température de composition et de configuration du verre.

#### LE VERRE ET SES PROPRIÉTÉS

Le verre à base de silice peut être fabriqué en chauffant le mélange à  $1300\text{--}1600^\circ\text{C}$ , ce qui entraîne la modification du réseau de silice, et d'autres modifications de structure. La Fig. 2 montre la structure de la silice à l'état solide et en fusion.

Il n'existe pour la silice aucun point de fusion bien défini qui indique le passage de l'état liquide visqueux et seul le chauffage prolongé à environ  $1200^\circ\text{C}$  permet la cristallisation. Les niveaux énergétiques entre l'état vitreux et l'état cristallin sont faibles.

Les propriétés des verres sont en général liées à leur structure (4). Les oxydes qui peuvent aussi influencer la propriété et les structures d'un verre appartiennent à des groupes distincts comme le montre la dernière colonne du tableau 1.

La limite élastique d'un verre est beaucoup plus faible qu'en théorie, en raison des défauts qui apparaissent à la surface. Ce fait a été démontré lorsqu'on faisait disparaître ces défauts par gravure: la limite élastique augmentait alors considérablement. Cette limite élastique du verre diminue aussi lorsque la température augmente. La résistance de la fibre de verre mesurée à la température ambiante et en



Tableau 1 - Types de forces de liaison et d'attraction entre les cations et l'anion  $O^{2-}$  (3)

Oxyde	$z/(R_c + R_a)^*$	Fraction ionique de liaison	Nombre de coordinence		Caractère de l'oxyde
			solide-liquide		
$Na_2O$	0,18	0,65	6	6 à 8	
$BaO$	0,27	0,65	8	8 à 12	
$SrO$	0,32	0,61	8		
$CaO$	0,35	0,61	6		Oxydes modificateurs
$MnO$	0,42	0,47	6	6 à 8	de réseaux ou
$FeO$	0,44	0,38	6	6	oxydes basiques
$ZnO$	0,44	0,44	6		
$MgO$	0,48	0,54	6		
$BeO$	0,69	0,44	4		
$Cr_2O_3$	0,72	0,41	4		
$Fe_2O_3$	0,75	0,36	4		Oxydes amphotères
$Al_2O_3$	0,83	0,44	6	4 à 6	
$TiO_2$	0,93	0,41	4		
$SiO_2$	1,22	0,36	4	4	Oxydes formateurs de
$P_2O_5$	1,66	0,28	4	4	réseaux ou oxydes acides

\* $F = 2ze^2/(R_c + R_a)^2$  proportionnel à l'attraction entre les ions, où

F = la force d'attraction entre les anions et les cations

$R_a + R_c$  = distance entre les ions

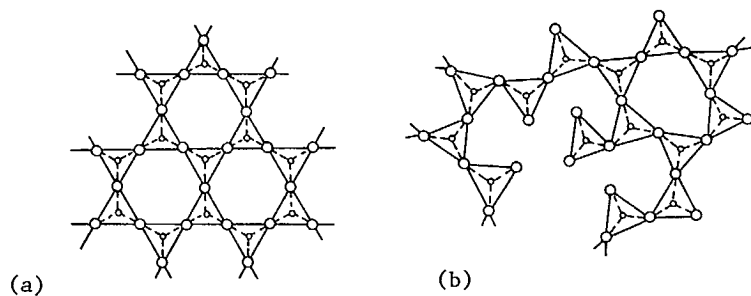


Fig. 2 - Structure de la silice: a) solide; b) fondue (3)

milieu humide dépend de la composition du verre, du diamètre des fibres et de la température de la masse de verre d'où la fibre est extraite.

En raison des charges négatives présentes à la surface des verres de silice, la surface

attire les molécules d'eau auxquelles des ions  $H^+$  sont étroitement liés, tandis que les ions  $O^{2-}$  s'éloignent de la surface. Pour faire disparaître cette eau d'une épaisseur d'environ 25 molécules, la température doit atteindre  $500^\circ C$  (2).

Les propriétés électriques dépendent de la présence d'alcalis comme  $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$ . La conduction électrique s'effectue généralement à travers la surface du verre et ne devient importante dans la masse de verre qu'à des températures élevées. Lorsque les ions  $\text{Na}^+$  sont présents à la surface d'un verre qui est recouvert d'eau absorbée, ces ions assureraient probablement une conductivité électrique à la surface du verre.

La densité, l'indice de réfraction et le module de Young sont reliés à la structure du verre, et par conséquent, aux températures de composition et de configuration. Lorsqu'on veut obtenir de la fibre de verre, plus le liquide fondu refroidit vite, plus les propriétés susmentionnées s'affaiblissent par rapport à la masse de verre, la densité s'abaissant d'environ 2%, l'indice de réfraction de 0,15 à 0,4 et le module de Young de 7 à 25%. Lorsqu'on extrait de la même masse fondue à une température plus élevée des fibres de même diamètre, elles se caractérisent par un module de Young inférieur à mesure que la température augmente. La trempe des fibres entre 100°C et 400°C réduit la différence qui existe entre ces propriétés.

Les propriétés physico-chimiques de la charge jouent un rôle important dans la fusion, dans le processus et, par conséquent, dans le produit isolant fibreux. Parmi les paramètres matériels les plus importants figurent la viscosité, la température, la tension superficielle, la densité et le liquidus. Les composants chimiques de la charge influent évidemment sur la fusion.

La composition standard d'un bain d'isolant minéral correspond généralement aux diagrammes de phase  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaO}$ . Cependant, il faut être prudent car de faibles changements de la teneur en  $\text{SiO}_2$  provoquent, semble-t-il, des variations sensibles de viscosité, ce qui nécessiterait des variations constantes de température (5).

Le procès-verbal du XI<sup>e</sup> Congrès international du verre étudie en détail la science et les techniques du verre (6).

#### VISCOSITÉ

La viscosité d'un bain de verre dépend

de sa composition et de sa température. La relation entre la température et la viscosité est illustrée par le modèle suivant (3):

$$\text{où } \eta = Ae^{(E_\eta/RT)}$$

A = constante

$E_\eta$  = énergie d'activation du flux visqueux de laitier dépendant de la composition.

L'énergie d'activation d'un flux visqueux de laitier est élevée, comme l'indique la faible diminution de la viscosité avec une hausse initiale de température. Avec un laitier acide, l'addition d'un fondant basique ou d'un modificateur de réseau tel que  $\text{Na}_2\text{O}$  rompt les liaisons de la structure tétraédrique de la silice, ce qui réduit l'énergie d'activation et par conséquent la viscosité.

Des essais permettant de prévoir les rôles d'oxydes métalliques particuliers dans des bains siliceux ont été effectués et la résistance du champ cationique a été utilisée à cet effet. Van Der Colf et al. ont noté une relation directe, pour les laitiers étudiés, entre la viscosité et la résistivité électrique (7). Il n'y a rien de surprenant à cela étant donné que la viscosité dépend de la taille des anions tandis que la résistivité dépend de la nature des cations porteurs de courant. En augmentant la température du laitier on réduit ainsi la force de liaison de la structure du liquide et par conséquent on diminue la viscosité et la résistivité du bain.

Les exemples de laitiers étudiés à 1500°C par Van Der Colf sont donnés au tableau 2 avec les résultats correspondant à la viscosité et à la résistivité (7).

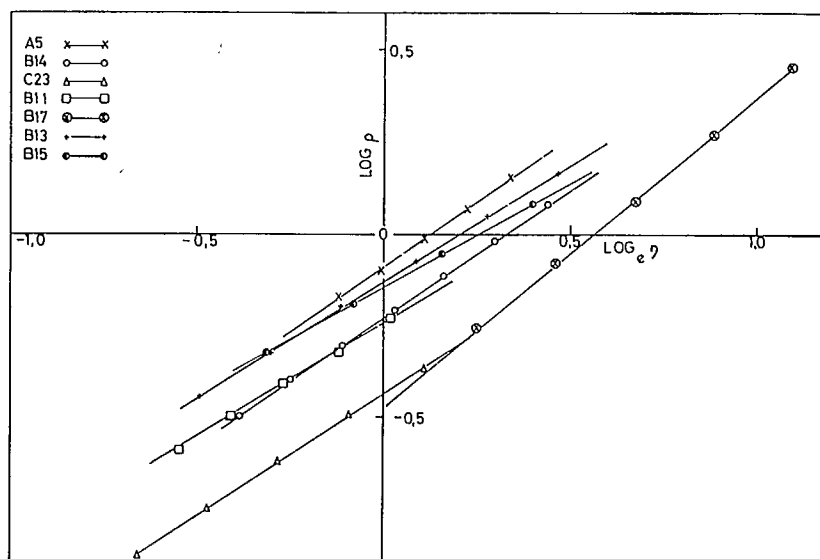
La Fig. 3 donne un graphique de la résistivité ( $\log \rho$ ) en fonction de la viscosité ( $\log \eta$ ) pour les laitiers. Bien que les pentes varient, l'équation est, en règle générale:

$$\ln \rho = m \ln \eta + \ln C \quad (6)$$

Kozakevitch a mesuré la variation de la viscosité avec la température et la composition, à l'aide d'un viscosimètre à cylindre rotatif,

Tableau 2 - Viscosité et résistivité de laitiers à 1500°C

Laitier	$\eta_{1500}$ N.s/m <sup>2</sup> x 10	$\rho_{1500}$ $\Omega.m \times 10^2$	$\ln \eta_{1500}$	$\ln \rho_{1500}$	$\rho_{1500}$ (calc.) $\Omega.m \times 10^2$
A5	0,91	0,88	-0,094	-0,128	0,79
B14	0,72	0,63	-0,329	-0,462	0,67
B13	0,66	0,66	-0,415	-0,415	0,63
B15	1,32	1,00	-0,278	-0,000	1,02
B11	0,80	0,68	-0,223	-0,386	0,72
B17	1,78	1,00			
C23	0,83	0,57			

Fig. 3 - Relation entre la viscosité ( $\eta$ ) et la résistivité ( $\rho$ ) d'un même laitier

pour des bains de chaux-alumine-silicate (8). Les résultats de l'étude ainsi que l'échelle de température intéressante pour les isolants minéraux sont donnés au tableau 3.

Carron a admis qu'à n'importe quelle température, la viscosité des bains de silicates était influencée par les proportions relatives des modificateurs de réseau présents dans le verre

(9). Mis à part le silicium, les autres formateurs de réseau sont les ions  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  et  $P^{5+}$ . Les modificateurs sont  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  et  $Fe^{2+}$ . L'analyse chimique d'un silicate est obtenue en fonction des oxydes et les calculs suivants à partir de ces renseignements donnent la matière de charge:

a) le nombre de cations formateurs de réseau (T)

Tableau 3 - Viscosité de bains de  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  entre 1450 et 1600°C (8)

$\text{SiO}_2$ % en poids	$\text{Al}_2\text{O}_3$ % en poids	CaO % en poids	Viscosité en poises à			
			1450°C	1500°C	1550°C	1600°C
10	40	50	7,7	5,0	3,3	2,3
20	40	40	-	-	6,3	4,0
20	50	30	-	11,5	7,4	4,7
30	30	40	-	9,2	6,1	4,4
30	40	30	30,2	18,0	11,4	7,8
40	10	50	5,3	3,9	2,8	2,1
40	20	40	14,7	9,2	6,2	4,3
40	30	30	39,2	25,7	16,8	11,0
50	0	50	-	-	2,4	1,8
50	10	40	12,3	8,6	6,2	4,5
50	20	30	42,3	32,2	22,1	15,8
60	0	40	-	9,3	6,5	4,7
60	10	30	-	-	-	17,9

- b) le nombre de cations modificateurs de réseau  
c) le nombre d'atomes d'oxygène associés à tous les cations (0).

Le nombre d'ions oxygène actif dans le bain est alors déterminé par la formule suivante:

$$O_A = 2(0-2T) \quad \text{Éq. 1}$$

Le paramètre relié à la viscosité est défini par l'équation suivante:

$$R = \frac{O_A}{T} \times 100 \quad \text{Éq. 2}$$

On reporte ensuite le logarithme de R en fonction du logarithme de la viscosité pour obtenir des lignes droites. Ces calculs ont été utilisés dans la pratique et semblent raisonnablement exacts (10).

Carron a interprété les résultats des mesures de la viscosité pour indiquer que la viscosité d'un bain de verre dépend du pourcentage de liaisons rompues dans la structure des aluminosilicates (9). Il a déclaré que les résultats de la viscosité d'un bain de "roches et minéraux" pouvaient être interprétés à l'aide du même modèle que celui des verres binaires  $\text{SiO}_2\text{-M}_2\text{O}$ .

Selon Carron, la viscosité de n'importe quel bain de silicate peut être évaluée si la composition chimique, la teneur en eau, et la tem-

pérature sont connues. Cette estimation comprend la gamme de  $10^2$  à  $10^{15}$  poises.

Saito et Kawai ont laissé entendre que les laitiers en fusion sont des solutions ioniques et sont composés de divers réseaux tétraédres  $\text{SiO}_4$  (11).

L'addition d'oxydes métalliques provoque la destruction du réseau et forme finalement un seul tétraèdre  $\text{SiO}_4$ . L'addition de faibles quantités d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  à un bain de laitier ne détruit pas le réseau  $\text{SiO}_4$ , mais de grosses quantités d'environ 20% ont provoqué la formation d'ions  $\text{AlO}_3^{3-}$  avec de fortes augmentations ultérieures de la viscosité. En ajoutant moins de 10% de  $\text{SiO}_2$  au système  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ , on a obtenu de faibles variations de la viscosité du bain de laitier, ce qui n'a entraîné qu'une formation mineure de tétraédres  $\text{SiO}_4$ . Cette étude s'est inspirée des mêmes bases que celles utilisées par Coudurier (3) et les résultats pourraient s'appliquer aux verres granitiques, aux basaltes fondus, aux bains anhydres, et aux magmas hydratés.

La viscosité de certains liquides et de roches et minéraux est indiquée au tableau 4. Les résultats démontrent que la viscosité des bains de silicate semble être fonction de leur composi-



Tableau 4 - Viscosités de quelques liquides, roches et minéraux communs (12)

Substance	Température	Viscosité ( $\eta$ )
	t°C	en poises
Eau	20	$1 \times 10^{-2}$
Glycérine	20	10
Gélatine	20	$1 \times 10^6 - 1 \times 10^8$
Diopside	1400	3,8
Anorthite	1400	38
Albite	1400	$4 \times 10^4$
Orthoclase	1400	$1 \times 10^8$
Diabase	1400	60 - 90
Basalte	1400	55
Basalte néphélinique	1400	80
Basalte à olivine	1400	$1,2 \times 10^2 - 1,36 \times 10^2$
Basalte andésinique	1400	$1,38 \times 10^2$
Lave du Vésuve	1400	$2,5 \times 10^2$
Andésite	1400	$1,17 \times 10^3$
Obsidienne	1400	$1,7 \times 10^5$

tion. Les oxydes de fer et de manganèse réduisent la viscosité de ces bains. Les laitiers à forte teneur en magnésium sont moins visqueux que les laitiers au silicate de calcium, mais le fer est un meilleur fondant que le magnésium. L'alumine, la silice, l'oxyde de titane et l'oxyde de chrome augmentent la viscosité. Cependant, l'influence de ces oxydes dépend aussi de la température du bain. En général, les bains de roches acides sont plus visqueux que les bains de roches basiques.

Turkdogan et Bills ont passé en revue les relations de viscosité du système CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (13). Ils prétendent que les incohérences des premières données correspondant aux systèmes susmentionnés étaient en partie dues à l'utilisation d'un creuset de graphite parce que les bains d'alumine et de silicate réagissent immédiatement au graphite à des températures élevées. D'autres études extraites de cette communication ont démontré que pour une température donnée, les relations entre la viscosité et la composition des silicates terreux alcalins étaient les mêmes. L'effet des oxydes alcalins était semblable sur la viscosité des bains binaires et ternaires. De même, pour n'importe quelle concentration donnée

de silice, la viscosité augmente à mesure que l'alumine remplace l'oxyde de calcium, CaO, jusqu'à un rapport molaire de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO d'environ 1/1. Si l'on augmente le rapport en augmentant la proportion d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, on obtient une diminution de la viscosité, ce qui illustre bien la nature amphotère de l'alumine.

En ce qui concerne les laitiers neutres ou basiques, les effets sur la viscosité de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de SiO<sub>2</sub> sont semblables lorsque les rapports Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO sont faibles. On présume donc que tous les ions formateurs de réseau sont Si + Al. Lorsque les rapports Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO et les concentrations de silice sont tous deux importants, le rapport devient plus complexe. Cette étude démontre que les oxydes terreux alcalins sont interchangeable en ce qui concerne leurs effets sur la viscosité des bains de systèmes binaires et ce comportement est vraisemblablement le même pour les bains de systèmes quaternaires, comme le montre la Fig. 4.

Dans les systèmes CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>, la variable de composition ayant la plus grande influence sur les viscosités ainsi que sur la résistivité était la basicité exprimée en rap-

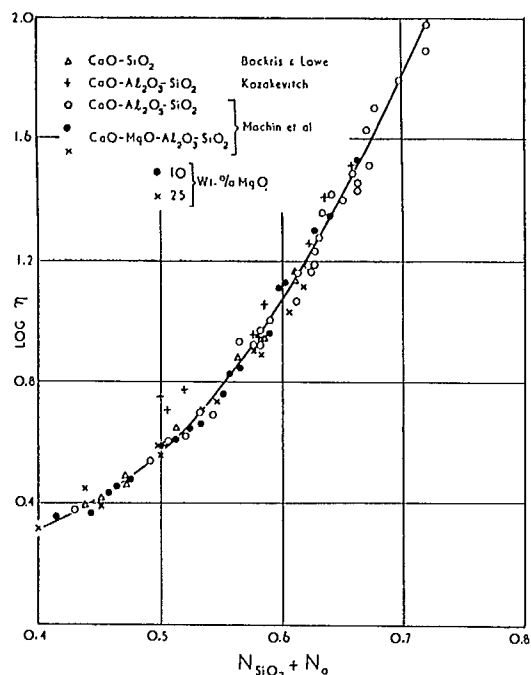


Fig. 4 - Variation de la viscosité avec la composition dans le système  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  (13)  
 Nota:  $N_a$  est l'équivalence en silice de l'alumine

port de masse  $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$  (7). Le rapport  $\text{CaO}/\text{MgO}$  n'était important que pour une faible basicité.

La variation de la viscosité avec la température pour la même composition est donnée à la Fig. 5 et on suppose qu'elle est due à une rupture des liens  $\text{Si-O}$  et  $\text{Al-O}$ , c'est-à-dire que des changements de structure ont eu lieu (13). Au-dessous de  $1350^\circ\text{C}$ , la relation entre le logarithme de viscosité ( $\eta$ ) et  $\frac{1}{T}$  est linéaire, mais perd ce caractère à des températures supérieures en raison des changements de la structure du bain.

Turkdogan et Bills ont conclu que l'équivalence en silice de l'alumine variait avec le rapport  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}$  et avec la concentration d'alumine (13). Du point de vue molaire, la magnésie et la chaux ont le même effet sur la viscosité.

#### LIQUIDUS

Le point de fusion d'une charge dépend énormément de la composition que l'on peut véri-

fier le long du liquidus et cette ligne peut servir à déterminer les zones de dévitrification pour la composition d'un bain de laitier particulier.

Un diagramme d'équilibre des états correspondant au système  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  est donné à la Fig. 6 (14). Les composantes autres que  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  peuvent habituellement se résoudre à une équivalence  $\text{CaO}$ . Ce diagramme d'état peut alors servir à déterminer l'activité du laitier à partir des activités d'un composant donné et à partir de la température de fusion d'une charge. La viscosité et la tension superficielle d'un laitier peuvent aussi être calculées à partir de la composition du bain (15,16).

Lorsqu'on fabrique du verre on évite à tout moment la dévitrification ou cristallisation. Tous les verres tendent à se vitrifier au-dessous d'une température particulière à ce verre, appelée liquidus. Même s'il augmente au-dessous du liquidus, le taux de cristallisation est enrayé par les augmentations de viscosité du verre (4).

L'équation suivante permet de calculer la cristallisation: (17)

$$R = \frac{k}{\eta^a} (T_L - T) \quad \text{Éq. 3}$$

où  $\eta$  = viscosité du verre

$T_L$  = liquidus

$k, a$  = constantes du verre

$R$  = taux de croissance des cristaux à la température  $T$

Les résultats expérimentaux observés concordent étroitement avec les données prévues par des calculs fondés sur cette équation.

Les phases d'un verre de type sodium-oxyde de calcium-silice sont données à la Fig. 7 (14). Pour ce type particulier de verre et pour cette température de travail, la zone délimitée par N, O, P, Q, R, représente les compositions dans lesquelles la dévitrification n'intervient pratiquement pas.

#### DENSITÉ

Cette propriété d'un verre reflète les changements structuraux du mélange fondu. L'homogénéité d'un verre est extrêmement importante en

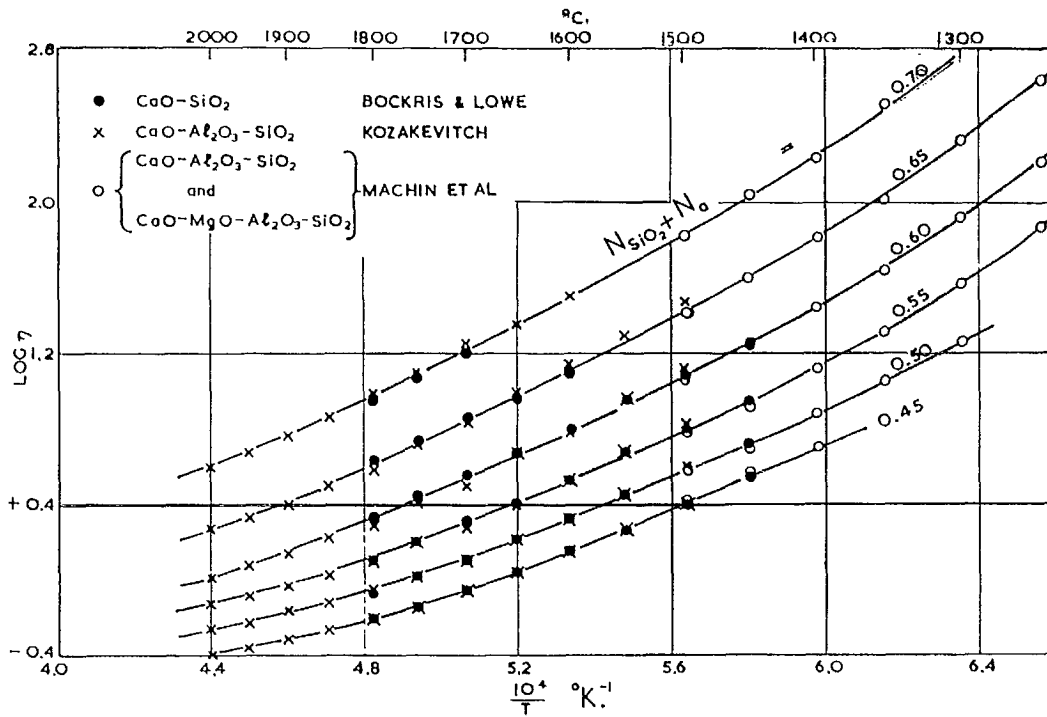


Fig. 5 - Variation de la viscosité avec la température et la composition de silicates et d'aluminosilicates fondus (13)

tant que paramètre de traitement y compris celui de la formation des fibres. Avec l'utilisation des machines automatiques il faut aussi que la composition du mélange fondu demeure constante. La densité d'un verre est l'une des plus simples et plus précises méthodes de surveillance de la qualité des paramètres susmentionnés. Il a été démontré que les différences de composition des verres sont déterminées avec plus de précision par la densité que par l'analyse chimique (18). Reportées en fonction de la température, les densités des mélanges fondus de verre de diverses compositions pour le système  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  ont donné des lignes droites pour chacune des compositions montrées au tableau 5 (Fig. 8).

#### CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE ET THERMIQUE

La conductivité électrique des laitiers dépend du nombre d'ions présents et de leur mobilité, qui dépend elle-même de leur taille et de la viscosité du laitier. L'addition de CaO, de

$\text{FeO}$  ou de  $\text{MnO}$  à un bain de silice, accroît considérablement la conductivité électrique du laitier. Les valeurs de conductivité sont reliées à l'ampleur de l'ionisation et la silice est un solvant ionisant. La conduction des silicates de fer et de manganèse est cependant en partie électronique et en partie ionique et donne des valeurs de conductivité élevées. Les valeurs de conductivité électrique du verre peuvent changer de façon spectaculaire, de la température ambiante à une température élevée (5).

Il existe généralement une relation entre le logarithme de la viscosité et celui de la résistivité; cependant, un laitier dont la teneur en silice ou en oxyde de titane est très élevée a une résistance électrique anormalement faible (7).

La conductivité thermique des laitiers est faible et étant donné que le principal transfert de chaleur dans un bain se fait par convection, les déperditions de chaleur sont beaucoup plus élevées que celles que l'on pourrait cal-

## Phases cristallines

Notation	Formule de l'oxyde
Cristobalite } Tridymite }	SiO <sub>2</sub>
Pseudowollastonite	CaO.SiO <sub>2</sub>
Rankinite	3CaO.2SiO <sub>2</sub>
Chaux	CaO
Corindon	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Mullite	3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2SiO <sub>2</sub>
Anorthite	CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2SiO <sub>2</sub>
Gehlénite	2CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .SiO <sub>2</sub>

Les températures allant jusqu'à environ 1550°C proviennent des laboratoires de géophysique; celles supérieures à 1550°C proviennent de l'échelle internationale de 1948.

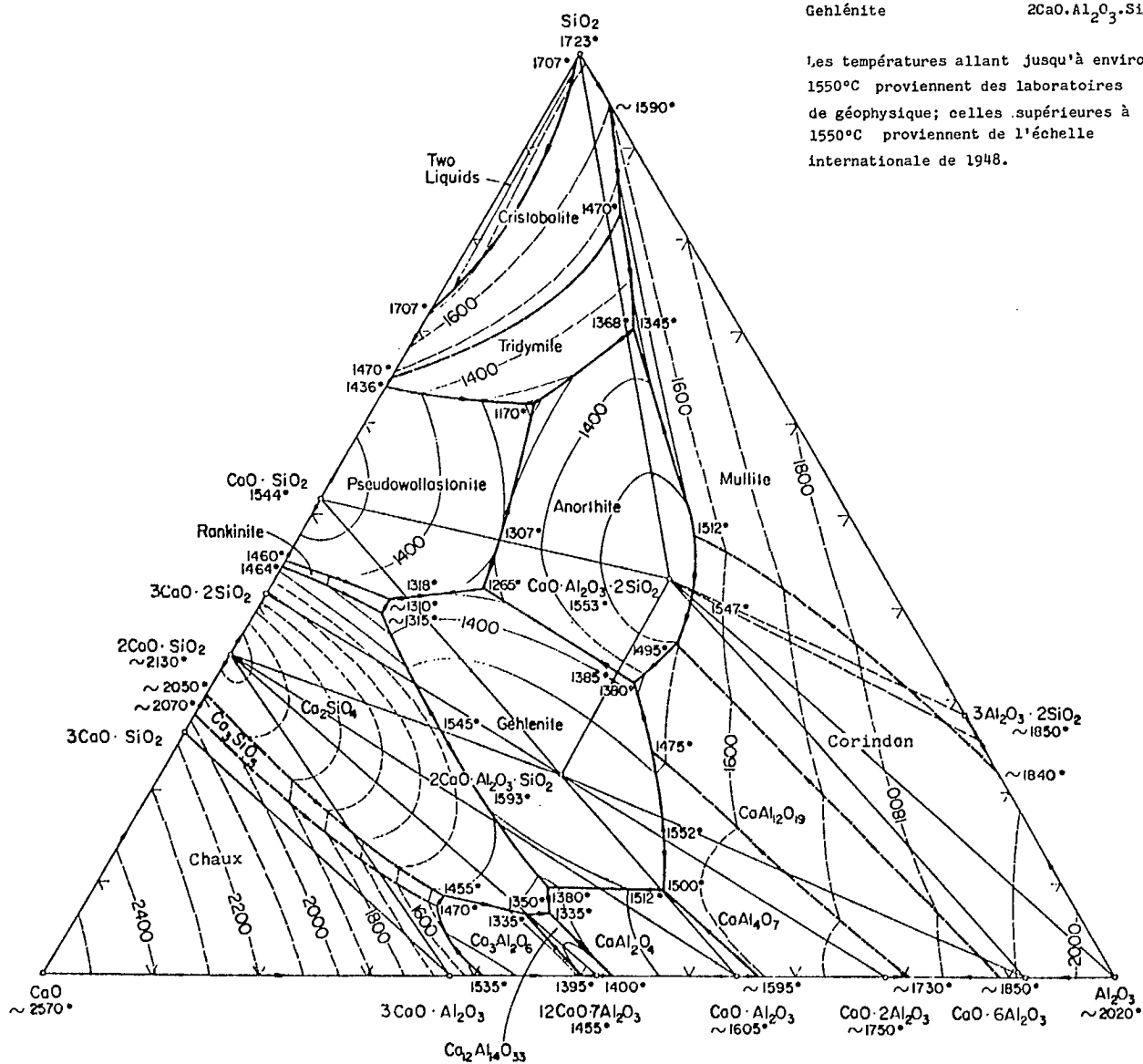


Fig. 6 - Diagramme de l'équilibre des phases du système ternaire CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (14)



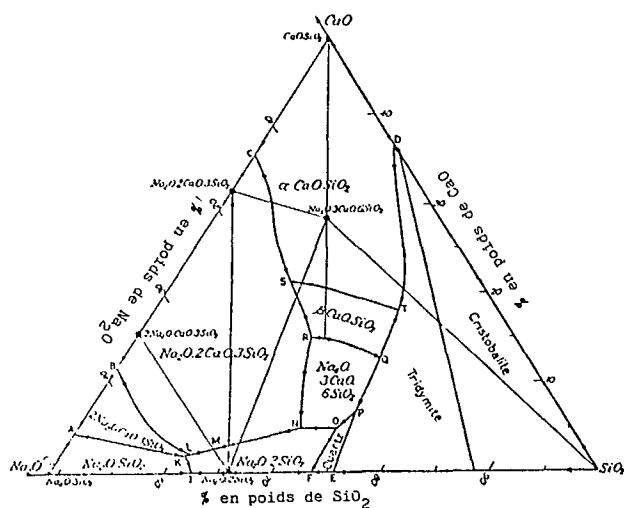


Fig. 7 - Diagramme de l'équilibre des phases du système  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$  (14)

culer à partir de données sur la conductivité thermique (3).

#### TENSION SUPERFICIELLE

Cette propriété est importante au moment de la fabrication de fibres pour la laine minérale. Il est essentiel que le mouvement du mélange fondu sortant du four et de l'équipement de fabrication de fibres ne soit pas entravé. Il existe des méthodes qui permettent d'obtenir une tension superficielle optimale pour les bains de silicates. Bien qu'elles ne soient pas scientifiquement rigoureuses, elles servent de guide de bonne pratique (4,15). L'amélioration de l'homogénéité d'un verre et la disparition des torons sont étroitement liées à la tension superficielle. Même de faibles différences de quelques dynes par centimètre ont un effet marqué sur le nombre de torons qui se trouvent dans le verre (4).

Le rapport de la viscosité à la tension superficielle d'un verre doit être supérieur à 0,01 pour que le débit du mélange fondu ne soit pas réduit en gouttelettes. Généralement, la tension superficielle diminue à mesure qu'augmente

la température. La variation de la composition d'un mélange fondu avec la tension superficielle à  $1450^\circ\text{C}$  est donnée au tableau 6 (18).

Les valeurs calculées de la tension superficielle de quelques oxydes sont données au tableau 7 (19). La réduction de la tension superficielle dans le laitier de système  $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2-$

Tableau 5 - Variations de la composition d'un verre fondu

N° de l'échantillon	CaO	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$
1	39	42	19
2	35	55	10
3	34	36	30
4	30	45	25
5	30	60	10
6	29	31	40
7	25	55	20
8	25	65	10
9	23	62	15
10	15	65	20

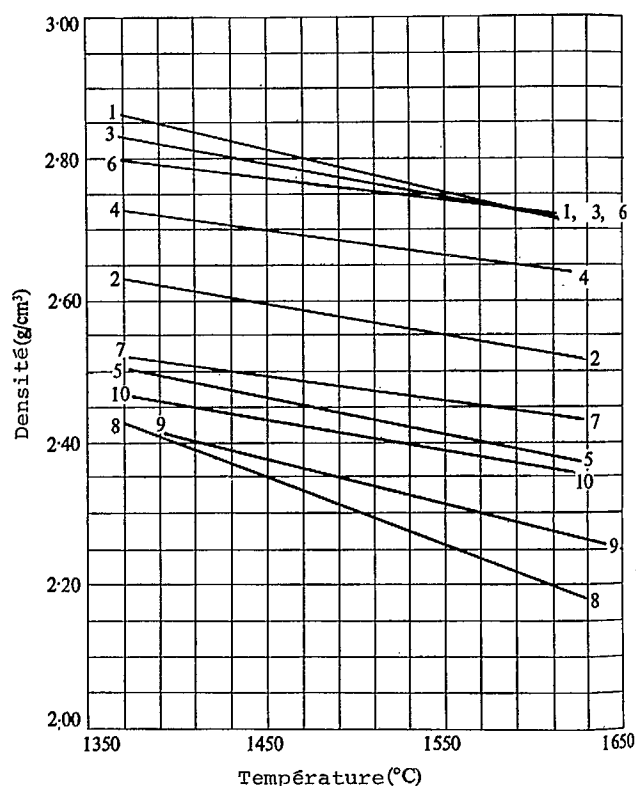


Fig. 8 - Variation de la densité avec la température pour le système  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  (15)

$\text{Al}_2\text{O}_3$  par additions de  $\text{SiO}_2$  est donnée à la Fig. 9. L'adjonction de faibles quantités de soufre au laitier modifie légèrement ces valeurs.

La tension superficielle optimale peut être calculée à partir des résultats communiqués par Ustenko (20) et Zihilin (21). Ils ont constaté qu'à 1400°C la viscosité d'un laitier fondu est de 15 poises et le rapport viscosité/tension superficielle est de 0,01.

#### MATIÈRES PREMIÈRES

Les principaux oxydes et matières nécessaires à la fabrication d'isolants, y compris le verre et la laine de verre, sont donnés au tableau 8.

La laine minérale désigne le produit isolant fabriqué à partir des roches et minéraux compris dans la charge d'alimentation. Les com-

posants nécessaires à la fabrication de la laine de verre sont les mêmes que pour le verre, mais la teneur de la laine de verre en oxydes alcalins est moindre.

Les points de fusion des oxydes correspondants et de quelques composés sont donnés au tableau 9.

#### FABRICATION DE LA LAINE MINÉRALE

Les procédés de fabrication de la laine minérale sont essentiellement simples, mais il peut y avoir de nombreuses variations complexes.

Tableau 6 - Tension superficielle de mélanges fondus dans les systèmes  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  à 1450°C (18)

Composition (% en poids)				Tension superficielle
CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(dynes/cm)
30	-	55	15	486
47	-	41	12	572
40	-	40	20	530
48	-	7	45	748
47	4	35	14	591

Tableau 7 - Valeurs calculées de la tension superficielle d'oxydes métalliques (19)

Oxyde	Tension superficielle calculée (dynes/cm)	Température (°C)
SiO <sub>2</sub>	285	1400
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	640	1400
CaO	614	1400
MgO	512	1400
MnO	653	1400
Na <sub>2</sub> O	297	1400
K <sub>2</sub> O	156	1400
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	96	1400

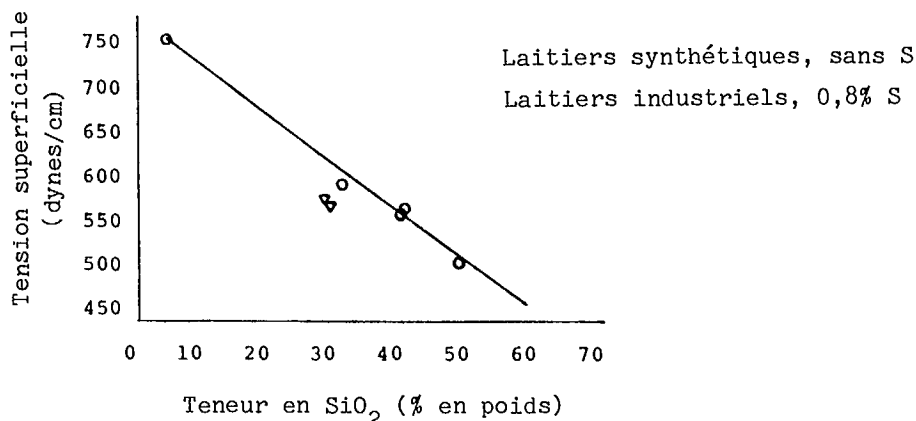


Fig. 9 - Variation de la tension superficielle avec la teneur en SiO<sub>2</sub> à 1450°C de plusieurs laitiers synthétiques du système CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de deux laitiers industriels contenant du soufre (18)

Tous les procédés visent les objectifs suivants:

1. fusion de la charge d'alimentation
2. fabrication de fibres à partir du mélange fondu
3. fabrication de divers produits comme des matelats, avec ou sans coupe-vapeur, de densités et de facteurs R\* divers et de laine en grains, en masse et en vrac.

Au Canada et aux États-Unis, exception faite de la production de la laine de verre, le principal type de four de fusion utilisé pour la production de laine minérale est le cubilot. Pour les isolants en fibre de verre, on utilise généralement des fours de fusion à gaz ou électriques. En Europe, les fours à cubilots et les fours à résistance électrique sont utilisés pour la fabrication des isolants minéraux.

#### LE CUBILOT

Un diagramme schématique de cubilot servant à la production de laine minérale est donné à la Fig. 10.

Le four est habituellement entouré d'une enveloppe d'eau qui permet le refroidissement et la surface interne peut, ou non, être revêtue de matériau réfractaire.

Le cubilot est rempli de couches successives de combustible (coke) et de matières premières jusqu'à la porte de chargement et on injecte de l'air par les tuyères. Le matériau se présente normalement sous forme de fragments afin de permettre le libre passage de l'air et des gaz de combustion, et aussi pour éviter que des matériaux fins ne s'échappent par la cheminée.

Dans la pratique, il a été recommandé que, pour obtenir un fonctionnement satisfaisant, il faut utiliser des matériaux de taille déterminée afin d'empêcher la création de cheminements trop nombreux (22). Le rapport du coke au laitier ou autre charge d'alimentation se situe généralement entre 1 et 3,5/1 (23).

Le taux de combustion est habituellement contrôlé par une vanne tiroir qui règle le débit d'air allant du ventilateur jusqu'aux tuyères. Dans des conditions de fonctionnement optimal, un cubilot de diamètre moyen de 1,22 m (48 pouces) peut fondre de 1361 à 1814 kg (1,5 à 2 tonnes courtes) de laitier par heure avec une consomma-

\*Facteur R: mesure de la résistance thermique de l'isolant. On obtient sa valeur à partir de l'inverse du transfert de chaleur.

Tableau 8 - Principales matières premières utilisées dans la fabrication du verre (4)

Matière	Autres noms	Formule théorique	Oxydes	Fraction
			présents	
Alumine	Alumine calcinée	$Al_2O_3$	$Al_2O_3$	1,000
Hydrate d'alumine	Alumine hydratée	$Al_2O_3 \cdot 3H_2O$	$Al_2O_3$	0,654
Aplite (composition type)	---	---	$Al_2O_3$	0,240
	---	---	$Na_2(K_2)O$	0,100
	---	---	$SiO_2$	0,600
	---	---	CaO	0,060
Feldspath	Microcline (la composition est celle du spath commercial type)	$K_2O \cdot Al_2O_3$	$Al_2O_3$	0,180
		$6SiO_2$	$K_2(Na_2)O$	0,130
		---	$SiO_2$	0,680
Syénite néphélinique (composition type)	---	---	$Al_2O_3$	0,250
	---	---	$Na_2(K_2)O$	0,150
	---	---	$SiO_2$	0,600
Calumite	Silicoaluminate de chaux	$2CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$	$SiO_2$	0,380
		$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$	$Al_2O_3$	0,117
		$2(CaO \cdot SiO_2)$	CaO	0,400
		---	MgO	0,080
Cyanite (centré à 90%)	---	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	$Al_2O_3$	0,567
	---	---	$SiO_2$	0,433
Kaolin	China clay	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	$Al_2O_3$	0,395
		$2H_2O$	$SiO_2$	0,465
Cryolithe	Kryolith	$Na_2AlF_6$	---	---
Oxyde d'antimoine	---	$Sb_2O_3$	$Sb_2O_3$	1,000
Carbonate de baryum	Baryte	$BaCO_3$	BaO	0,777
		BaO	BaO	1,000
Sulfate de baryum	Barytine	$BaSO_4$	BaO	0,657
Acide borique	---	$B_2O_3 \cdot 3H_2O$	$B_2O_3$	0,563
Borax	---	$Na_2O \cdot 2B_2O_3$	$B_2O_3$	0,365
	---	$10H_2O$	$Na_2O$	0,163
Borax anhydre	("Pyrobor")	$Na_2O \cdot 2B_2O_3$	$B_2O_3$	0,692
		---	$Na_2O$	0,308
Chaux, calcinée	Chaux vive	CaO	CaO	1,000
Chaux, hydratée	Hydrate de calcium	$CaO \cdot H_2O$	CaO	0,757
Calcaire	Carbonate de calcium	$CaCO_3$	CaO	0,560
		Whiting	CaO	0,560
Carbonate de chaux	---	---	---	---
Chaux, dolomique	Dolomite calcinée	$CaO \cdot MgO$	CaO	0,582
		---	MgO	0,418
Dolomite	Calcaire brut (dolomitique)	$CaO \cdot MgO \cdot 2CO_2$	CaO	0,304
		---	MgO	0,218
Chaux, hydratée, dolomitique	Chaux de finition	$CaO \cdot MgO$	CaO	0,423
		$2H_2O$	MgO	0,304
Cendres d'os	Phosphate de calcium	$3CaO \cdot 2P_2O_5$	CaO	0,372
		$CaCO_3$	$P_2O_5$	0,628
Carbonate de potassium	Carbonate calciné de potasse	$K_2CO_3$	$K_2O$	0,681
		$K_2CO_3 \cdot 1\frac{1}{2}H_2O$	$K_2O$	0,570
Potasse des verriers	Carbonate de potassium, hydraté	---	---	---
Sable	Verre, sable, quartz	$SiO_2$	$SiO_2$	1,000
Carbonate de soude	Carbonate de soude commercial	$Na_2CO_3$	$Na_2O$	0,585
		---	---	---
Sulfate de sodium de commerce	Sodium sulphate	$Na_2SO_4$	$Na_2O$	0,437
Fluorosilicate de sodium	Sodium fluosilicate	$Na_2SiF_4$	---	---



Tableau 9 - Points de fusion de certains composés entrant dans la fabrication du verre (4)

Nom	Formule	Point de fusion	
		°F	°C
Oxyde d'aluminium	$Al_2O_3$	3720	2050
Silicate d'aluminium (Mullite)	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	3290	1810
Carbonate de baryum	$BaCO_3$	d.	2640 1450
Sulfate de baryum	$BaSO_4$		2875 1580
Acide borique	$H_2BO_3$ 185	d.	365
Cristaux d'oxyde de bore	$B_2O_3$ 490	c.	910
Oxyde de calcium	$CaO$		4660 2572
Carbonate de calcium	$CaCO_3$	d. lorsque chauffé au rouge	
Fluorure de calcium	$CaF_2$		2480 1360
Pyrophosphate de calcium	$Ca_2P_2O_7$		2245 1230
Phosphate tricalcique	$Ca_3(PO_4)_2$		3040 1670
Silicate de calcium	$CaSiO_3$		2805 1540
Sulfate de calcium	$CaSO_4$		2640 1450
Cryolithe	$Na_3AlF_6$		1830 1000
Silicate ferreux	$FeSiO_4$		2200 1200
Carbonate de magnésium	$MgCO_3$	d. lorsque chauffé au rouge	
Oxyde de magnésium	$MgO$		5070 2800
Silicate de magnésium	$MgSiO_3$		2835 1555
Sulfate de magnésium	$MgSO_4$		2165 1185
Anhydride phosphorique	$P_2O_5$ 563		1045
Carbonate de potassium	$K_2CO_3$		1635 891
Hydroxyde de potassium	$KOH$		716 380
Nitrate de potassium	$KNO_3$		635 334
Silicate de potassium	$K_2SiO_3$		1790 976
Sulfate de potassium	$K_2SO_4$		1970 1076
Silice	$SiO_2$		3135 1725
Aluminate de sodium	$NaAlO_2$		3000 1650
Diborate de sodium	$Na_2B_4O_7$		1365 741
Carbonate neutre de sodium	$Na_2CO_3$		1562 851
Chlorure de sodium	$NaCl$		1480 804
		Ebullition à	2575 1413
Métasilicate de sodium	$Na_2SiO_3$		1990 1089
Disilicate de sodium	$Na_2Si_2O_5$		1605 874
Sulfate de sodium	$Na_2SO_4$		1624 884

d. = se décompose ou perd de l'oxygène

c. = température approximative de ramollissement de l'état vitreux

Sources: Chemical Rubber Company "Handbook of Chemistry and Physics",  
International Critical Tables.

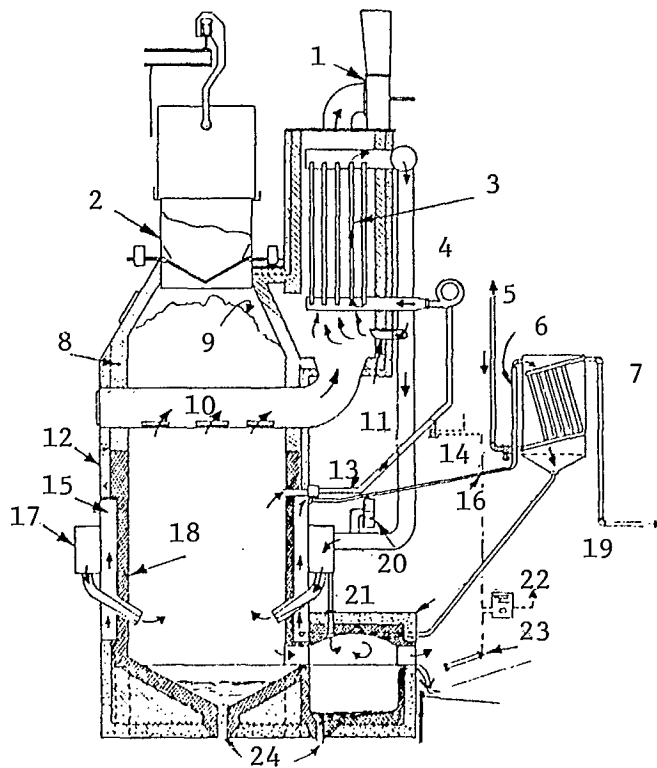
tion de coke d'environ 450 kg (0,5 tonne). L'eau qui circule autour du cylindre du cubilot est maintenue à une température aussi élevée que possible pour éviter toute déperdition excessive de chaleur (23).

### RÉACTIONS DANS UN CUBILOT

Les diverses zones de température dans la chambre de réaction ou de fusion du cubilot

sont indiquées sur le schéma de la Fig. 10 (21). La Fig. 11 donne les principales réactions dans diverses zones d'un cubilot et la Fig. 12 montre la température dans la zone de réaction.

Il est évident que le chargement d'un four est très important. Généralement, pour obtenir les meilleures conditions de fonctionnement, le coke et les matériaux de charge sont ajoutés en couches successives de façon que les



- |  |   |
|--|---|
| 1. Ventilateur d'évacuation des gaz résiduels  | 13. Gaz en recirculation servant à contrôler la température                     |
| 2. Trémie d'alimentation agissant comme sas d'aération pendant le déchargement des skips | 14. Moteur du registre  |
| 3. Réchauffeur du vent   | 15. Chemise du liquide de refroidissement                                       |
| 4. Ventilateur à haute pression alimentant le réchauffeur en air                         | 16. Fluide de la chemise du cubilot servant à abaisser les températures élevées |
| 5. Vers le circuit d'alimentation en eau   | 17. Conduit annulaire de vent chaud   |
| 6. Thermosiphon  | 18. Carbure de silicium   |
| 7. Echangeur de chaleur  | 19. Eau d'alimentation de la chaudière du réchauffeur                           |
| 8. Briques réfractaires  | 20. Jauge de tirage différentiel  |
| 9. Sommet de la charge   | 21. Réservoir d'accumulation de laitier   |
| 10. Sorties de gaz submergées  | 22. Dispositif de contrôle  |
| 11. Air chaud vers 'burnco'  | 23. Tube de rayonnement   |
| 12. Isolant  | 24. Trou de coulée  |

Fig. 10 - Diagramme schématique d'un cubilot utilisé pour la production de fibres de laine de roche (22)

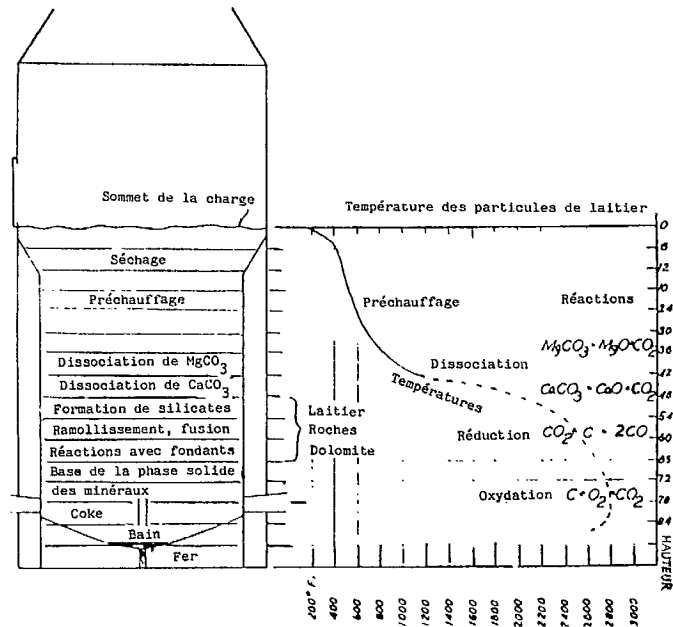


Fig. 11 - Diagramme schématique des zones de température et des principales réactions dans un cubilot (22)

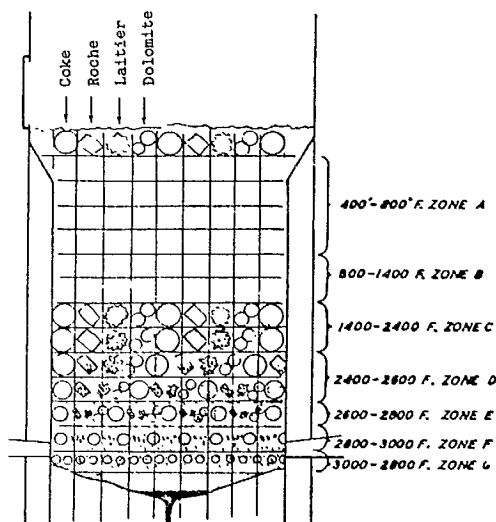
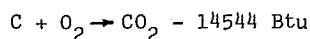


Fig. 12 - Diagramme schématique montrant les températures dans les diverses zones de réaction d'un cubilot (22)

températures de mixage, de fusion, de réaction des fondants et de zone sont en rapport approprié les unes avec les autres.

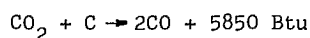
Nous allons maintenant étudier un peu plus en détail les diverses réactions. Elles correspondent à l'oxydation, ou à la réduction, par analogie avec le fonctionnement du cubilot en sidérurgie.

L'air pénètre dans le fond du four où il est préchauffé par la couche chaude de cendres qui s'y trouve et il parvient jusqu'au coke où il réagit avec le carbone pour former du gaz carbonique:



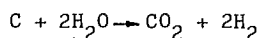
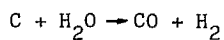
La principale réaction d'oxydation à la partie inférieure de la couche de coke est exothermique.

Le gaz carbonique s'échappe vers le haut où il réagit avec une quantité de carbone plus importante pour former de l'oxyde de carbone:



Cette réaction de réduction est endothermique.

Les réactions suivantes d'oxydation-réduction de l'eau et du gaz se produisent aussi dans un cubilot où se trouve du coke ou du carbone et elles sont endothermiques:



Pour rendre efficace un cubilot, on optimise les réactions de façon que la chaleur serve autant que possible à fondre la charge au lieu de s'échapper inutilement au cours des réactions endothermiques.

#### FOURS ÉLECTRIQUES DE FUSION

Depuis peu, ce type de four est de plus en plus prisé. On peut en effet obtenir un meilleur rendement, en particulier lorsque des quantités relativement faibles de verre sont requises (4). Il existe aussi d'autres avantages: l'homo-

généité et la composition de la charge sont plus rapidement et plus facilement contrôlées, et la pollution atmosphérique est réduite parce que les gaz de combustion ne sont pas chassés du four. Lorsque des composants volatils comme les fluorures sont utilisés dans un mélange vitrifiable, les pertes sont considérablement réduites. Le temps de démarrage après l'arrêt du four est relativement court, et les déperditions de chaleur par les côtés peuvent être immédiatement compensées en augmentant la puissance. En général, l'encombrement de ce type de four est bien moindre compte tenu de la production, et le fonctionnement continu est possible (4).

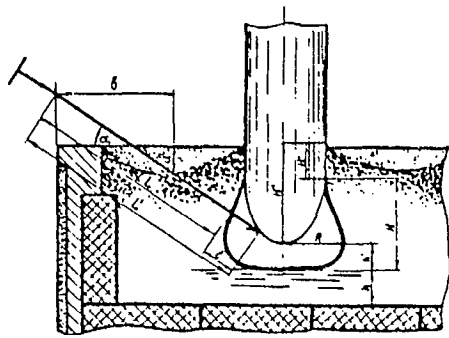
En voici quelques inconvénients: l'emploi de fours électriques se limite aux endroits où l'énergie disponible est bon marché et la durée des réfractaires, plus courte que dans d'autres types de fours. Cependant, grâce au court temps d'arrêt le coût de réfraction de la garniture est inférieur à celui d'autres fours. Les matériaux inorganiques comme la silice et le calcaire utilisés comme charges dans le four ne sont pas bons conducteurs de l'électricité et il faut donc utiliser pour le démarrage du four une source de carbone comme le coke ou la fibre de carbone. La conductivité est bonne après formation du bain.

La Fig. 13 montre schématiquement les principes du fonctionnement d'un four à arc et à électrodes submergées. Les électrodes ont généralement deux ou trois configurations et on les fait fonctionner en une seule ou en trois phases.

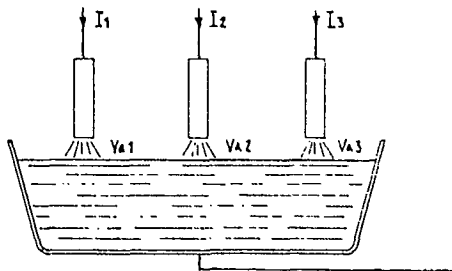
Les petits fours de type entièrement électrique ont été adoptés plus récemment. Les fours à fonctionnement continu d'une capacité de 2722 kg (3 tonnes) par jour servent à fabriquer le verre, et on utilise de petits fours de fusion dont la production continue est de 9,1 kg (20 livres) par heure (4).

La puissance des fours électriques varie de 500 à 5000 kVA, ce dernier type étant équipé de transformateurs triphasés et de prises de réglage de tension. Les électrodes sont généralement fabriquées en graphite et s'usent à la longue à cause de l'oxydation.

L'efficacité d'un four peut être influen-



a) arc submergé



b) arc à l'air libre

Fig. 13 - Représentation schématique des principes de fonctionnement de deux types de fours à arc électrique

cée par les réfractaires du garnissage. L'U.S. Bureau of Mines a étudié divers types pour en déterminer la résistance à l'érosion (24). Les réfractaires offrent aussi une résistance à l'abrasion des parois du four. L'accumulation de charge sur les réfractaires peut être calculée par la différence de température ( $\Delta T$ ) entre le four et la paroi extérieure. Si toutes les valeurs  $\Delta T$  sont connues, par exemple, la paroi du four, l'isolation et les réfractaires, la variation de la valeur totale  $\Delta T$  (de l'intérieur vers l'extérieur de la paroi du four) est fonction du verre supplémentaire ou du garnissage réfractaire de laitier qui s'est formé sur la paroi intérieure du four.

#### FOURS À INDUCTION OU FOURS ÉLECTRIQUES À HAUTE FRÉQUENCE

En quelques mots, la chaleur est produite et dissipée dans ce type de four par des courants induits. La température du matériau de susceptance est donc créée par transformation de l'énergie électromagnétique en énergie calorifique. Pour pouvoir être chauffé, le matériau doit être conducteur de l'électricité. Cependant, beaucoup de matériaux, comme le verre, ne sont conducteurs de l'électricité qu'une fois chauffés et à l'état liquide; c'est pourquoi il faut les chauffer à l'aide d'un matériau conducteur.

Le circuit de chauffage est analogue à celui d'un transformateur dont l'enroulement primaire véhicule le courant de haute fréquence. Le matériau de susceptance qui se trouve dans le primaire devient le secondaire.

La relation entre l'épaisseur du conducteur et la fréquence du courant est donnée par l'équation suivante (26):

$$T = \frac{1}{2} \pi \sqrt{\frac{P}{\mu f}}$$

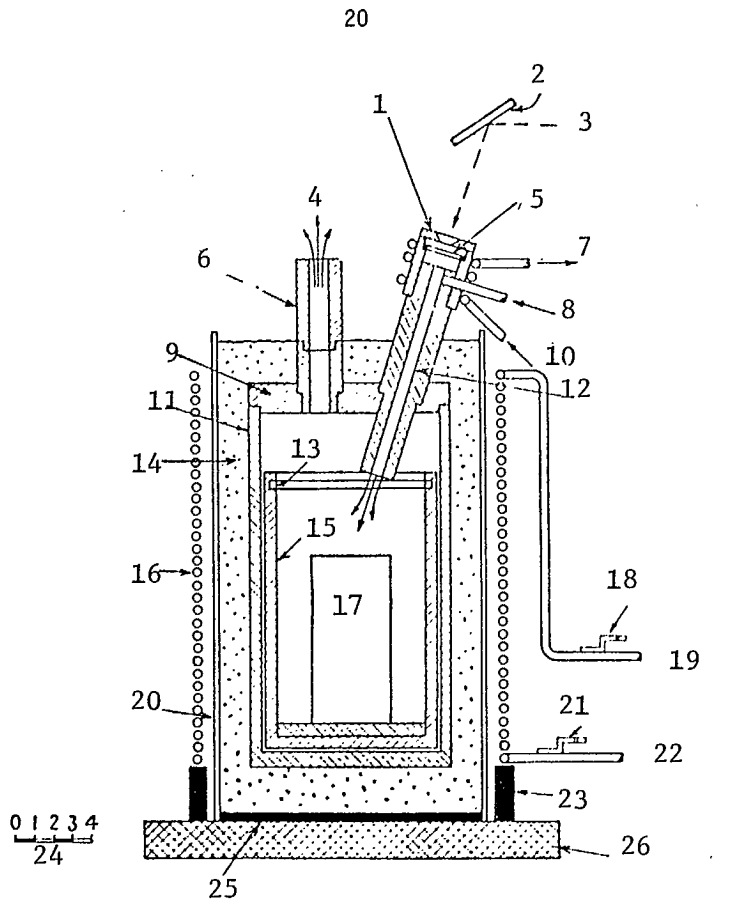
où T = centimètres  
P = résistivité du conducteur  
 $\mu$  = perméabilité magnétique  
f = fréquence du courant

Le chauffage à haute fréquence se caractérise par sa tendance à concentrer l'énergie sur la surface du matériau de susceptance.

Le graphite est généralement utilisé comme matériau de susceptance dans les fours à la pression atmosphérique et des températures élevées peuvent être atteintes, ce qui s'est d'ailleurs produit. Des précautions doivent être prises de façon que le graphite ne réagisse pas en présence du matériau réfractaire. Parmi les autres matériaux utilisés pour provoquer la susceptance figurent le tungstène, le molybdène et le tantale.

La Fig. 14 donne un diagramme schématique d'un four à induction (27).

Étant donné qu'il existe une relation entre la température de réaction et le taux de réaction du graphite et des matériaux réfractaires et leur degré de contact, des études ont été menées afin de réduire ce contact (27).



- |   |   |
|---|---|
| <p>1. Assemblage du périscope (laiton)</p> <p>2. Miroir</p> <p>3. Pyromètre optique</p> <p>4. Sortie de gaz</p> <p>5. Vitre de quartz sur joint de caoutchouc</p> <p>6. Cheminée (graphite) (deux éléments)</p> <p>7. Évacuation de l'eau de refroidissement</p> <p>8. Prise de gaz</p> <p>9. Couvercle (graphite)</p> <p>10. Entrée de l'eau de refroidissement</p> <p>11. Matière de susceptance (graphite) diamètre extérieur 11 po. diamètre intérieur <math>9\frac{1}{2}</math> po., hauteur 19 po.</p> <p>12. Périscope (graphite)</p> <p>13. Rainure</p> <p>14. Isolant (Ajax-électrothermic) Norblack, carbone "thermotomic", ou magnésie</p> | <p>15. Garnissage intérieur</p> <p>16. Inducteur (Ajax-electrothermic) tubes de cuivre de <math>\frac{1}{2}</math> po., diamètre intérieur 16 po., longueur 2 pi., 32 coudes</p> <p>17. Brique réfractaire à chauffer</p> <p>18. Terminal du générateur haute fréquence</p> <p>19. Entrée de l'eau de refroidissement</p> <p>20. Tube de quartz (ensemble thermique) diamètre extérieur <math>15\frac{1}{2}</math> po., longueur 28 po., épaisseur de la paroi <math>\frac{1}{4}</math> po.</p> <p>21. Terminal du générateur haute fréquence</p> <p>22. Évacuation de l'eau de refroidissement</p> <p>23. Cylindre isolant (transite)</p> <p>24. Échelle (po.)</p> <p>25. Fond (transite) fixé au quartz</p> <p>26. Socle (stéatite)</p> |
|---|---|

Fig. 14 - Schéma d'un four à haute fréquence à pression atmosphérique

#### AUTRES TYPES DE FOURS

Certains fours utilisés pour la production de fibres de verre ou de billes de verre sont semblables à ceux que l'on utilise pour la fabrication de produits de céramique tels que les fours à régénération, les fours à récupération, et les

fours à alimentation directe. Les matières premières sont concassées, mélangées et chargées automatiquement dans le four. Elles sont habituellement de grandes dimensions et le contrôle de la température s'effectue facilement (4).



### PARAMÈTRES DE MISE EN FIBRE

Les paramètres de fusion mentionnés précédemment dans ce rapport revêtent aussi une importance pour la mise en fibre. De plus, le débit, la hauteur de chute du mélange fondu avant la mise en fibres, l'épaisseur des fils, brins ou fibres primaires, doivent tous être contrôlés afin d'obtenir la longueur, l'épaisseur, la résistance et la souplesse convenables de la fibre.

Malgré l'importance de cette étape dans la fabrication d'isolants minéraux, les renseignements publiés sont rares. Certains travaux expérimentaux ont été effectués, mais les résultats sont parfois contradictoires. Zaitseva a émis l'opinion que pour le filage centrifuge des fibres, le débit du mélange fondu doit être de 1700 à 2000 kg/h à des températures variant entre 1360° et 1380°C (28). Cela réduit de 26 à 21% la teneur de la perle. Zihilin a déclaré que dans le cas du soufflage des fibres de verre, l'épaisseur du filament fondu ne devrait pas dépasser 15 à 20 mm (21). Sperantov a obtenu une fibre de bonne qualité de diamètre allant jusqu'à 3 mm avec un débit de mélange fondu de 15 à 20 mm de diamètre (29). D'autres chercheurs ont estimé qu'un débit uniforme était nécessaire pour produire de bonnes fibres de qualité uniforme (30,31,32,33).

Il est presque évident et on peut s'en rendre compte d'après les principes fondamentaux, que les variations de température de quelque source que ce soit, l'épaisseur du mélange fondu, les gradients de température et la pression du gaz ou de l'air ont tous des effets sur la formation des fibres, et par conséquent sur la qualité de la fibre.

L'industrie des isolants minéraux utilise deux principales méthodes de fabrication de fibre: a) le filage et b) le soufflage, mais les détails des méthodes et de l'équipement sont jugés confidentiels par les sociétés. Les deux méthodes produisent des perles en petites quantités une fois la fibre formée. Diverses techniques qui permettent de réduire ou d'éliminer ces perles indésirables ont été employées avec succès.

### FILAGE

Il existe de nombreuses variations de

techniques de filage, comme les techniques horizontale, verticale et la technique de l'assiette. Toutes ces techniques sont cependant fondées sur le principe de la force centrifuge. On peut utiliser des tôles plates ou des disques horizontaux, ou bien une ou plusieurs roues de filage. La roue ressemble à une assiette et elle est généralement refroidie par eau. Vue en coupe transversale, la roue est concave et elle est recouverte de métaux spéciaux qui réduisent autant que possible l'usure et l'érosion.

Le verre fondu tombe sur ou dans l'assiette qui, en tournant à une vitesse élevée, projette à vitesse élevée les gouttelettes de verre fondu, et allonge les particules de verre fondu en un filament ressemblant à une comète, auquel est attachée une perle. Cette perle disparaît partiellement avant la formation de la fibre. La vitesse de rotation de la roue n'a pas été calculée de façon scientifique, mais elle est fondée sur l'habileté et l'expérience de l'ouvrier, et on aurait intérêt à effectuer d'autres recherches. On comprend facilement que le bon fonctionnement, y compris la vitesse des roues, pourrait avoir une influence sur les propriétés physiques de la fibre, par exemple sur sa longueur et sur son diamètre. Il pourrait aussi influencer sur la grosseur des perles produites (Fig. 15, 16).



Fig. 15 - Fabrication de fibres de verre à partir de mélange fondu (34)

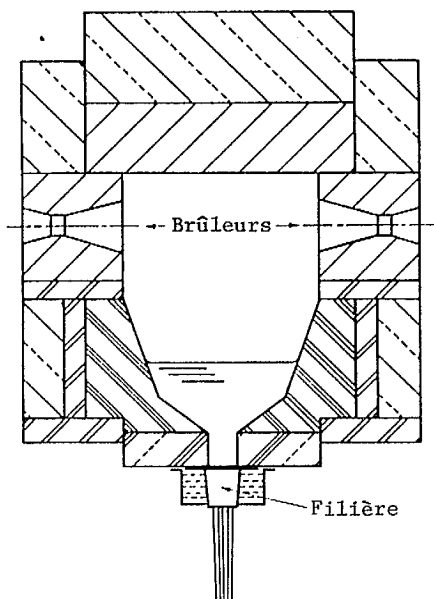


Fig. 16 - Section transversale de l'avant-corps avec illustration de la filière et de l'écoulement de la fibre de verre

#### SOUFFLAGE DU LIQUIDE

Le liquide en fusion s'écoule du four et, à une distance convenable de celui-ci, il est soumis à un jet d'air à haute pression qui frappe le liquide à angle droit. Le liquide se transforme en petites gouttelettes qui sont propulsées dans l'air. Les gouttelettes s'allongent et une perle se forme à l'extrémité de la fibre.

Le plus souvent, le gaz utilisé dans le soufflage est de l'air sous pression, mais la vapeur a aussi été utilisée. L'industrie a prouvé qu'aucun effet délétère ne s'était produit lorsqu'elle a abandonné la vapeur pour utiliser de l'air (35). D'autres gaz ont été utilisés à titre expérimental. Il semble que la pression des gaz ait un effet sur la grosseur de la perle; on s'aperçoit qu'elle a aussi un effet sur la longueur de la fibre. La divergence d'opinions quant à la pression optimale de gaz, de 345 à 1380 kPa (50 à 200 livres par pouce carré), met en relief la nécessité d'entreprendre d'autres recherches.

Divers tétons de filière ont été utilisés ou ont été proposés pour le soufflage de la laine minérale. Il faudrait tenir compte dans leur con-

ception de la vitesse élevée du gaz qui sert à allonger les particules. La fabrication des fibres est plus compliquée qu'elle ne semble à première vue et il faudrait lui consacrer d'autres études.

Un diagramme schématique simplifié de la fabrication de laine de roche au cubilot et par soufflage est donné à la Fig. 17.

Le four Pochet est un nouveau four dont le fond a la forme d'une cuvette avec refroidissement par circulation d'eau (2). La cuvette est garnie d'une fine couche de réfractaire pour empêcher le rayonnement. Des électrodes de molybdène placées au fond chauffent le bain avec un courant triphasé. La capacité de production est de sept tonnes de verre par jour et la température du bain peut atteindre 2000°C. La puissance consommée est de 1,2 à 2 kW/kg de verre fondu. De plus, le poids de ce four est moindre ainsi que le coût par tonne produite. La Fig. 18 donne un diagramme schématique de ce four.

#### CONSIDÉRATIONS ENVIRONNEMENTALES

Depuis quelques années, le public se préoccupe de la détérioration de l'environnement. Les organismes de réglementation sont devenus plus intransigeants en ce qui concerne l'exécution des règlements et ils insistent pour que toutes les émissions de gaz des machines et procédés de production soient réduites.

Les usines de fabrication de laine minérale ont fait l'objet d'études à cet égard (37,38, 39,40).

La Fig. 19 donne le diagramme d'acheminement, extrait de l'une de ces études, pour la fabrication au cubilot.

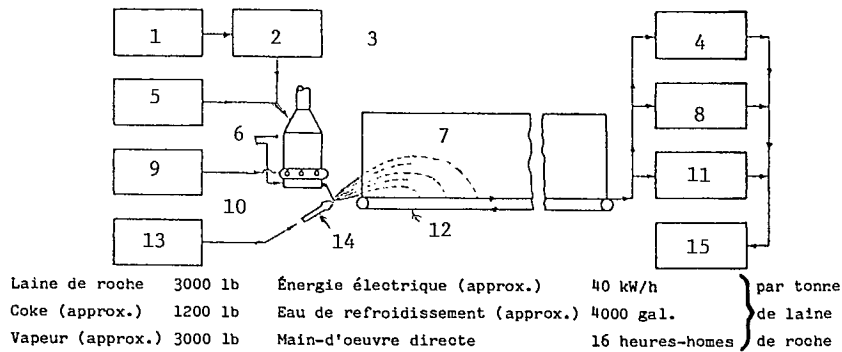
Les émissions provenant des diverses étapes du processus doivent être contrôlées, et ce, grâce à différentes techniques. Ces émissions illustrées au tableau 10 ont été analysées par Danielson de l'E.P.A.\* (37).

#### ÉVALUATION DES ISOLANTS THERMIQUES

Les essais d'évaluation peuvent se diviser en deux types:

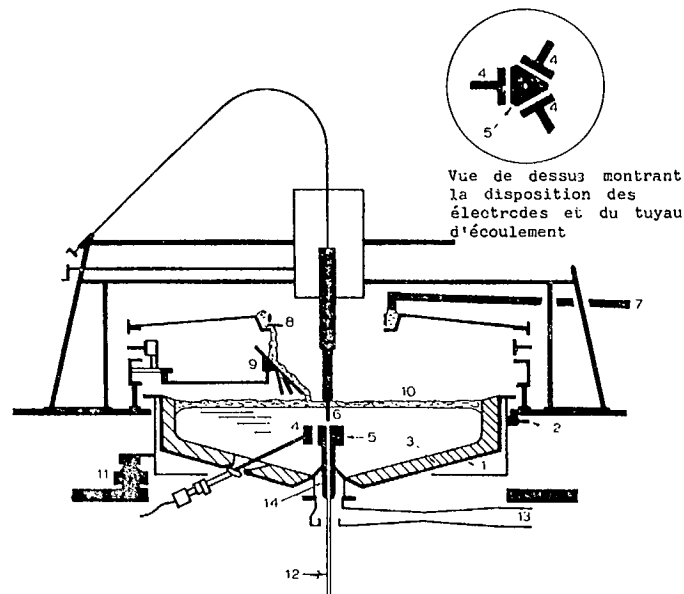
\*E.P.A. - U.S. Environmental Protection Agency





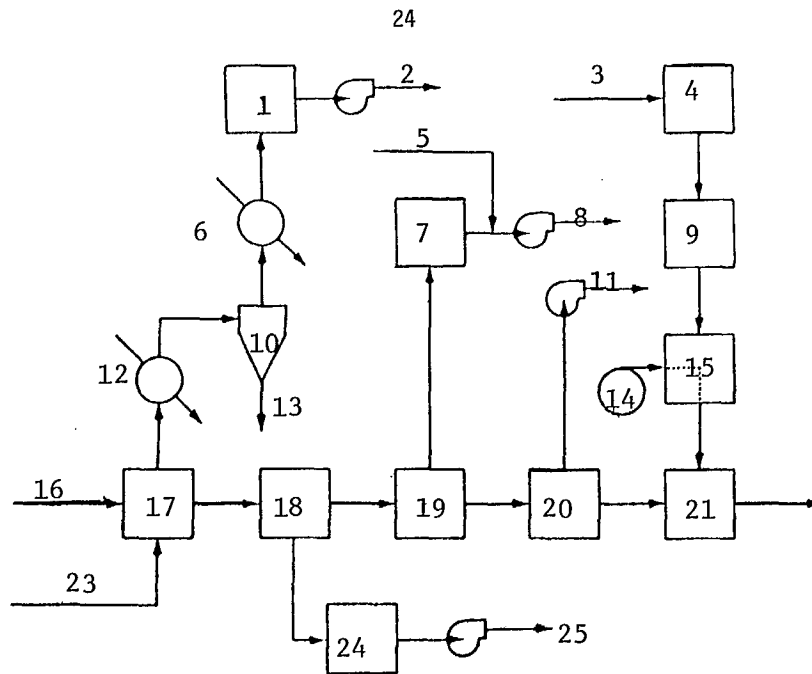
1. Laine de roche
2. Concassage et calibrage
3. Nota: La composition approximative de la laine donnée par le rapport moléculaire  $\frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}} = 1$
4. Granulateur
5. Coke
6. Eau de refroidissement
7. Étuve
8. Four à feutre
9. Air (basse pression)
10. Cubilot, 5' x 8'
11. Laine en vrac
12. Courroie transporteuse
13. Vapeur (pression de 100 livres)
14. Buse de soufflage
15. Ensachage et expédition

Fig. 17 - Diagramme schématique d'une usine de laine de roche (36)



1. Cuvette en cuivre entourée de tuyaux de refroidissement par circulation d'eau
2. Prises et sorties d'eau de refroidissement
3. Bouclier réfractaire contre le rayonnement
4. Electrodes
5. Tuyau d'écoulement du verre (voir aussi le médaillon)
6. Barre de contrôle de l'écoulement de verre
7. Arrivée de mélange vitrifiable
8. Enfourneuse rotative
9. Distributeur à recul de mélange vitrifiable.
10. Nappe permanente de mélange vitrifiable
11. Transducteur
12. Verre fondu
13. Conduit d'échappement des gaz
14. Nappe d'hydrogène servant à protéger le tuyau de molybdène

Fig. 18 - Four pochet (2)



- |  |                                     |                                |
|--|-------------------------------------|--------------------------------|
| 1. Sac filtrant                        | 10. Cyclone                         | 18. Chambre de soufflage       |
| 2. Dans l'atmosphère                   | 11. Dans l'atmosphère               | 19. Four                       |
| 3. Asphalte                            | 12. Échangeur de chaleur            | 20. Chambre de refroidissement |
| 4. Réservoir de liquide en fusion      | 13. Stockage de cendres             | 21. Machine à matelas          |
| 5. Air de refroidissement              | 14. Papier                          | 22. Emballage et entreposage   |
| 6. Échangeur de chaleur                | 15. Bassin de trempe                | 23. Tuyère d'air               |
| 7. Chambre de post-combustion          | 16. Laitier, laine de roche et coke | 24. Épurateur à eau            |
| 8. Dans l'atmosphère                   | 17. Cubilot                         | 25. Dans l'atmosphère          |
| 9. Réservoir d'attente (400°F maximum) |                                     |                                |

Fig. 19 - Diagramme d'acheminement d'un procédé de fabrication de laine minérale avec les émissions des divers stades dans l'atmosphère (37)

Tableau 10 - Types d'émission dans les usines d'isolants minéraux

Type d'usine	Stade de fabrication	Type d'émission	Remarques
Cubilot	Cheminée du four	Gaz, par ex. CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , F	Importantes
	Chambre de soufflage	Fibres fines, quelques fumées	Importantes
	Four de cuisson	Fibres fines, substances organiques	Moyennes
	Chambre de refroidissement	Semblable aux fours de refroidissement	Faibles

1. les essais effectués pendant la fabrication et
2. les essais effectués sur les matériaux.

Les essais effectués pendant la fabrication ne sont pas uniformes pour tous les matériaux isolants, mais ils ont été empruntés à diverses sources, habituellement celles des industries de la céramique et du verre. En ce qui concerne la fibre de verre, ils peuvent inclure la longueur, le diamètre, la souplesse, la conductivité thermique, la densité et la tension superficielle du mélange fondu, l'homogénéité du mélange fondu et du verre, et la dévitrification. Ces essais sont évidemment liés à la qualité de la fabrication et à celle du matériau.

Le second type d'essais effectués sur les matériaux, vise le plus souvent à satisfaire aux normes locales particulières, et habituellement aux normes applicables aux bâtiments et aux maisons. La plupart des essais sont décrits par l'American Society for Testing and Materials, et les essais sont habituellement utilisés par les autorités canadiennes au moins à titre indicatif. Des essais normalisés ont aussi été rédigés par l'Association canadienne de normalisation et par l'Office des normes du gouvernement canadien.

Ces essais comprennent: les propriétés thermiques de transmission, la conductance thermique, les normes relatives aux isolants en matelas, la chaleur spécifique moyenne, la densité des isolants fibreux en vrac et les normes des isolants de fibres minérales en vrac. Ces normes, dont la cote est ASTM C 764-73, comprennent les rubriques suivantes:

classification  
raison de l'achat  
matériaux et fabrication  
exigences relatives aux propriétés physiques  
mise en oeuvre  
méthodes d'essai: résistance thermique  
caractéristiques de  
combustion superficielle  
absorption d'humidité  
émission d'odeurs  
emballage et identification

Pour les matelas isolants les essais effectués sont les suivants:

densité  
conductivité thermique  
maniabilité  
résistance au feu  
dimensions normalisées  
mise en oeuvre

Les détails des essais sont inclus dans la publication annuelle intitulée Annual Book of ASTM Standards, dans les publications spéciales de l'ASTM, dans les publications de l'Association canadienne de normalisation, à Toronto, et dans celles de l'Office des normes du gouvernement canadien (respectivement 41, 42, 43, 44).

#### RÉFÉRENCES

1. Morey, G.W. "The properties of glass"; 2nd edition; New York, Reinhold; 1954.
2. Loewenstein, K.L. "The manufacturing technology of continuous glass fibres"; New York, Elsevier Scientific Publishing; 1973.
3. Coudurier, L., Hopkins, D.W., Wilkomirsky, I. "Fundamentals of metallurgical processes"; Toronto, Pergamon Press; 1978.
4. Tooley, F.V. "The handbook of glass manufacture"; Vol. 1 and 2; New York, Ogden Publishing; 1974.
5. Robertson, R.H.S. "Rock wool as an industrial raw material"; Chem Ind 12:482-485; 1972.
6. Gota, J., editor "Glass 1977"; Vol. 1 and 2; Proc. of the 11th International Congress on Glass; July 4-8, 1977; Prague, Czechoslovakia; 1977.
7. Van Der Colf, J. and Howatt, D.D. "Viscosities, electrical resistivities and liquidus temperatures of slags in the system CaO-MgO-

- $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$  under neutral conditions"; J S Afr Inst Min and Metall 79:9:255-263; 1979.
8. Kozakevitch, P. "Viscosity of lime, alumina, silica melts between 1600 and 2100°C"; International Symposium on the Physical Chemistry of Process Metallurgy; edited by G.R. St. Pierre; April 27-May 1, 1959; Pittsburgh; 79-116; 1961.
  9. Carron, J.P. "Vue d'ensemble sur la rhéologie des magmas silicates naturels"; Bull Soc Fr Minéral Cristallogr 92:435-446; 1969.
  10. Discussion en privé avec l'industrie de matériaux isolants.
  11. Saito, T. and Kawai, Y. "On the viscosities of molten slags. 1. Viscosities of  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ "; The Science Reports 3A:491-501; Research Inst, Tohoku University; 1951.
  12. Zavaritsky, A.N. and Sobolev, V.S. "The physicochemical principles of igneous petrology"; Jerusalem, Israel Program for Scientific Translations; 1964.
  13. Turkdogan, E.T. and Bills, P.M. "A critical review of viscosity of  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  melts"; Am Ceram Soc Bull 39:682-687; 1960.
  14. Levin, E.M., Robins, C.R. and McMurdie, H.F. "Phase equilibrium diagrams for ceramists"; Columbus, Ohio, Am Ceram Soc; 1964.
  15. Barrett, L.R. and Thomas, A.G. "Surface tension and density measurements on molten glasses in the  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  systems"; J Soc Glass Tech 43:179-191; 1959.
  16. King, T.B. "The surface tension and structure of silicate slags"; J Soc Glass Tech 35:241-249; 1951.
  17. Swift, H.R. "Effect of magnesia and alumina on rate of crystal growth in some soda-lime-silica glasses"; J Am Ceram Soc 30; 1947.
  18. Kozakevitch, P. "Surface tension of liquid metals and oxide melts"; Proc of the Symposium on Liquids: Structure, Properties, Solid Interactions; edited by T.J. Hughel; Sept. 5-6, 1963; Warren, Mich; 243-280; 1965.
  19. Boni, R.E. and Derge, G. "Surface tension of silicates"; J Met 8:1:53-59; 1956.
  20. Ustenko, A.A. "Study of fiber formation mechanism in the production of mineral wool and glass wool"; Stroit Mater 9:9:32-35; 1963.
  21. Zihilin, A.I. "Factors influencing the process of slag wool production"; C R Acad Sci U.S.S.R. 53:39-41; 1946.
  22. Azbe, V.S. "Manufacturing rock wool"; Rock Products 51:11:97-104; 1948; *ibid* 52:2:119-123; 1949; *ibid* 52:3:104-5; 1949; *ibid* 52:4:142, 145, 165; 1949; *ibid* 52:5:74-6; 1949.
  23. Gillespie, J.E. "The manufacture of mineral wool"; Can Inst Min Met 51:33-36; 1948.
  24. Lavers, J.D. "Fundamentals of electric arcs"; presented at electric furnace applications in the non-ferrous and ferro-alloy industries seminar; McGill University; April, 1980.
  25. Coble, J.R. and Hansen, J.P. "Evaluation of refractories for mineral wool furnaces"; Report of Investigations 8090; U.S. Bureau of Mines; 1975.
  26. Laws, F.A. "Electrical measurements"; second edition; New York, McGraw Hill; 1938.
  27. Norton, F.H. "Refractories"; third edition; McGraw Hill; 1949.
  28. Zaitseva, L.I. "Improvement in the centrifuge-roller process for manufacturing mineral wool"; Stroit Mater; 4:12-14; 1973.
  29. Sperantov, N. "Production of mineral wool"; Novosti Tekhniki 9:19:14-15; 1940.

30. Rozovskii, V.S. and Isakovich, G.A. "Analysis of the blowing unit operation during the drawing vertical-blast method for the processing of silicate melts into fibers"; Sb Tr Vses Nauchn-Issled Inst Novykh Stroit Mater 1:24-30; 1965.
31. A.G. fur Forschung und Patentverwertung "Spinnret for making glass or mineral wool fibers"; Neth Patent Appl 299,565; May 11, 1964.
32. Kaswant, G. "Flow through spinning nozzle in the manufacture of mineral fibers at high temperature and at sonic and ultrasonic velocities"; Tonind-Ztg u Keram Runds Chau 84:20:498-502; 1960.
33. Bryantsev, B.A. "Effect of technological factors on fiber formation during the industrial production of mineral wool from melts of magnesian-ferruginous composition"; Khim Tekhnal Silikat Mater 23-36; 1971.
34. Staff, "Mineral fibres - a general review"; Industrial Minerals 133:19-31; 1978.
35. Discussion en privé.
36. Shreve, R. Norris "The chemical process industries"; 2nd edition, Toronto, McGraw Hill; 1956.
37. Danielson, J.A. editor; "Air pollution engineering manual"; U.S. National Air Pollution Control Administration Publication; AP-40; May 1973.
38. Azbe, V.J. "Fundamental problem of rock wool manufacture"; Rock Prod 55-56; Dec. 1943.
39. Staff Report, "Air pollution by sulfur oxides"; National Industrial Pollution Control Council; Washington; 1971.
40. Schwierte, H.E. and Zagar, L. "Bonding and behavior of sulfur in blast furnace slags and metallurgical wool"; Arch Eisenhüttenw 25:295-206; 1954.
41. Annual Book of ASTM Standards, Part 18 (1978) Am Soc Test Mater; Philadelphia, Pa.
42. ASTM "Thermal transmission measurements of insulation"; A Symposium, ASTM special publication 660; Philadelphia, Pa.
43. Canadian Standards Association "Mineral Fibre Thermal Insulation Standards"; Toronto, Canada.
44. Canadian Government Specifications Board "Standards on Thermal Insulation"; Ottawa, Canada.

SONDAGE

L'opinion des lecteurs intéressés peut influencer l'orientation future des recherches à CANMET.

Nous vous invitons, donc, à évaluer le rapport - n<sup>o</sup> \_\_\_\_\_

Est-il utile?

Oui \_\_\_\_\_ Non \_\_\_\_\_

Traite-t-il d'un problème de l'industrie?

Oui \_\_\_\_\_ Non \_\_\_\_\_

Le sujet est-il prioritaire?

Oui \_\_\_\_\_ Non \_\_\_\_\_

Commentaires \_\_\_\_\_

Postez à: Rédacteur de CANMET, EMR, 555, rue Booth,  
Ottawa, Ontario, K1A 0G1

Une copie gratuite de la REVUE DE CANMET sera envoyée sur demande.

#### CANMET REPORTS

Recent CANMET reports presently available or soon to be released through Printing and Publishing, Supply and Services Canada (addresses on inside front cover), or from CANMET Publications Office, 555 Booth Street, Ottawa, Ontario, K1A 0G1:

Les récents rapports de CANMET, qui sont présentement disponibles ou qui le seront bientôt peuvent être obtenus de la direction de l'Imprimerie et de l'Édition, Approvisionnement et Services Canada (adresses au verso de la page couverture), ou du Bureau de Vente et distribution de CANMET, 555 rue Booth, Ottawa, Ontario, K1A 0G1:

- 80-12F Ressources Canadiennes en rebuts minéraux rapport No. 4 - Les rebuts minéraux dans les provinces Atlantiques; R.K. Collings;  
Cat. No. M38-13/80-12F, ISBN 0-660-90775-5; Price: \$1.95 Canada, \$2.35 other countries.
- 80-13F Ressources en rebuts minéraux au Canada rapport No. 6 - Rebut minéraux employés comme chargés; R.K. Collings;  
Cat. No. M38-13/80-13F, ISBN 0-660-90790-9; Price: \$2.25 Canada, \$2.70 other countries.
- 80-17F Revue de CANMET 1979-80; Staff of Technology Information Division;  
Cat. No. M38-13/80-17F, ISBN 0-660-90789-5; Price: \$5.00 Canada, \$6.00 other countries.
- 80-20E An iris diaphragm-based interface for use in erimetry; B. Kirk;  
Cat. No. M38-13/80-20E, ISBN 0-660-10914-X; Price: \$2.50 Canada, \$3.00 other countries.
- 80-26E Release of Lead from typical Canadian Pottery glazes; D.H.H. Quon and K.E. Bell;  
Cat. No. M38-13/80-26E, ISBN 0-660-10902-6; Price: \$1.75 Canada, \$2.10 other countries.
- 80-27E Generation and control of mine airborne dust; G. Knight;  
Cat. No. M38-13/80-27E, ISBN 0-660-10958-1; Price: \$2.10 Canada, \$2.50 other countries.
- 81-1E Niobium ore OKA-1 - A certified reference material; H. Steger and W.S. Bowman;  
Cat. No. M38-13/81-1E, ISBN 0-660-10915-8; Price: \$1.75 Canada, \$2.10 other countries.
- 81-2E Acid extraction of alumina from Canadian non-bauxite sources at CANMET; Colin Hamer;  
Cat. No. M38-13/81-2E, ISBN 0-660-10957-3; Price: \$2.00 Canada, \$2.40 other countries.
- 81-3E Feasibility study on recovery of thermal coal from waste dumps in Nova Scotia; M.W. Mikhail, L.C. Bird and N.T.L. Landgren;  
Cat. No. M38-13/81-3E, ISBN 0-660-11007-5; Price: \$3.75 Canada, \$4.50 other countries.
- 81-4E Effect of Pore Size in MoO<sub>3</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Hydrocracking Catalysts; A.H. Hardin, M. Ternan and R.H. Packwood;  
Cat. No. M38-13/81-4E, ISBN 0-660-11065-2; Price: \$3.75 Canada, \$4.50 other countries.
- 81-5E High performance liquid chromatographic method for type analysis of hydrocarbons in synthetic fuel naphtha; J.E. Beshai and A.E. George;  
Cat. No. M38-13/81-5E, ISBN 0-660-10985-9; Price: \$1.50 Canada, \$1.80 other countries.



