

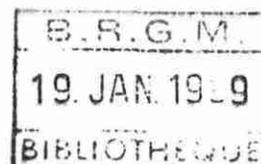


Ministère de l'Economie,
des Finances et
de l'Industrie

Mémento roches et minéraux industriels
La silice à usage industriel

Etude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 98-G-185

novembre 1998
R 40348



Mots clés : Silice, Production, Marchés, Utilisations, Europe des Quinze.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

BRGM (1998) - Mémento roches et minéraux industriels - La silice à usage industriel.
Rap. BRGM R 40348, 80 p., 5 fig., 17 tabl.

© BRGM, 1998, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce document dresse un panorama de la silice destinée à l'industrie, à l'exclusion des roches siliceuses meubles ou massives, parfois riches en silice, utilisées comme granulat dans l'industrie du bâtiment et des travaux publics.

La silice ou dioxyde de silicium est essentiellement présente dans la nature sous forme de quartz ou de calcédoine, elle est utilisée en raison de sa dureté (7 sur l'échelle de Mohs), de son inertie chimique, de ses propriétés optiques ou piézo-électriques mais surtout en raison de ses propriétés vitrifiantes. C'est enfin la première source naturelle de silicium.

En France, sous forme de sables siliceux, elle est destinée pour près de 49 % à l'industrie du verre, 15 % à celle de la fonderie, 15 % au bâtiment et dans une moindre mesure, à la céramique, la chimie et la filtration ou comme charge dans de nombreux domaines comme les peintures, les plastiques ou l'alimentation animale.

Elle est également valorisée sous forme de blocs obtenus à partir de roches massives : quartz, quartzites, galets de quartz ou de silex, dans les secteurs de l'électro-métallurgie (> 60 %) et du bâtiment.

Dans tous ces domaines, les spécifications concernent surtout la granulométrie et la pureté chimique. Les produits commercialisés varient depuis des farines de silice de granulométrie inférieure à 10 μm , jusqu'aux produits destinés à l'électro-métallurgie qui peuvent atteindre 150 mm.

Pour tous ces secteurs d'utilisation, nous tentons de préciser les enjeux qui suscitent le choix de ces spécifications, qu'il s'agisse de procédés de fabrication ou de contraintes d'utilisations.

La production mondiale de sables siliceux était estimée en 1995 à 105 Mt, l'Europe des Quinze constituant le plus gros producteur avec un total de 58,7 Mt.

La France occupe la troisième place européenne avec une production estimée à 7 Mt, provenant à 60 % des sables de Fontainebleau et de Beauchamp dans la région parisienne.

Les principales sociétés du secteur en France sont Sifraco (groupe Sibelco n°1 mondial), Samin (groupe Saint-Gobain) et Fulchiron Industrielle qui cumulent 88 % de la production française.

La production de roche massive en France peut être estimée à 570 000 t tous produits confondus, la société D.A.M. (Denain Anzin Minéraux) est le deuxième producteur européen de galets de quartz, destinés essentiellement à Pechiney Electro-métallurgie, n°3 mondial du secteur et leader européen de la fabrication de silicium métal.

Les flux commerciaux restent, pour les volumes les plus importants, cantonnés à l'intérieur des principales zones économiques : Amérique du Nord, Europe.

Les échanges inter-zones ne concernent donc, le plus souvent, que des matières premières très pures dont les coûts unitaires élevés justifient le transport.

En Europe, les échanges sont réalisés à plus de 90 % à l'intérieur des quinze pays de l'Union.

La France est exportatrice nette de sables siliceux avec un solde de 464 kt en 1996.

Les roches siliceuses susceptibles de constituer une ressource valorisable se rencontrent :

- soit dans des gîtes primaires (filons) où la silice a été mise en place à partir des solutions hydrothermales ;
- soit dans des gîtes détritiques sous forme de roches meubles (sables) ou massives (quartzites).

La taille minimale d'un gisement est estimée à 2 millions de mètres cubes de réserves exploitables contenues.

Les éléments d'appréciation d'un gisement doivent prendre en compte les conditions de gisement mais aussi les caractéristiques du matériau. Le préalable à l'ouverture d'une exploitation étant la réalisation d'une étude d'impact sur l'environnement, comme pour toutes les ressources relevant du régime des carrières.

La part accrue du recyclage des matières utilisées dans le domaine du verre creux et de la fonderie, jointe aux contraintes réglementaires instaurées pour des raisons sanitaires, devraient restreindre la demande en ressource siliceuse naturelle. A l'exception notable du domaine de l'électro-métallurgie où le recyclage restera probablement limité à moyen terme. Dans ce secteur, du fait des spécifications tant granulométriques que chimiques imposées aux matières premières, de nouvelles sources d'approvisionnement devraient être développées pour faire face à la demande en matière première de haute pureté.

Les travaux ayant permis l'élaboration du présent document ont été réalisés par F. Barthélémy dans le cadre des opérations de Service public confiées au BRGM par le ministère de l'Industrie (fiche 98-G-185).

Sommaire

Introduction	9
1. Caractéristiques et propriétés de la silice	11
2. Production	13
2.1. Niveau mondial	13
2.1.1. Les sables siliceux	13
2.1.2. La silice en blocs ou en roche massive	14
2.2. L'Europe des Quinze	14
2.2.1. Les sables siliceux	14
2.2.2. La silice en blocs ou en roche massive	15
2.3. France	16
2.3.1. Les sables siliceux	16
2.3.2. La silice en blocs en roches massives	24
3. Réserves	27
3.1. Les sables siliceux	27
3.2. La silice en roche massive	27
4. Répartition de la consommation par secteurs d'utilisation	29
4.1. Les sables siliceux	29
4.2. La silice en blocs ou en roche massive	30
5. Les flux commerciaux	31
5.1. Les sables siliceux	31
5.1.1. Au niveau européen (source E.M.Y. éd. 1997)	31
5.1.2. Au niveau français	32
5.2. La silice en blocs ou en roche massive	32
6. Etat actuel et évolution de la demande	33
6.1. Les sables siliceux	33
6.2. La silice en blocs ou en roche massive	33

7. Les prix	35
8. Géologie	37
8.1. Eléments de géologie	37
8.2. Exploration des gisements et caractérisation des matériaux	42
8.3. Eléments d'appréciation des gisements de sables siliceux et de silice en roche massive	44
8.4. Modes d'exploitation et de traitement des matériaux	46
9. Utilisations et spécifications industrielles	51
9.1. Verrerie	51
9.1.1. Composition.....	52
9.1.2. Fabrication	52
9.1.3. Spécifications	54
9.2. Fonderie.....	58
9.3. Electrometallurgie	61
9.4. Bâtiment	64
9.5. Autres utilisations	65
10. Réglementation sanitaire	69
11. Recyclage : évolution récente et perspective	71
11.1. Verrerie.	71
11.2. Fonderie.....	72
Conclusion	73
Références bibliographiques	75

Liste des figures

Fig. 1 - Domaines de stabilité thermodynamique de la silice, d'après Boyd.....	11
Fig. 2 - Sites de production de silice pour l'industrie en France	17
Fig. 2bis - Sites de production de silice pour l'industrie dans la région parisienne	18
Fig. 3 - Répartition de la production française de sables siliceux par département	19
Fig. 4 - Schéma de traitement des sables siliceux	47
Fig. 5 - Modes de fabrication du verre	53

Liste des tableaux

Tabl. 1 - Caractéristiques des principales variétés de silice.....	12
Tabl. 2 - Production de sables pour l'industrie dans le monde.....	13
Tabl. 3 - Production européenne de sables siliceux de 1992 à 1995 en kt (source E.M.Y édit. 1997).....	14
Tabl. 4 - Principales capacités de production de silice en roche massive dans l'Europe des Quinze et la Norvège.....	15
Tabl. 5 - Principales sociétés productrices de silice en roche massive dans le monde.....	15
Tabl. 6 - Production de sables siliceux par département en France.....	16
Tabl. 7 - Principales caractéristiques des sites d'extraction de sables siliceux en France	20
Tabl. 8 - Production de silice en roche massive en France.....	24
Tabl. 9 - Principales caractéristiques des sites d'extraction de silice en roche massive en France.....	25
Tabl. 10 - Répartition de la consommation française de silice en roche massive.....	30

Tabl. 11 - Principaux éléments de comparaison entre les sables de Beauchamps et les sables de Fontainebleau	41
Tabl. 12 - Exemple de calcul de l'indice de finesse AFS d'un sable	43
Tabl. 13 a) b) - Panorama de la diversité des productions et des usages pour les différents types de verre.....	55
Tabl. 14 - Spécifications relatives à la composition chimique des matériaux siliceux utilisés en verrerie (Griffiths 1987, Maubert 1989).....	57
Tabl. 15 - Spécifications relatives à la granulométrie des matériaux siliceux utilisés en verrerie (d'après Griffiths 1987).....	58
Tabl. 16 - Spécifications relatives à l'indice de finesse et à la teneur en argile des sables siliceux utilisés en fonderie.....	60
Tabl. 17 - Spécifications de quelques produits marchands destinés à l'électrométallurgie	64

Introduction

La silice ou dioxyde de silicium accompagne l'histoire de l'humanité depuis ses origines jusqu'à nos jours, que ce soit sous forme naturelle ou transformée.

C'est, en effet, à la manière dont ils façonnaient les roches siliceuses que l'on identifie le degré d'évolution des premiers hominidés voilà près de 2,5 Ma. La matière première de prédilection étant représentée par de la silice sous diverses formes : quartz, silex ou par des roches volcaniques plus ou moins siliceuses (obsidienne).

Le verre, probablement né en Egypte ou Mésopotamie il y a plus de 5 000 ans, est aussi la plus ancienne matière synthétique que l'homme ait su élaborer.

Les secteurs d'utilisation industriels traditionnels de la silice sont la verrerie, les sables de fonderie, les abrasifs et les produits spéciaux du bâtiment : mortiers, enduits, bétons spéciaux. De nos jours, il faut ajouter son rôle de matière première pour l'élaboration du silicium métal constituant indispensable à l'élaboration des silicones ou des puces électroniques. La silice sous sa forme la plus pure constitue donc encore une matière première indispensable pour l'avenir.

La silice naturelle, utilisée par l'industrie, est représentée par deux catégories de matériaux :

- **Les sables siliceux**, roches meubles sédimentaires d'origine détritique dont les grains sont en majorité compris entre 1/16 mm (62,5 μ m) et 2 mm. Selon leur degré de pureté chimique et donc le cortège minéralogique accompagnant la silice, on distingue communément :

- les sables siliceux purs ou extra-siliceux ($\text{SiO}_2 > 99 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,02 \%$) utilisés pour les usages les plus sophistiqués nécessitant des puretés chimiques élevées, ils sont destinés à la fabrication de verres techniques, de la cristallerie, ou de certains verres plats ;
- les sables siliceux ($\text{SiO}_2 > 98 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,2\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 0,4\%$) qui trouvent des emplois en verre creux, verre plat, en fonderie, en céramique, comme abrasifs et comme charge dans les produits spéciaux du bâtiment ;
- les sables siliceux maigres (SiO_2 variant de 95 à 97 %), consommés en fonderie pour les verres colorés, la filtration et comme charge dans le domaine du bâtiment ;
- les sables silico-argileux dont la teneur en silice varie de 75 à 92 % essentiellement utilisés en fonderie, dans le secteur du bâtiment, comme charge dans l'alimentation animale, la filtration.

- **Les matériaux en blocs ou massifs :**

- quartz filonien ou pegmatitique qui correspond à de la silice "primaire" déposée par des solutions hydrothermales, il s'agit du matériau naturel le plus pur chimiquement

puisqu'il peut dépasser 99,9 % de SiO_2 (quartz dit ultra pur). Ces matériaux interviennent dans la fabrication des verres techniques mais surtout en électro-métallurgie ;

- quartzites qui sont des sables siliceux consolidés utilisés en électro-métallurgie et chimie ;
- galets de quartz rencontrés dans des alluvions, ils constituent la matière première privilégiée de l'électro-métallurgie pour la fabrication notamment du silicium métal ;
- galets de silex récoltés notamment dans les formations littorales du Nord de la France et destinés aux secteurs de la céramique, du bâtiment et des peintures.

Le présent mémento concerne, exclusivement, la silice naturelle à usage industriel, à l'exclusion des ressources telles que sables alluvionnaires ou roches massives (quartzites, grès, quartz filonien), parfois riches en silice qui sont utilisées après concassage et calibrage pour la fabrication de granulats destinés au secteur du bâtiment et des travaux publics. Les diatomites, roches d'origine biologique constituées essentiellement de silice microcristalline, sont utilisées comme agents de filtration ou comme absorbants et font l'objet d'un mémento spécifique.

Après les caractéristiques et les propriétés de la silice, seront présentés les principaux aspects de la production et du marché ainsi que les différentes ressources en silice et leur géologie. Les modes d'exploitation et de traitement de minerai seront également brièvement décrits, ainsi que les secteurs d'utilisations avec leurs différentes spécifications.

Enfin, les perspectives du marché seront envisagées compte tenu des évolutions aussi bien technologiques que réglementaires, en particulier sanitaires en insistant sur les possibilités de recyclage.

1. Caractéristiques et propriétés de la silice

Le silicium est l'élément le plus abondant dans la nature après l'oxygène, il intervient surtout sous forme de composés de la silice : les silicates forment, avec plus de mille espèces répertoriées, le groupe le plus important du règne minéral.

Sous forme naturelle, le dioxyde de silicium a trois expressions minéralogiques principales, chacune ayant une forme cristalline de haute température, dite Bêta, dont la symétrie se réduit en donnant une phase Alpha de basse température : le quartz, la cristobalite et la tridymite. On rencontre, plus rarement, les formes naturelles de haute pression comme la coésite et la stishovite limitées aux impacts de météorite ou aux éclogites, roches métamorphiques rencontrées dans les zones de subduction.

L'opale (variété hydratée amorphe) et la calcédoine sont fréquemment associées. La calcédoine est le constituant principal des silex.

La figure 1 présente les domaines de stabilité thermodynamique des différentes phases d'après Boyd.

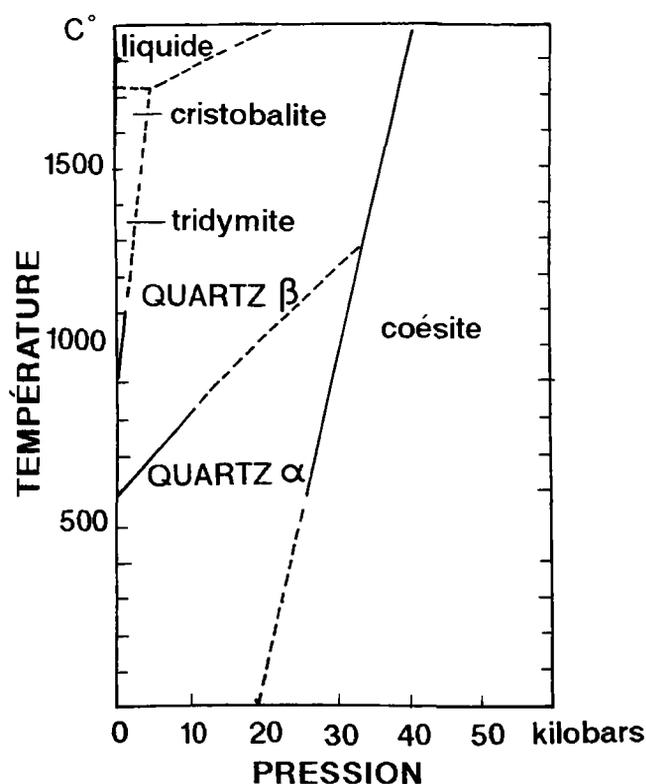


Fig. 1 - Domaines de stabilité thermodynamique des différentes phases de la silice d'après Boyd.

Les principales caractéristiques de ces variétés polymorphes de la silice sont regroupées dans le tableau 1.

Phase	Densité	Système cristallographique	Dureté (Mohs)
Opale	1,9 à 2,3	Amorphe	5,5 à 6,5
Calcédoine	1,9 à 2,3	Amorphe Rhomboédrique	5,5 à 6,5
β tridymite	2,25	Hexagonale	7
α tridymite	2,26	Orthorhombique	7
β Cristobalite	2,27	Cubique	7
α Cristobalite	2,33	Quadratique	7
β Quartz	2,55	Hexagonale	7
α Quartz	2,65	Rhomboédrique	7
Coésite	2,9 à 3	Monoclinique	7
Stishovite	4,35	Quadratique	7

Tabl. 1 - Caractéristiques des principales variétés de silice.

L'expression minéralogique la plus répandue est le quartz qui présente les caractéristiques physiques suivantes :

- un caractère réfractaire marqué par une résistance pyroscopique équivalente à 1 500°C au minimum et une température de fusion de 1 600°C ;
- une inertie chimique vis-à-vis de la plupart des acides à l'exclusion de l'acide fluorhydrique ;
- un pH neutre ;
- un pouvoir isolant élevé ;
- un coefficient de dilatation thermique très faible ;
- le quartz est également piézo-électrique, c'est-à-dire que, soumis à une contrainte, il présente des charges électriques sur ses faces cristallines. Réciproquement, par l'application d'un courant électrique, on engendre des oscillations de fréquences élevées qui, transformées en courant alternatif, sont mises à profit pour "mesurer le temps".

2. Production

2.1. NIVEAU MONDIAL

2.1.1. Les sables siliceux

La production mondiale de sables siliceux après avoir atteint 119 Mt en 1988 a décru jusqu'en 1992 pour se stabiliser ensuite aux environs de 105 Mt.

Les Etats-Unis et l'Europe des Quinze représentent ensemble 82 % de la production totale, l'Europe arrivant largement en tête avec une production cumulée évaluée à 58 770 Mt en 1995.

Le tableau 2 regroupe les statistiques de production pour les grands pays industrialisés et les principales zones économiques (source : E.M.Y. éd. 1997).

	1992 (kt)	1993 (kt)	1994 (kt)	1995 (estimé) (kt)
Europe des 15	52 038	46 580	50 587	58 770
USA	25 195	26 220	27 900	27 000
JAPON	3 864	3 880	3 940	3 900
BRESIL				> 2 200
EGYPTE			500 (est.)	500 (est.)

Tabl. 2 - Production de sables pour l'industrie dans le monde.

L'industrie poursuit sa concentration avec trois groupes dépassant 4 000 kt de capacité de production au niveau mondial (source : Industrial Minerals, E.M.Y., enquête auprès des producteurs).

Le groupe belge spécialisé **Sibelco** avec une capacité de production supérieure à 10 000 kt domine largement la production mondiale :

- SCR Sibelco SA (Belgique) : 4 000 kt
- Sifracco (France) : 4 000 kt
- Arenas de Arija (Espagne) : 600 kt
- Silca (Espagne) : 200 kt
- Sibelco Mineração (Brésil) : 700 kt
- Sibelco Sasifo Spa (Italie) : >1600 kt.

Il dispose également de capacités de production en Angleterre et en Hollande.

Le groupe américain **Unimin Corp** dispose d'une capacité de production d'environ 6 000 kt aux Etats-Unis.

Le groupe américain **US Silica Co** qui appartient au groupe D.G.H. et A. (D. George Harris and Associates) a produit 4 500 kt en 1994 aux USA.

Le groupe allemand **Quarzwerke GmbH** a une capacité de production mondiale qui dépasse 6 000 kt dont 4 200 kt en Allemagne et 800 kt en RSA. La société est également présente en Autriche, elle a des intérêts croisés avec le groupe **Sibelco**.

2.1.2. La silice en blocs ou en roche massive

Faute de données disponibles, tant au niveau mondial qu'au niveau de l'Europe des quinze, nous ne présenterons ci-après (§ 3.2.2) que les capacités de production concernant les principaux pays producteurs ainsi que les plus grandes sociétés du secteur.

2.2. L'EUROPE DES QUINZE

2.2.1. Les sables siliceux

	1992	1993	1994	1995 (estimé)
Allemagne	10 706	9 770	10 700	10 000
Autriche				6 000
Belgique	2 475	2 480	2 480	2 400
Luxembourg				
Danemark	194	194	270	320
Espagne	2 178	2 506	2 577	2 881
France	6 443	6 400	6 000	7 000
Finlande				160
Grèce	0	0	0	0
Hollande	25 000	20 000	20 000	20 000
Irlande	50	50	50	50
Italie	1 077	1 089	4 000	4 000
Portugal	300	504	742	1 165
Royaume-Uni	3 615	3 587	4 038	4 344
Suède				450

Tabl. 3 - Production européenne de sables siliceux de 1992 à 1995 en kt (source : E.M.Y. European Minerals Yearbook éd. 1997).

Avec un total estimé de 7 Mt en 1996, la France occupe le troisième rang européen, en volume, derrière la Hollande et l'Allemagne. Notons cependant que le chiffre élevé enregistré pour la Hollande doit être dû à la prise en compte de granulats qui ne devraient donc pas être intégrés aux statistiques concernant les sables industriels.

Le chiffre d'affaires français peut être estimé à 700 MF hors taxes.

2.2.2. La silice en blocs ou en roche massive

Pays	quartz (kt)	quartzite (kt)	galets de quartz (kt)	galets de silex (kt)	Remarques
Espagne	1500 (est. 1995)				quartz et galets de quartz indifférenciés
Finlande		350			
France	32 (1996)	200 (1996)	200/240 (1996)	90 (1996)	
Norvège	25 (1994)	735 (1994)			
Suède		580 (1996)			

Tabl. 4 - Principales capacités de production de silice en roche massive dans l'Europe des Quinze et la Norvège.

source : E.M.Y. éd. 1997

Société	Pays	Nature de la ressource	Capacité de production
Barrack silicon Pty Ltd	Australie	quartzite	400 kt
CVRD Co (consortium public)	Brésil	quartz ultra pur	n.d
Unimin Corp.	Canada	quartz en blocs	n.d.
Erimsa	Espagne	quartz	> 350 kt
D.A.M.	France	galets de quartz	240 kt
Elkem Tana	Norvège	quartzite	750 kt
Elkem Marnes			
Rasjö Kross	Suède	quartzite	250 kt
Dalbo Kvatsit AB	Suède	quartzite	100 kt
SPIR (groupe P.E.M)	France	quartzite	100 kt
Unimin Canada Ltd	USA	quartz en blocs	n.d.

Tabl. 5 - Principales sociétés productrices de silice en roche massive dans le monde.

Il est bon de noter que l'essentiel de la production des pays d'Europe du Nord comme la Finlande, la Suède et la Norvège est destinée à approvisionner l'industrie électro-métallurgique norvégienne, leader sur le plan mondial avec la société Elkem. Celle-ci participe au capital de la société espagnole ERIMSA et maîtrise donc ses approvisionnements complémentaires en provenance de ce pays. La société française Pechiney Electro-métallurgie occupe la troisième place mondiale derrière l'américain Globe, ses approvisionnements viennent principalement de France.

2.3. FRANCE

2.3.1. Les sables siliceux

Seuls trois opérateurs ont une production qui dépasse 500 000 t. L'industrie est fortement concentrée puisque ces trois producteurs cumulent 88 % de la production française :

- Sifracco : (groupe Sibelco) avec environ 4 Mt extraites, soit 57 % de la production nationale ;
- Samin : (groupe Saint-Gobain) avec 1,5 Mt extraites, soit 21,5 % de la production ;
- Fulchiron Industrielle avec 0,7 Mt extraites, soit 10 % de la production.

Seule la société Samin appartient à un ensemble intégré verticalement depuis la production de matière première jusqu'à sa transformation.

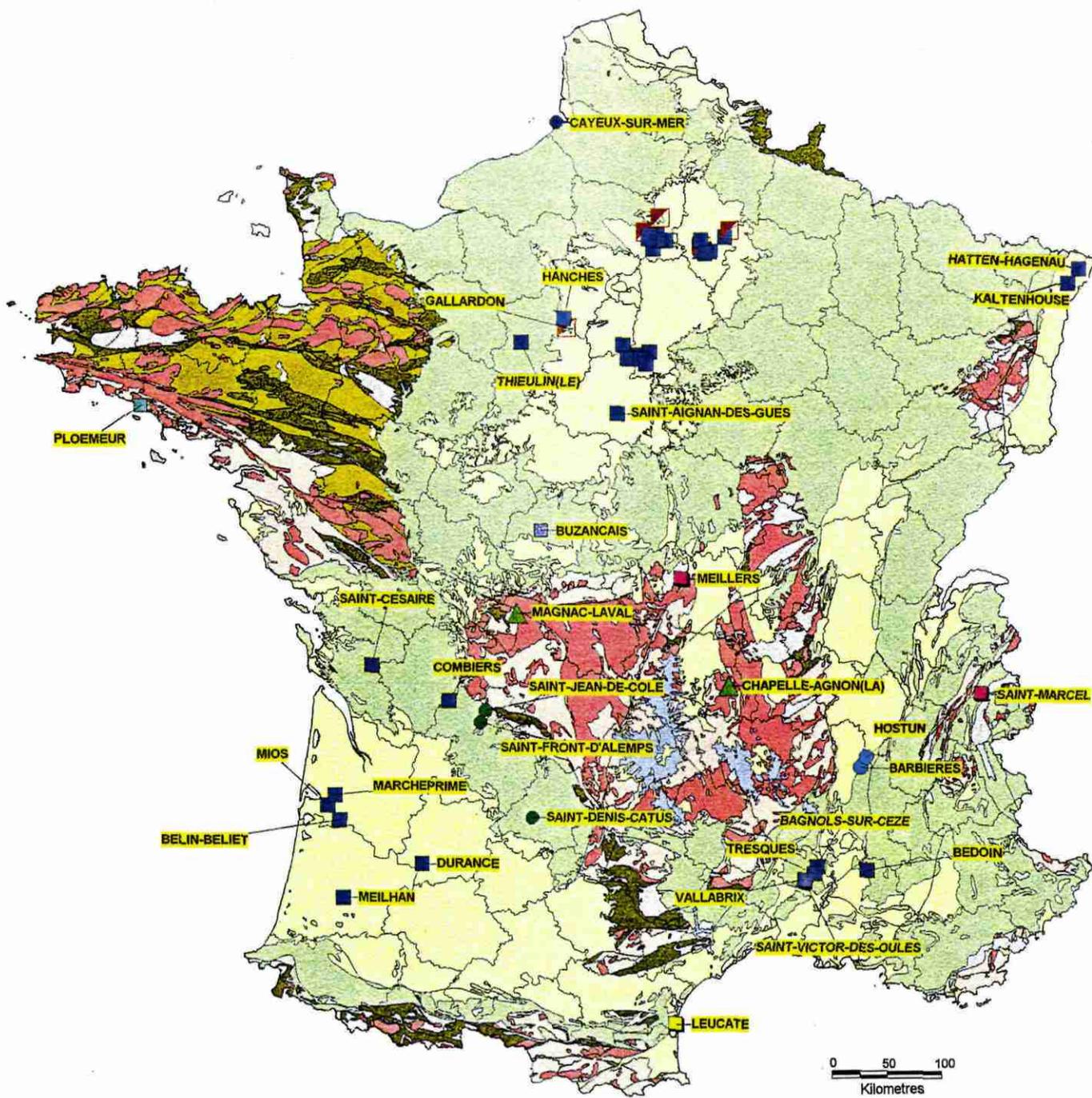
Département	Tonnage (kt, est. 1996)	% de la production nationale
02 Aisne	1285	18,3%
06 Alpes-Maritimes	15	0,2%
11 Aude	1	/
16 Charente	20	0,2%
17 Charente-Maritime	30	0,4%
26 Drôme	235	3,3%
28 Eure-et-Loir	270	3,8%
30 Gard	135	1,9%
33 Gironde	620	8,85%
36 Indre	2	/
38 Isère	50	0,7 %
40 Landes	10	0,1 %
45 Loiret	30	0,4
47 Lot-et-Garonne	240	3,4 %
56 Morbihan	140	2%
60 Oise	1170	17%
67 Bas-Rhin	400	5,7%
77 Seine-et-Marne	1400	18 %
84 Vaucluse	645	9%
91 Essonne	450	7%

Tabl. 6 - Production de sables siliceux par département en France.

Les sables de la région parisienne représentent 60 % de l'approvisionnement français, avec respectivement 25 % pour les sables de Fontainebleau au sud en Ile-de-France (départements 77 et 91) et 35 % pour les sables de Beauchamp au nord en Picardie (départements 60 et 02) (fig. 2 et 2 bis).

La figure 3 représente la répartition de la production française de sables siliceux par départements.

Les tableaux 7a à 7d présentent les principales caractéristiques des sites d'extraction de sables siliceux en France.



France - Géologie	
1	Roches volcaniques récentes
2	Tertiaire, quaternaire
3	Trias, jurassique, crétacé
4	Carbonifère et permien
5	Paléozoïque inférieur
6	Précambrien supérieur
7	Roches métamorphiques hercyniennes
8	Granites, diorites, gabbros

RESSOURCES EXPLOITEES	
▲	FILON DE QUARTZ
●	GALETS FLUVIATILES
●	GALETS DE MER
■	QUARTZITE
■	SABLES DE PLAGE
●	SABLES KAOLINIQUES
■	SABLES RESIDUELS
■	SABLES SILICEUX
■	SILICE PULVERULENTE
■	USINE

France - Géologie

Fig. 2 - Sites de production de silice pour l'industrie en France.

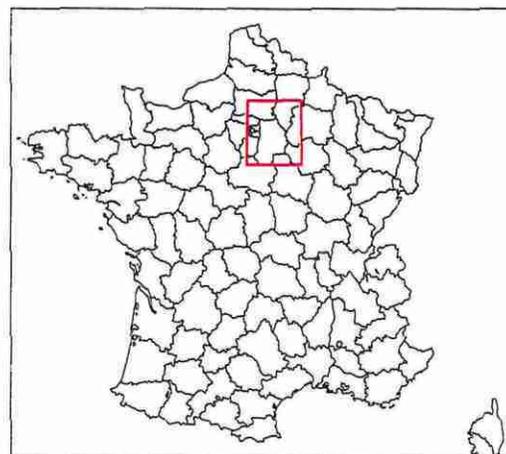
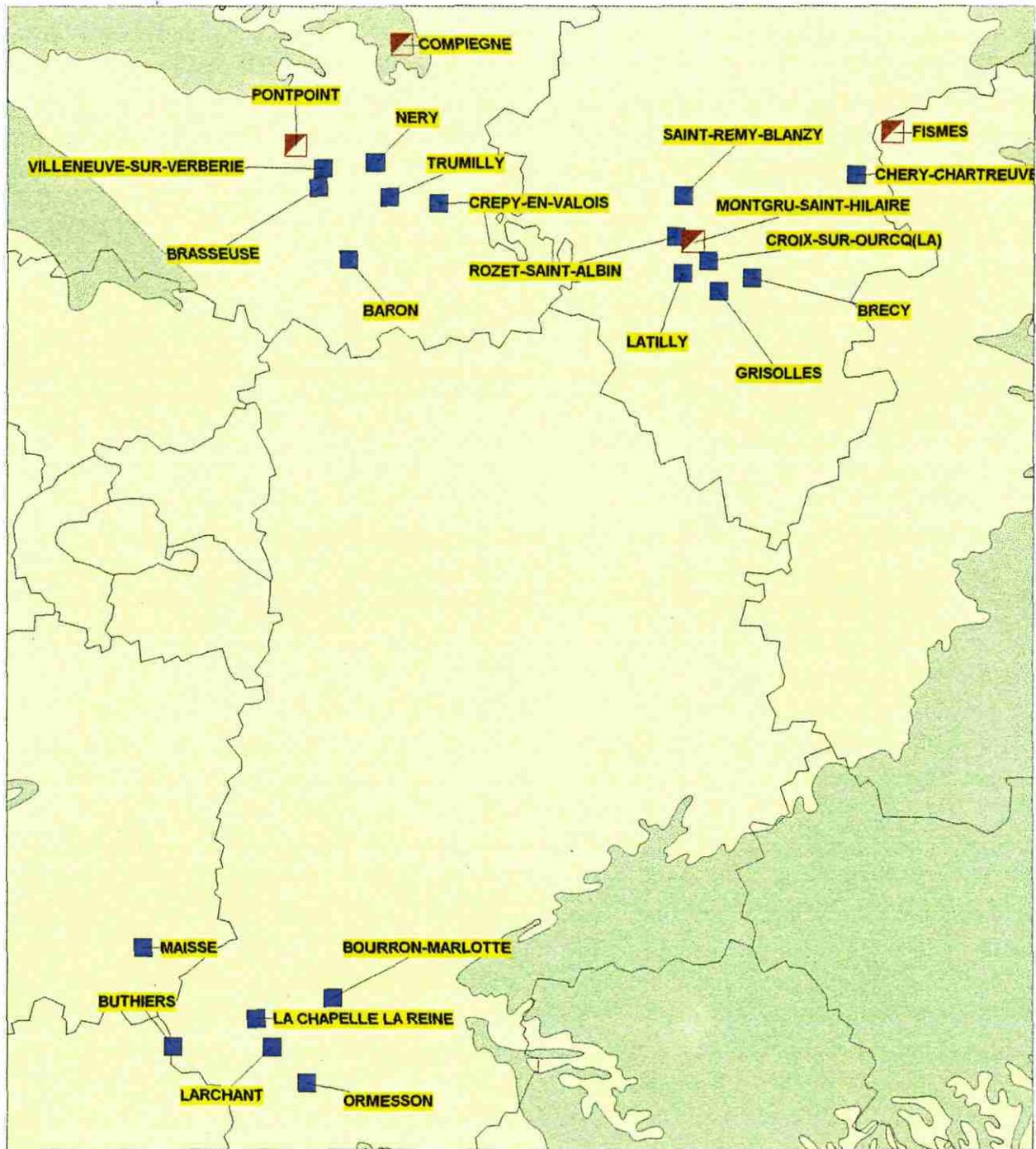


Fig. 2 bis - Sites de production de silice pour l'industrie dans la région parisienne.

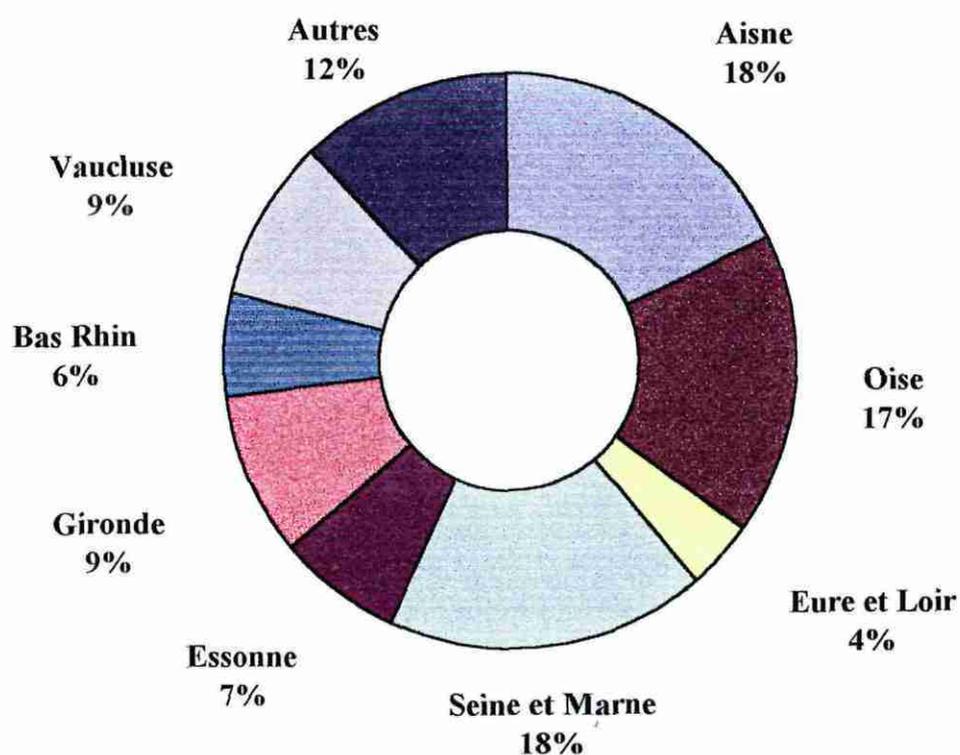


Fig. 3 - Répartition de la production française de sables siliceux par département.

SOCIETE	GROUPE	SITES DE PRODUCTION	RESSOURCE EXPLOITEE	CO - PRODUIT	Origine et Age de la formation	Granulo.	Autres caractéristiques physico-chimiques	Verr.	Fond.	Béton. spéc.	Batim s.l.	Electro-méta.	Autres
FRIEDRICH Sari	/	Hatten - Haggenau (67)	sable siliceux, localement extra-siliceux et colorés	/	alluvions fluviales Pliocène	étalée et grossière	CaCO ₃ et Fe ₂ O ₃ parfois élevés hygroscopie				+		
FULCHIRON Industrielle	/	Le Thieulin (28)	sable silico-argileux	/	marine Cénomaniens (sables du Perche)	étalée et grossière			=	=	+		
FULCHIRON Industrielle	/	Maise / Milly la forêt (91)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Stampien (Oligocène)	0 - 400 µm médiane 200 µm	indice AFS: 80/100	=	=	+	=		
FULCHIRON Industrielle	/	St Rémy Blanzly (02)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Bartonien (Eocène)	0 - 500 µm médiane > 160 µm	AFS: 55	=	+	=			
FULCHIRON Industrielle	/	Vallabrix (30)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Turonien	étalée et grossière		+	=	=	=		
GEA matériaux	/	Bagnols sur Cèze (30)	sables silico-argileux	/	marine épi-continentale Turonien	étalée et grossière					+		
QUARTZ D'ALSACE	/	Kaltenhouse (67)	sable siliceux, localement extra-siliceux et colorés	/	alluvions fluviales Pliocène	étalée et grossière	CaCO ₃ et Fe ₂ O ₃ parfois élevés hygroscopie	=				+	
KAOLIN D'ARVOR	Groupe LaSource	Ploemeur (56)	kaolin primaire	sable mica	altération (Trias à Actuel)	0 - 5 mm						+	
KAOLIN DU MORBIHAN	Groupe Mineral Harwanne	Ploemeur (56)	kaolin primaire	sable mica	altération (Trias à Actuel)	0 - 5 mm						+	
PREMIER REFRACTORIES INTERNATIONAL	Alpine	Busancais (36)	silice pulvérulente	/	marin Turonien inférieur	> 20 µm							réfractai. +

Mémento roches et minéraux industriels - La silice à usage industriel

Tabl. 7a - Principales caractéristiques des sites d'extraction de sables siliceux en France.

SOCIETE	GROUPE	SITES DE PRODUCTION	RESSOURCE EXPLOITEE	CO - PRODUIT	Origine et Age de la formation	Granulo.	Autres caractéristiques physico-chimiques	Verr.	Fond.	Béton. spéc.	Batim s.l.	Electr o-méta.	Autres
SAMIN	St Gobain	Baron (Beaulieu le neuf) (60)	sable siliceux, sable siliceux	/	marine épi-continentale Bartonien (Eocène)	0 - 500 µm médiane > 160 µm	indice AFS: 50/55 à 60/65			cf Moru-	Pontpoint		
SAMIN	St Gobain	Brasseuse (Ht Montel) (60)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Bartonien (Eocène)	0 - 500 µm médiane > 160 µm	indice AFS: 50/55 à 60/65	cf Moru-Pontpoint					
SAMIN	St Gobain	Buthiers / Boulancourt (77)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Stampien (Oligocène)	0 - 400 µm médiane 250 µm	indice AFS: 55 à 70	+	=		=		
SAMIN	St Gobain	La Chapelle la Reine (petite borne) (77)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Stampien (Oligocène)	0 - 400 µm médiane 250 µm	indice AFS: 55 à 70	cf Buthiers- Boulancourt (Roncevaux)					
SAMIN	St Gobain	Marcheprime (33)	sable siliceux	/	alluvions fluviales Pléistocène supérieur	0 à 2 mm médiane 160 µm	indice AFS : 27 à 50	+	=		=		(chimie) =
SAMIN	St Gobain	Moru - Pontpoint (60)	Usine de transformation	/				+			=		
SAMIN	St Gobain	Rozet St Albin (02)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Bartonien (Eocène)	0 - 500 µm médiane > 160 µm	indice AFS: 55 à 65	+					(chimie) =
SAMIN	St Gobain	Villeneuve sur Verberie (60)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Bartonien (Eocène)	0 - 500 µm médiane > 160 µm	indice AFS: 50 à 65	cf Moru-Pontpoint					
Sablères du Mont Ventoux (Perrier)	Nestlé	Bédoin / Crillon le Brave (84)	sable siliceux	/	marine épi-continentales Albo-Cénomaniennes	0 - 500 µm	13 à 14 % argile, peu Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ et CaO	+					
Sémanaz	/	St Aignan des Gués (45)	sable silico-argileux	/	alluvions fluviales quaternaires		0- 5 mm commercialisés				=		=

Tabl. 7b - Principales caractéristiques des sites d'extraction de sables siliceux en France.

SOCIETE	GROUPE	SITES DE PRODUCTION	RESSOURCE EXPLOITEE	CO - PRODUIT	Origine et Age de la formation	Granulo.	Autres caractéristiques physico-chimiques	Verr.	Fond.	Béton. spéc.	Batim. s.l.	Electr. o-méta.	Autres
SIFRACO	Sibelco	Bédoin (84)	sable siliceux, sable siliceux	/	marine épi-continentale Albo-Cénomane	0 - 500 µm 13-14 % argiles (sables bruts)	Fe ₂ O ₃ : 150 ppm TiO ₂ : < 300 ppm	+			+		+
SIFRACO	Sibelco	Belin - Beliet (33)	sable siliceux	/	alluvions fluviales Pléistocène inférieur	0 - 6 mm médiane 800 µm				+	=		filtration +
SIFRACO	Sibelco	Bourron Marlotte (77)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Stampien (Oligocène)	0 - 400 µm médiane 160 µm	Fe ₂ O ₃ : 250 ppm TiO ₂ : 400 ppm	+	+		+		export
SIFRACO	Sibelco	Brécyc (02)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Bartonien (Eocène)	0 - 500 µm médiane 200 µm	voir Montgru St hilaire	+	+		+		
SIFRACO	Sibelco	Chéry Chartreuse (02)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Bartonien (Eocène)	0 - 500 µm médiane 200 µm	en voie de fermeture	+	+		+		+
SIFRACO	Sibelco	Combiers (16)	sable siliceux	/	marine Santonien supérieur		non exploité	+	=				
SIFRACO	Sibelco	Compiègne (60)	Usine de transformation	/			farine de silice						
SIFRACO	Sibelco	Crépy en valois (60)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Bartonien (Eocène)	0 - 500 µm médiane > 200 µm	Fe ₂ O ₃ : 150 à 500 ppm TiO ₂ : 300 à 400 ppm	+	+		+		export
SIFRACO	Sibelco	Durance (47)	sable siliceux	/	alluvions fluviales Pléistocène supérieur	0 à 600 µm médiane 250 µm	Fe ₂ O ₃ : 300 à 400 ppm TiO ₂ : élevé	+	+		+		export Espagne
SIFRACO	Sibelco	Hanches (28)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Stampien (Oligocène)	0 - 200 µm médiane < 100 µm			+		+		
SIFRACO	Sibelco	Fismes (51)	Usine de transformation	/				cf Chéry-Chartreuse					
SIFRACO	Sibelco	Gallardon (28)	Usine de transformation	/				cf Hanches					
SIFRACO	Sibelco	Grisolles (02)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Bartonien (Eocène)	0 - 500 µm médiane 200 µm		+	+		+		+
SIFRACO	Sibelco	Hanches (28)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Stampien (Oligocène)	0 - 200 µm médiane < 100 µm			+		+		
G.S.I.	Sibelco	La Chapelle La Reine Amponville (77)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Stampien (Oligocène)	0 - 350 µm médiane: < 200 µm	Fe ₂ O ₃ : 100 à 150 ppm	+			+		+

Mémento roches et minéraux industriels - La silice à usage industriel

Tabl. 7c - Principales caractéristiques des sites d'extraction de sables siliceux en France.

SOCIETE	GROUPE	SITES DE PRODUCTION	RESSOURCE EXPLOITEE	CO - PRODUIT	Origine et Age de la formation	Granulo.	Autres caractéristiques physico-chimiques	Verr.	Fond.	Béton. spéc.	Batim s.l.	Electr o-méta.	Autres
SIFRACO	Sibelco	La Croix sur Ourcq (02)	sable siliceux, sable siliceux	/	marine épi-continentale Bartonien (Eocène)	0 - 500 µm médiane 200 µm	Fe ₂ O ₃ : 150 à 200 ppm	+	+		+		+
SIFRACO	Sibelco	Larchant (77)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Stampien (Oligocène)	0 - 300 µm médiane: 180 µm	Fe ₂ O ₃ : 200 à 250 ppm TiO ₂ : 200 à 350 ppm	+			+		+
SIFRACO	Sibelco	Latilly (02)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Bartonien (Eocène)	0 - 500 µm médiane 200 µm	Fe ₂ O ₃ : 150 à 250 ppm TiO ₂ : 300 à 400 ppm	+	+	+	+		
SIFRACO	Sibelco	Meilhan (40)	sable siliceux	/	alluvions fluviatiles Pléistocène		non exploité	+			+		+
SIFRACO	Sibelco	Mios / Le Barp (33)	sable siliceux	/	alluvions fluviatiles Pléistocène supérieur	0 à 1,5 mm médiane 280 µm	Fe ₂ O ₃ : 100 à 350 ppm TiO ₂ : 180 à 300 ppm	+			+		+
SIFRACO	Sibelco	Montgru St Hilaire (02)	usine de transformation	/				+	+		+		+
SIFRACO	Sibelco	Ormesson (77)	sable siliceux	quartzite	marine épi-continentale Stampien (Oligocène)	0 - 400 µm médiane: 200 à 250 µm	AFA: 75 à 100	+			+		+
SIFRACO	Sibelco	St Césaire (17)	sable siliceux	/	marine Coniacien inférieur			+	=				
SIFRACO	Sibelco	Trumilly (60)	sable siliceux	/	marine épi-continentale Bartonien (Eocène)	0 - 500 µm médiane > 160 µm		+	+		+		+
SIKA S.A.	Groupe LaSource	Hostun (26)	sable kaolinique	kaolin	fluviatile Eocène	étalée: 0 - 5 mm	Al ₂ O ₃ et K ₂ O variables	+			+		
SILICE ET KAOLIN	/	Barbières (26)	sable kaolinique	kaolin	fluviatile Eocène	étalée: 0 - 5 mm	Al ₂ O ₃ et K ₂ O variables				+		
SIPOREX - HEBEL	/	Tresques (30)	sable siliceux à silico-argileux	/	marine épi-continentale Turonien	étalée et grossière				+			
Société Nouvelle du Littoral	/	Leucate (11)	sable siliceux de plage	/	dépôt littoral actuel	0 - 2 mm							+

Mémento roches et minéraux industriels - La silice à usage industriel

Tabl. 7d - Principales caractéristiques des sites d'extraction de sables siliceux France.

2.3.2. La silice en blocs ou en roches massives

La production française est réalisée sur un nombre limité de sites.

	Production (kt, est. 1996)	Nombre de sites de production	Départements concernés
quartz filonien	32	2	86
quartzite	250	3	03 30 38
galets de quartz	200/240	4	24 46
galets de silex	90	5 sociétés sur le site de Cayeux-sur-mer	80

Tabl. 8 - Production de silice en roche massive en France.

La société D.A.M. occupe la deuxième place en Europe après le groupe espagnol ERIMSA pour la production de galets de quartz destinés à l'électro-métallurgie, elle assure également la commercialisation de quartzites de Fontainebleau pour ce même secteur.

La société Q.P.B. avec une production de l'ordre de 30 000 t par an est le principal fournisseur de quartz destiné à l'industrie en France.

Enfin, les galets de silex ne sont exploités qu'à Cayeux-sur-Mer dans la Somme, sous le nom de galets de mer. La société Silmer est le principal acteur du secteur.

Les caractéristiques des sites d'extraction de silice en roche massive en France sont présentés dans le tableau 9.

SOCIETE	GROUPE	SITES DE PRODUCTION	RESSOURCE EXPLOITEE	CO - PRODUIT	Origine et Age de la formation	Production (kt) 1996	UTILISATIONS						REMARQUES
							Verr.	Fond.	Bâti.	Electro-métall.	Refr.	Autres	
CLARAZ - EYNARD (Jean Lefèvre)	Suez Lyonnaise des eaux	St Marcel / Modane (73)	quartzites	/	détritique Trias	quartzites: 70			100%				
C.M. QUARTZ	/	St Denis Catus (46)	galets de quartz	sables et argile	détritique Oligocène	Galets: 40 sable: 70 argile: 12			60%	40%			
DENAIN ANZIN MINERAUX	Groupe Minéral Harwanne	St Jean de Côte (24)	galets de quartz	sables et argile	détritique Oligocène	Galets: 120 sable: 265 argile: 125			70%	30%			
GSM Galets de mer Français	Italcementi	Cayeux sur mer (80)	galets de plage	sables et graviers	détritique Quaternaire à Actuel	galets: 20 (est)			100%				3 autres sociétés exploitent des galets surtout pour le BTP
QUARTZ DE PIERRE BLANCHE	/	La Chapelle Agnon (63)	quartz filonien	/	primaire	30			70%	30%			
QUARTZITES DE MEILLERS	Groupe Cerf	Meillers (03)	Quartzite	/	silicification épithermale	80			60%	40%			
MAUSSET	/	Magnac Laval (87)	Quartz filonien	/	primaire	< 2						opti. cera. 100 %	
SABLES ET GRAVIERS DU PERIGORD	/	St Front d'Alemps (24)	galets de quartz	sables	détritique Oligocène	galets: 20 sables: 50			70%	30%			3 sites d'extraction
SILMER	Groupe Gagneraud	Cayeux sur mer (80)	galets de plage	sables et graviers	détritique Quaternaire à actuel	galets: 70			70%			30%	3 autres sociétés exploitent des galets surtout pour le BTP
SPIR	Groupe Pechiney	St Victor des Oules La Capelle et Masmolène (30)	quartzites	/	détritique Albien Cénomanién	100				100%			2 sites d'extraction

Tabl. 9 - Principales caractéristiques des sites d'extraction de silice en roche massive en France.

3. Réserves

3.1. LES SABLES SILICEUX

Les réserves disponibles au niveau mondial sont géologiquement abondantes mais peuvent difficilement être chiffrées. Au niveau européen, les statistiques de production ne rendent pas compte de la diversité des qualités produites suivant les régions. Ainsi, les sables chimiquement les plus purs présentant les plus basses teneurs en fer et titane donc les plus recherchés, sont surtout localisés en Belgique (bassin de Mol) et en France (région parisienne). Dans ces deux zones, les ressources géologiques sont abondantes. Cependant, la prise en compte des contraintes économiques, minières ou d'impact environnemental, limite leur accès.

Devant la nécessité de maintenir les approvisionnements, l'article 109 du code minier français prévoit la définition de périmètres réservés à l'exploitation. Une telle zone a notamment été définie à l'ouest de Nemours (sables de Fontainebleau) par décret ministériel du 10 mai 1966 (cf. Schéma Départemental des Carrières de Seine-et-Marne).

3.2. LA SILICE EN BLOCS OU EN ROCHE MASSIVE

Il n'existe aucun inventaire tant au niveau mondial qu'au niveau européen ou national pour une ressource très spécifique compte tenu des qualités requises par les industries utilisatrices.

Les ressources géologiques doivent cependant être considérées, au niveau européen comme limitées. Elles sont localisées plus particulièrement dans certains pays, notamment l'Espagne, la France, les pays d'Europe du Nord.

4. Répartition de la consommation par secteurs d'utilisations

Dans la mesure où elle reflète le niveau d'industrialisation et le type d'appareil productif, elle peut notablement varier d'un pays à un autre.

4.1. LES SABLES SILICEUX

En France, pour une consommation apparente estimée à 6,1 Mt en 1996, la ventilation était la suivante (communication orale producteurs):

- verrerie	49 %
- fonderie	15 %
- bâtiment, produits spéciaux	15 %
- ciments et bétons (adjuvants)	13 %
- autres : (abrasifs, filtration, chimie, céramique..)	7,1 %

Il faut souligner que certaines utilisations bien que prestigieuses ne font intervenir que des quantités limitées d'une ressource qui, si elle est à fort coût unitaire, ne représente qu'un enjeu limité en terme économique. Le quartz à faible teneur en fer (< 5 ppm) utilisé en optique représente en France une consommation qui ne dépasse pas 3000 t soit un chiffre d'affaires inférieur à 5 millions de francs à comparer au chiffre d'affaires total des sables siliceux en France qui est supérieur à 700 millions de francs hors taxe.

En Espagne, la répartition était la suivante en 1996 (source : Industrial Minéraux) pour une consommation estimée à 2,1 Mt.

- verrerie	48 %
- fonderie	23 %
- bâtiment	10 %
- abrasifs	8 %
- fracturation hydraulique	6 %
- chimie	3 %
- filtration	2 %

En Indonésie, pour l'année 1996, la revue Industrial Minerals estimait la consommation à 2 Mt qui se répartissaient de la façon suivante :

- ciments (adjuvants)	75 %
- verrerie	22 %
- autres	3 %

4.2. LA SILICE EN BLOCS OU EN ROCHE MASSIVE

En France, d'après l'enquête réalisée, la consommation se répartit de la façon suivante :

	Consommation (kt est. 1996)	Electro- métallurgie	Chimie	Bâtiment	Divers
quartz filonien	35	50 %		45 %	5 % (optique)
quartzite	300	60 %	10 %	30 %	
galets de quartz	300	70 %		30 %	
galets de silex	100			70 %	30 %

Tabl. 10 - Répartition de la consommation française de silice en roche massive.

5. Les flux commerciaux

Les échanges sont surtout réalisés, pour les plus gros volumes, à l'intérieur des principales zones économiques : Amérique du Nord, Pacifique ou Europe.

Dans la mesure où le prix rendu en Italie d'un sable extra-siliceux français est représenté pour les 2/3 par les frais de transport, on comprendra que ces derniers puissent devenir prohibitifs pour une ressource à faible coût unitaire.

Les flux commerciaux inter-zones ne concernent donc, le plus souvent, que des matières premières très pures dont les coûts unitaires élevés justifient le transport.

5.1. LES SABLES SILICEUX

5.1.1. Au niveau européen (source E.M.Y. éd. 1997)

Les échanges restent massivement intra-communautaires, ces derniers représentent en effet 90 % des exportations sur un total estimé à 6 043 940 t en 1995 et 94,5 % des importations estimées à 7 192 810 t pour la même année.

Six pays assurent à eux seuls 91,7 % des exportations de l'Europe des Quinze vers l'extérieur sur un total estimé à 613 000 t. Ce sont la Belgique (50,3 %), la France (18,1 %), l'Allemagne (12,3 %), la Hollande (6,4 %), l'Angleterre (6,2 %) et l'Espagne (4,6 %).

Le déficit en ressources de l'Europe du Sud se traduit notamment par le poids des importations italiennes et grecques en provenance de l'extérieur de la zone :

- l'Italie 41,4%
- la Grèce 11,4 %.

L'Allemagne demeure un importateur important avec 29,4 % d'un total estimé à 399 350 t.

Les principaux pays exportateurs vers la C.E.E sont l'Egypte et la Tchéquie qui ont assuré 75,4 % des approvisionnements extra-communautaires sur un total estimé en 1995 à 399 350 t.

La consommation apparente de la C.E.E. en 1995 est estimée à 57 556 000 t, pour une valeur en Euro qui peut être estimée à 921 millions.

5.1.2. Au niveau français

La France est exportatrice nette avec en 1996 un solde de 464 kt (source S.N.P.S.I.). Les 630 000 t importées proviennent majoritairement de Belgique (560 kt), tandis que les exportations sont destinées à l'Italie (599 kt), l'Allemagne (193 kt), la Suisse (11 kt) et la Belgique 98 kt (source : statistiques douanières).

5.2. LA SILICE EN BLOCS OU EN ROCHE MASSIVE

Nous ne disposons pas de données fiables sur les échanges.

6. Etat actuel et évolution de la demande

6.1. LES SABLES SILICEUX

C'est l'évolution des principaux secteurs consommateurs, surtout quand ils sont caractérisés par une production de masse, qui va conditionner la demande. Nous envisagerons donc brièvement l'évolution prévisible de ces secteurs.

L'industrie du verre, destine 80 % de ses ventes à des secteurs qui, parce qu'ils évoluent différemment, rendent cette industrie moins sensible à la conjoncture économique. Les ventes se répartissent, en effet, à hauteur de 25 % pour le secteur des produits alimentaires et de la boisson, 15 % pour celui de la construction et 60 % pour l'automobile (l'industrie céramique et verrière).

La production française augmente globalement depuis 1994 malgré un fléchissement en 1996. Pour 1997, la production, verre à main exclu, a été de 5 2663 797 t soit une augmentation de 5 % par rapport à l'année précédente pour un chiffre d'affaires hors taxes de 27,3 milliards de francs. En volume, la production française représente 20 % de la production de l'Europe des Quinze. Le solde en valeur des échanges commerciaux français reste largement excédentaire et s'élève en 1997 à 5,7 milliards de francs.

Cependant, malgré la bonne orientation de l'industrie du verre, la demande en silice naturelle va être contrastée suivant les secteurs puisque la part du recyclage est de plus en plus importante dans le verre creux alors qu'elle est réduite pour le moment dans le verre plat qui bénéficie, en plus, d'une utilisation accrue dans le secteur automobile (doublement des surfaces vitrées en trente ans). La demande ne devrait donc pas dépasser les niveaux actuels évalués à 3,7 Mt.

Dans le domaine de la fonderie, la demande en sable siliceux devrait baisser régulièrement, passant de 800 000 t en France en 1996 à 500 000 t d'ici 10 ans (communication orale C.T.I.F.) compte tenu de l'importante part prise par le recyclage. La demande dans le bâtiment devrait reprendre après les bas niveaux enregistrés au cours des dernières années.

6.2. LA SILICE EN BLOCS OU EN ROCHE MASSIVE

Enfin, pour la silice en roche massive, le principal secteur consommateur, l'électro-metallurgie, après plusieurs années de stagnation devrait voir sa demande augmenter. Le silicium métal constitue le marché le plus dynamique, en raison de son utilisation dans les domaines de la chimie (silicones) et de la métallurgie. La production annuelle mondiale de silicium métal est évaluée en 1996 à 800 000 t réparties de la façon suivante :

- 400 000 t alliages légers ;
- 354 000 t silicones ;

- 30 000 t réfractaires ;
- 16 000 t électronique.

La croissance de la demande de silicium dans ces différents secteurs est estimée à 5 % pour les silicones, 3 % pour la métallurgie. Le secteur de l'électronique correspond à un marché étroit en pleine mutation en raison des nombreuses évolutions technologiques en cours : concurrence de l'arséniure de gallium notamment ; dans ce secteur, la part de marché du silicium est de 89 % et devrait se maintenir à 84 % d'ici l'an 2005 d'après les analystes. Malgré sa forte progression, la demande de silicium pour l'électronique ne devrait pas dépasser 24 000 t à l'horizon 2000.

En France, compte tenu de cette évolution prévisible du marché et des augmentations de capacités de production de silicium programmées, l'approvisionnement en ressources de haute pureté devrait croître de 15 à 20 % d'ici l'an 2000.

7. Les prix

Le large spectre des spécifications rend difficile une information sur les prix, les qualités s'étalant des sables siliceux pour les produits spéciaux du bâtiment, aux quartz ultra-purs broyés pour les verres techniques.

Des prix indicatifs sortie usine sont les suivants (hors taxes) (source enquête auprès des producteurs, Industrial Minerals) année 1997 :

- sable destiné au bâtiment, criblé avec une teneur en fer >800 ppm : 50 F/t (France) ;
- sable de fonderie sec, en vrac : 110 F/t (U.K.) ;
- sable pour verre creux en conteneur : 160 F/t (U.K.) ;
- sable ultra pur ($\text{Fe}_2\text{O}_3 = 100$ ppm) séché : 120 à 170 F/t (France) ;
- quartz pur broyé pour optique (10 ppm Fe_2O_3) : 1 200 à 1 500 F/t (provenance France) ;
- quartz pur broyé pour céramique (50 ppm Fe_2O_3) : 600 à 700 F/t (provenance France) ;
- quartz ultra-pur broyé pour verre technique : 2500 F/kg (provenance Etats-Unis) ;
- galets de quartz pour électro-métallurgie : 110 F/t (provenance France) ;
- farine de silice : 600 à 700 F/t (France).

8. Géologie

8.1. ELEMENTS DE GITOLOGIE

Les roches siliceuses pouvant constituer une ressource se rencontrent :

- **soit dans des gîtes primaires (filons) où la silice a été mise en place à partir de solutions hydrothermales** : pour présenter un intérêt en tant que ressource en silice, ces filons doivent être "stériles" c'est-à-dire ne présenter ni minéralisation polymétallique associée, ni contamination supergène.

Il ne doit pas y avoir, en particulier, de venue hydrothermale polyphasée qui risquerait d'élargir le spectre minéralogique et partant d'induire la présence d'éléments pénalisants pour les industries consommatrices.

De la même manière, les altérations supergènes, le plus souvent liées aux eaux météoriques doivent être limitées dans la mesure où elles entraînent des dépôts d'oxyde de fer, parfois sur des profondeurs importantes. Dans la plupart des cas, les réserves minières donc valorisables ne constitueront qu'une partie des réserves disponibles.

La plupart des gisements exploités présentent les caractéristiques suivantes :

- une mise en place dans des roches massives très compétentes, quartzites, gneiss, leptynites ;
- une association fréquente avec des pegmatites, le quartz pur exploitable dans un tel contexte, correspondant le plus souvent aux stades ultimes de la "minéralisation" ;
- une absence de rejeu majeur de l'accident ayant contrôlé la mise en place du filon pour éviter bréchification et percolation des eaux météoriques.
- **soit dans des gîtes d'altération** : il s'agit des gisements de kaolin provenant de l'altération in situ de granites, le quartz est alors un sous-produit dont la qualité chimique ne permet le plus souvent qu'une valorisation dans le secteur du bâtiment.
- **soit dans des gîtes détritiques (sables et quartzites) où la richesse en quartz des roches constitue une véritable concentration résiduelle à l'issue des phases d'altération, de tri et de remobilisation, incluant souvent des processus éoliens.**

Les grains de quartz proviennent de roches mères diverses : ignées, métamorphiques, voir sédimentaires.

Les conditions qui doivent être réunies sont donc :

- une altération continentale importante qui puisse alimenter la sédimentation ;
- une maturation des dépôts au cours des phases de transports fluviaux et marins aboutissant à une sélection des minéraux les plus résistants ;

- une permanence de ces phénomènes permettant l'existence de dépôts suffisamment puissants où les intercalations terrigènes sont les plus réduites possibles ;
- un "enrichissement résiduel" postérieur au dépôt qui explique souvent la pureté chimique des roches exploitées : tri éolien, lessivage de la glauconie en liaison avec des phénomènes pédogénétiques (sables du bassin de Mormoiron dans le Vaucluse).

Le contexte paléogéographique le plus favorable est celui des dépôts épi-continentaux donc localisés en bordures de bassin : dépôts marins, le plus souvent de faible profondeur, dépôts littoraux, dépôts fluviaux à deltaïques.

Les quartzites résultent de la cimentation ou de la recristallisation de ces sables. Cette consolidation diagénétique peut être liée à des processus supergènes (circulation des eaux météoriques, zone de battement de nappes phréatiques), ou due au métamorphisme. Elle sera donc très variable suivant les types de roche, voire même à l'intérieur d'une même formation dans le cas de phénomènes supergènes.

Le cortège minéralogique accompagnant le quartz dans ces sables doit être le plus réduit possible, il inclut en général :

- des minéraux à teneurs élevées en Al_2O_3 et K_2O :
 - . feldspath (pour les dépôts les moins évolués),
 - . minéraux argileux : kaolinite, illite qui témoignent le plus souvent, de la pédogénèse intense développée sur le continent,
 - . mica : muscovite, séricite ;
- des minéraux à teneur élevée en Fe_2O_3 , TiO_2 :
 - . mica : glauconie (Fe),
 - . minéraux "lourds" ($d > 2,87$) comme le zircon (Zr), le rutile (Fe, Ti), la chromite (Cr) voire les oxydes de fer (magnétite, goéthite), la nature et la quantité de ces derniers reflétant en partie la nature de la "roche mère".

En France, 80 % des volumes de sables extraits proviennent de dépôts marins épi-continentaux localisés en région parisienne, Eure-et-Loir, Vaucluse et Charentes. Les dépôts fluviaux rencontrés en Aquitaine, Alsace et dans la Drôme ne représentent que 18,6 % des volumes exploités, tandis que les gisements d'altération liés aux granites représentent moins de 1,4 % des volumes extraits.

En France, dans le domaine des roches massives, quartzites et galets de quartz assurent respectivement 38 % des approvisionnements tandis que les galets de silex représentent 18 % et le quartz seulement 7 %.

Les principales caractéristiques des sites d'extraction français ainsi que les utilisations auxquelles sont destinées les ressources sont présentées dans les tableaux 7 (a à d).

Nous décrirons succinctement quelques exemples de gisements français en insistant sur leurs spécificités.

• **Les sables dits "de Beauchamp" (- 40 à - 37 Ma) du nord de la région parisienne**

Ils s'étendent au sud de l'Oise et de l'Aisne, entre Senlis et Reims soit sur près de 100 km. Ils sont d'âge bartonien inférieur et doivent être considérés au sens large, dans la mesure où ils comprennent également les sables d'Auvers sous-jacents et parfois même l'ensemble des sables bartoniens.

Le dépôt sableux s'est effectué au fond d'une mer peu profonde balayée par les vagues, à proximité d'un littoral comprenant des affleurements rocheux mais aussi des zones basses où s'étaient des lagunes continentales à sédimentation carbonatée et faune d'eaux dessalées. Cette disposition paléogéographique explique les caractéristiques variables d'un gisement à l'autre mais aussi le cortège minéralogique représenté par des carbonates, des minéraux argileux et quelques minéraux lourds (0,3 %). Les sables sont fins avec une médiane souvent supérieure à 160 μm .

Les sables de Beauchamp sont blancs, parfois jaunâtres lorsqu'ils ont été contaminés lors du battement de la nappe phréatique au Quaternaire. Ils peuvent comporter des niveaux humifères localement grésifiés, exceptionnellement ligniteux, correspondant à des paléosols formés au cours de l'émersion post-auversienne.

Les exploitations sélectionnent des qualités destinées à la verrerie ou la fonderie, la puissance exploitable pouvant atteindre 15 à 40 m pour une découverte de 20 m constituée le plus souvent de marnes calcaires.

• **Les sables de Fontainebleau (- 35 à - 30 Ma) au sud de la région parisienne**

Ils sont d'âge stampien et sont plus particulièrement exploités dans la région de Nemours ce qui justifie souvent leur appellation sous le terme de "sables de Nemours".

Ces sables s'étendent au sud du département de la Seine-et-Marne, de part et d'autre de la vallée du Loing, dans l'Essonne et en partie dans l'Eure-et-Loir; soit sur près de 50 km entre Nemours à l'est et Etampes et Dourdan, à l'ouest. Ils disparaissent à l'ouest et au sud sous la masse des calcaires constituant la surface structurale de la plaine de Beauce et reposent sur les marnes à huîtres et les argiles et calcaires de Brie du Stampien inférieur. Leur puissance totale dépasse rarement 60 m, épaisseurs observées dans la région de Nemours.

Ils se sont déposés dans un environnement marin de faible profondeur lors de la progradation vers l'est de la mer stampienne. Les remaniements éoliens subis par ces sables, après leur mise en place, sous climat semi-désertique expliquent leur extrême pureté. Cette pureté a ultérieurement pu être préservée des altérations supergènes par la présence des formations indurées qui les couronnent : calcaires d'Etampes, meulière de Montmorency ou sables indurés (grès de Fontainebleau).

Ces grès quartzites peuvent avoir une puissance totale de 6 m et se présentent en plusieurs bancs de 3 m maximum. Ils correspondent à une consolidation supergène, donc tardive, des sables sous-jacents, en liaison avec les nappes phréatiques : soit

battement de la nappe aquifère du Stampien ou écoulement de nappe au fur et à mesure de l'enfoncement des vallées. Leur pureté est comparable à celle des sables. Ils présentent cependant une cohésion hétérogène.

Les sables de Fontainebleau se caractérisent par une granulométrie comprise entre 0 et 400 μm et une médiane souvent inférieure à 160 μm . Ils sont donc fins à très fins et surtout utilisés en verrerie, en particulier pour les verres techniques. Dans ce domaine de haute technologie, les exploitations approvisionnent des sites industriels pour beaucoup situés dans cette partie de l'Ile-de-France.

Ils sont exploités sur des puissances de 20 à 30 m sous un recouvrement induré qui peut parfois atteindre 15 m.

Nous avons regroupé dans le tableau 11 les principaux éléments de comparaison entre les gisements de Beauchamp et Fontainebleau. Les analyses chimiques qui y figurent doivent être considérées comme indicatives.

Il ressort de cette comparaison que les sables de Fontainebleau ont un avantage en terme de pureté chimique avant lavage et traitement. Ils peuvent cependant localement contenir de la glauconie. Leur granulométrie est en général plus fine que celle des sables de Beauchamp.

• Les galets de quartz du Périgord

Ce sont des dépôts fluviatiles tertiaires d'âge oligocène (- 25 Ma). Ils correspondent à des remplissages de paléovallées érodant un substratum calcaire souvent karstifié (les phénomènes de karstification se sont poursuivis postérieurement au dépôt).

Les dépôts se caractérisent par de brusques variations latérales puisque leur épaisseur reflète aussi bien le mode de chenalisation (rivière en tresse) que la paléotopographie du substratum et les karstifications. Le long de la vallée de l'Isle, ces formations forment une bande de près de 60 km de long et 40 km de large.

Les alluvions sont meubles et constituées de galets de quartz pouvant atteindre 20 cm emballés dans une matrice argilo-sableuse brune. Au quartz, peuvent également être associés d'autres lithofaciès : quartzites, galets mous d'argile, calcaires silicifiés.

La principale exploitation est située à Saint-Jean-de-Côle au lieu-dit Boudeau (société D.A.M.), à environ 20 km au nord de Périgueux.

Les zones préférentiellement exploitables sont les "terrasses" dites basses qui présentent la plus forte densité de chenaux à galets. Dans ces zones, la proportion de galets est très variable, elle varie de 15 à 20 % . Les puissances exploitables peuvent atteindre 50 m, mais l'extension latérale peut être importante (> 500 m). Un tri manuel est nécessaire afin d'éliminer les lithofaciès autres que le quartz et augmenter ainsi la qualité du produit (augmentation de la teneur en silice des lots marchands mais aussi élimination

	SABLES AUVERSIENS s.l. (BEAUCHAMP)		SABLES DE FONTAINEBLEAU (NEMOURS)	
Age	Bartonien (Eocène) - 40 à - 37 Ma		Stampien (Oligocène) - 35 à - 30 Ma	
origine	marine à épicontinentale affectée par pédogénèse suite à émerision fin Bartonienne		marine, Affectée par pédogénèse intense suite à émersion fin Stampienne, tri éolien important.	
sites d'extraction : localisation et nombre	Aisne: 8, Oise: 4		Seine et Marne: 11 Essonne : 2	
part de la production nationale	35%		25%	
Puissance exploitable	15 à 40 m		20 à 30 m peut atteindre 55 m	
Découverte	jusqu'à 20 m : marnes calcaires et calcaires marnaux		jusqu'à 15 m: meulière de Montmorency, calcaires d'Etampes ou grès, donc formations indurées	
Homogénéité	fortes hétérogénéités: modifications importantes d'un gîte à l'autre		formations relativement homogènes entre Etampes et Fontainebleau	
Granulométrie	sables fins: granulo comprise entre 0 - 500 µm, médiane > 160 µm sables en général plus grossiers et moins riches en fines que les sables de Fontainebleau		sables fins à très fins, bien classés, granulométrie comprise entre 0 et 400 µm médiane souvent < 160 µm à la base des formations exploitées	
Minéraux lourds	peuvent atteindre 0,3% en poids : tourmaline, zircon, rutile, anatase, andalousite, disthène et staurotide		par ordre d'importance décroissante: tourmaline, zircon, rutile. Le disthène et la staurotide sont rares	
Autres minéraux	feldspaths rares, glauconie fréquente, carbonates parfois abondants oxydes de fer et de manganèse		oxydes de fer: goethite, limonite oxydes de manganèse muscovite, glauconie parfois abondante; en général plus abondante que dans les faciès Auversiens	
Minéralogie des fines (< 40 µm)	argiles: illite et montmorillonite, peu de kaolinite carbonates localement abondants		argiles: kaolinite prédominante carbonates inexistantes	
Chimie (composition moyenne)	sable brut	sable lavé	sable brut	sable lavé
SiO ₂	99,1	99,7	99,6	99,7 à 99,85
Fe ₂ O ₃	0,05	0,02	0,03	0,012 à 0,013
Al ₂ O ₃	0,46	0,15	0,46	0,05 à 0,1
CaO	0,04		0,01	< 0,015
MgO	0,03		0,03	
Na ₂ O	0,07		0,09	
Ti O ₂	0,03	0,02	0,009 à 0,025	

source : SNPSI, données producteurs, BRGM

Tabl. 11 - Principaux éléments de comparaison entre les sables de Beauchamp et les sables de Fontainebleau.

d'éléments pénalisants) tout en maintenant sa régularité (communication orale producteur).

• Filons de quartz

Seuls deux filons de quartz fournissent une ressource pour l'industrie (fig. 3). Le gisement de la Chapelle-Agnon situé dans le département du Puy-de-Dôme, à environ 45 km à l'est de Clermont-Ferrand est de loin le plus important.

Il se présente sous la forme d'une lentille de quartz encaissée dans les granites hercyniens à biotite et cordiérite du groupe Livradois. Le filon est long de 250 m pour une puissance de 50 à 60 m. Il a été reconnu sur une profondeur de 50 m. Au filon, sont associées des lentilles feldspathiques. La présence de ces lentilles, jointes à des contaminations par l'encaissant, impose une sélectivité importante dès l'abattage pour éviter des teneurs élevées en Al_2O_3 , K_2O voire Fe_2O_3 .

8.2. EXPLORATION DES GISEMENTS ET CARACTERISATION DES MATERIAUX

En ce qui concerne les sables siliceux, les méthodes de prospection des gisements et de caractérisation des matériaux les plus courantes sont les suivantes (Berton et Le Berre, 1983) :

• Phases préliminaires

- Etude géomorphologique (cartes, photos aériennes) : localisation des zones où les sables sont affleurants ou subaffleurants.
- Recherche des affleurements sur le terrain et échantillonnage des matériaux, en surface ou à faible profondeur (sondages à la tarière à main ou à moteur), pour les sables situés hors nappe phréatique. Les échantillons les plus superficiels sont souvent pollués.
- Caractérisation des matériaux :
- Etude de la granularité : détermination de la courbe granulométrique et de l'indice de finesse (tabl. 16).

L'indice de finesse est un nombre conventionnel égal à la somme des refus sur différents tamis multipliée par un coefficient et divisée par 100. Les tamis sont généralement ceux de la série AFS (American Foundrymen's Society), mais les tamis AFNOR de dimension correspondante peuvent également être utilisés. La valeur obtenue pour l'indice de finesse représente le numéro du tamis fictif qui laisse passer un sable moyen équivalent au sable analysé. Un exemple de calcul de l'indice de finesse d'un sable est donné dans le tableau 12. Le terme d'indice AFA équivalent à l'indice AFS n'est plus utilisé.

N° de tamis	Refus	Refus corrigé (R)	Coefficient	Produit (P)
6			3	
12	0,38	0,38	5	1,90
20	0,14	0,14	10	1,40
30	0,30	0,30	20	6,00
40	1,40	1,40	30	42,00
50	5,49	5,49	40	219,60
70	22,20	22,20	50	1 110,00
100	34,86	34,93	70	2 445,10
140	9,02	9,02	100	902,00
200	3,38	3,38	140	473,20
270	0,54	0,54	200	108,00
Fines	0,22	0,22	300	66,00
Total	77,93	78,00		5 375,20
	(M ₁)	M ₁		

Indice de finesse AFS $\frac{(P)}{R} : \frac{5\,375,20}{78,00} = 68,9$ arrondi à 69

Soit : M la masse du prélèvement séché 100 g
M₁ la masse résiduelle après lavage et séchage 78 g
M₁ = M - M₁ = teneur en éléments de moins de 20 μ 22 g
L'indice de finesse est calculé à partir des refus au tamisage sur les différents tamis de la série.

(R) La somme des refus doit correspondre à la masse du sable initial avec une tolérance de ± 0,3 %. L'écart conforme à cette tolérance (M₁ - M₁) est reporté sur le tamis le plus chargé (ou par moitié sur chacun des deux tamis les plus chargés si ceux-ci accusent des refus égaux à 10 % près).

Source : Centre Technique des Industries de la Fonderie (1971).

Tabl. 12 - Exemple de calcul de l'indice de finesse AFS d'un sable.

- Etude minéralogique : examen à la loupe binoculaire, séparation des minéraux lourds par liqueurs denses.
- Calcimétrie et calci-dolomimétrie si nécessaire sur quelques échantillons.
- Analyses chimiques :
 - . détermination des teneurs en SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, CaO, MgO, Na₂O, K₂O et de la perte au feu sur quelques échantillons de sables lavés ;
 - . dosage systématique de Fe₂O₃ ;
 - . analyse des oxydes métalliques en traces sur quelques échantillons.
- Etude de gisement
 - Cartographie géologique détaillée.

- Etude du recouvrement : par procédés géophysiques (résistivité), éventuellement à la tarière (maille : 1 trou/ha) ou par sondages au wagon-drill si le recouvrement est constitué de roches massives.
- Sondage des niveaux sableux :
 - à la tarière, avec mise en place de tubage pour éviter les contaminations latérales ;
 - sondages percutants dans les grès ;
 - sondages au jet d'eau avec tubage dans les formations aquifères, etc.
- Echantillonnage des matériaux : les matériaux prélevés en sondages doivent être séchés, et éventuellement débarrassés des particules métalliques qui auraient pu être introduites lors du sondage.
- Essais sur les matériaux :
 - granulométrie, par tranches de terrain de 2 ou 3 m ;
 - analyses chimiques (comme pour les phases préliminaires).
- Prélèvement d'un échantillon de 500 kg à plusieurs tonnes, pour essais de purification en atelier pilote (sables pour verrerie) :
 - attrition : élimination des argiles et éventuellement des oxydes de fer présents à la surface des grains de quartz ;
 - séparation magnétique des minéraux lourds.

8.3. ELEMENTS D'APPRECIATION DES GISEMENTS DE SABLES SILICEUX ET DE SILICE EN ROCHE MASSIVE

Rappelons qu'une ressource est définie comme un objet géologique pouvant constituer une source d'approvisionnement avant toute contrainte minière, économique ou réglementaire. Après son identification, elle devra donc être caractérisée et évaluée, préalable à toute étude de faisabilité technique et économique. Les critères économiques à prendre en compte sont non seulement l'amortissement des investissements mais aussi l'approvisionnement des marchés auxquels est destinée la ressource.

Enfin, sur le plan réglementaire, soulignons que le projet d'ouverture d'une carrière est soumis en France à la réalisation d'une enquête publique relative aux incidences éventuelles du projet dans le cadre de la loi 76-603 du 19 Juillet 1976 relative aux installations classées. Obligation est donc faite de réaliser une étude d'impact sur l'environnement. Dans le cadre de cette dernière procédure, sont consultés non seulement les conseils municipaux concernés mais aussi la commission départementale des carrières mise en place par la loi Saumade du 4 janvier 1993.

La taille des gisements de sable siliceux peut être très variable : les réserves prouvées sont de l'ordre de 250 000 m³ pour une petite exploitation et de l'ordre de 20 Mm³ pour

une exploitation importante (Berton et Le Berre, 1983). Cependant, compte tenu des contraintes économiques, la prospection doit être orientée vers des gisements dont les réserves minimales permettront d'approvisionner les unités de traitement pendant un minimum de 20 ans, soit pour une production moyenne de 200 000 t/an un minimum de 2 Mm³.

Les chiffres sont comparables pour les galets de quartz et les quartzites. Pour les filons de quartz, les réserves minimales peuvent se limiter à 300 000 m³ de réserves minières.

Nous envisagerons plus particulièrement ci-après les critères liés aux conditions de gisement et aux caractéristiques des sables siliceux.

Les sables siliceux sont toujours exploités à ciel ouvert. L'épaisseur des niveaux sableux exploitables est variable selon le type de gisement et la qualité des matériaux. Elle est au minimum de 2 m, ordinairement de 10 à 50 m dans le bassin de Paris. Dans le cas des sables extra-siliceux, la découverte tolérée peut atteindre 15 ou 20 m. Le rapport entre l'épaisseur de la découverte et l'épaisseur du niveau exploitable est habituellement faible ($D = 1/3$), très comparable aux valeurs admises pour les granulats ou les matériaux pour ciment. Il peut être de 1 pour les sables extra-siliceux et de 1/2 pour les sables silico-argileux.

D'autre part, il convient de rechercher des gisements dont l'homogénéité est optimale en ce qui concerne les caractéristiques granulométriques et chimiques des sables.

Certains facteurs peuvent en effet limiter l'exploitation d'un gisement, voire stériliser totalement une ressource potentielle parce qu'ils imposent une sélectivité incompatible avec la mécanisation qui permet d'abaisser les coûts d'extraction. Il s'agit en particulier de la présence :

- de variations latérales et verticales de faciès ;
- de blocs épars constitués de roches massives ;
- de niveaux indurés continus ou discontinus, plus ou moins épais (grès,...) ;
- de bancs d'argiles, de lignite,...

Les conditions hydrogéologiques du site d'extraction ne constituent pas généralement un critère de sélection principal.

Mises à part les conditions de gisement, les caractéristiques intrinsèques des matériaux bruts sont également à prendre en considération. Compte tenu des modes de traitement appliqués, et des spécifications industrielles requises, il peut être opérée une sélection des matériaux en vue d'une application spécifique. A titre d'exemple, la composition chimique des sables siliceux représente un paramètre primordial pour les utilisations en verrerie. Deux sables bruts présentant la même composition chimique pourront se révéler :

- soit de bons produits marchands, si les impuretés (Al_2O_3 , Fe_2O_3) sont liées à la phase argileuse ou à des minéraux lourds magnétiques qui peuvent être éliminés par des traitements simples (lavage, attrition, séparation magnétique).
- soit inaptes à une valorisation économique si les impuretés (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O) sont dues à la présence de minéraux tels que les feldspaths dont l'élimination nécessiterait la mise en oeuvre de traitements sophistiqués entraînant un surcoût prohibitif (flottation) compte tenu des prix de commercialisation du marché.

La présence de glauconie (silicate riche en fer) ou de minéraux lourds infusibles limitera l'utilisation du matériau en verrerie s'ils ne peuvent être éliminés.

La coloration rouille des sables révèle la présence d'oxydes de fer, impureté principale pour la verrerie. Une teinte brune peut signifier la présence de matière organique qui s'élimine aisément au lavage.

La granularité représente un critère important de sélection d'un sable siliceux, en particulier pour les applications en fonderie. La taille maximale des grains est de l'ordre de 0,5 mm. Cependant, cette contrainte est largement assouplie par les systèmes actuels de criblage et de classification.

Dans le cas des sables silico-argileux, la proportion d'argile peut être évaluée au toucher.

Pour l'électro-métallurgie, la granularité de mise en oeuvre de la silice (minimum 10 mm) limite les possibilités d'épuration puisque la maille de libération des impuretés responsables des teneurs pénalisantes en fer et titane est inférieure au millimètre. C'est donc le matériau exploité qui devra présenter naturellement des caractéristiques conformes aux spécifications. On comprend donc que le matériau de prédilection soit le quartz plutôt que les quartzites souvent riches en minéraux lourds ou les grès de Fontainebleau à la cohésion variable.

8.4. MODES D'EXPLOITATION ET DE TRAITEMENT DES MATERIAUX

L'exploitation des matériaux siliceux est toujours réalisée dans des carrières à ciel ouvert.

L'extraction des sables siliceux, qui peut être sélective, se fait au moyen :

- de dragues suceuses flottantes qui pompent le sable sous forme de pulpe, pour les dépôts situés sous le niveau de la nappe phréatique ;
- de pelles mécaniques dans le cas des sites à sec.

Compte tenu des exigences des utilisateurs, qui recherchent des produits siliceux à haut degré de pureté et/ou aux caractéristiques régulières, et de la rareté voire l'absence de matériaux utilisables à l'état brut, il est fait appel à différents moyens de traitement (fig. 4).

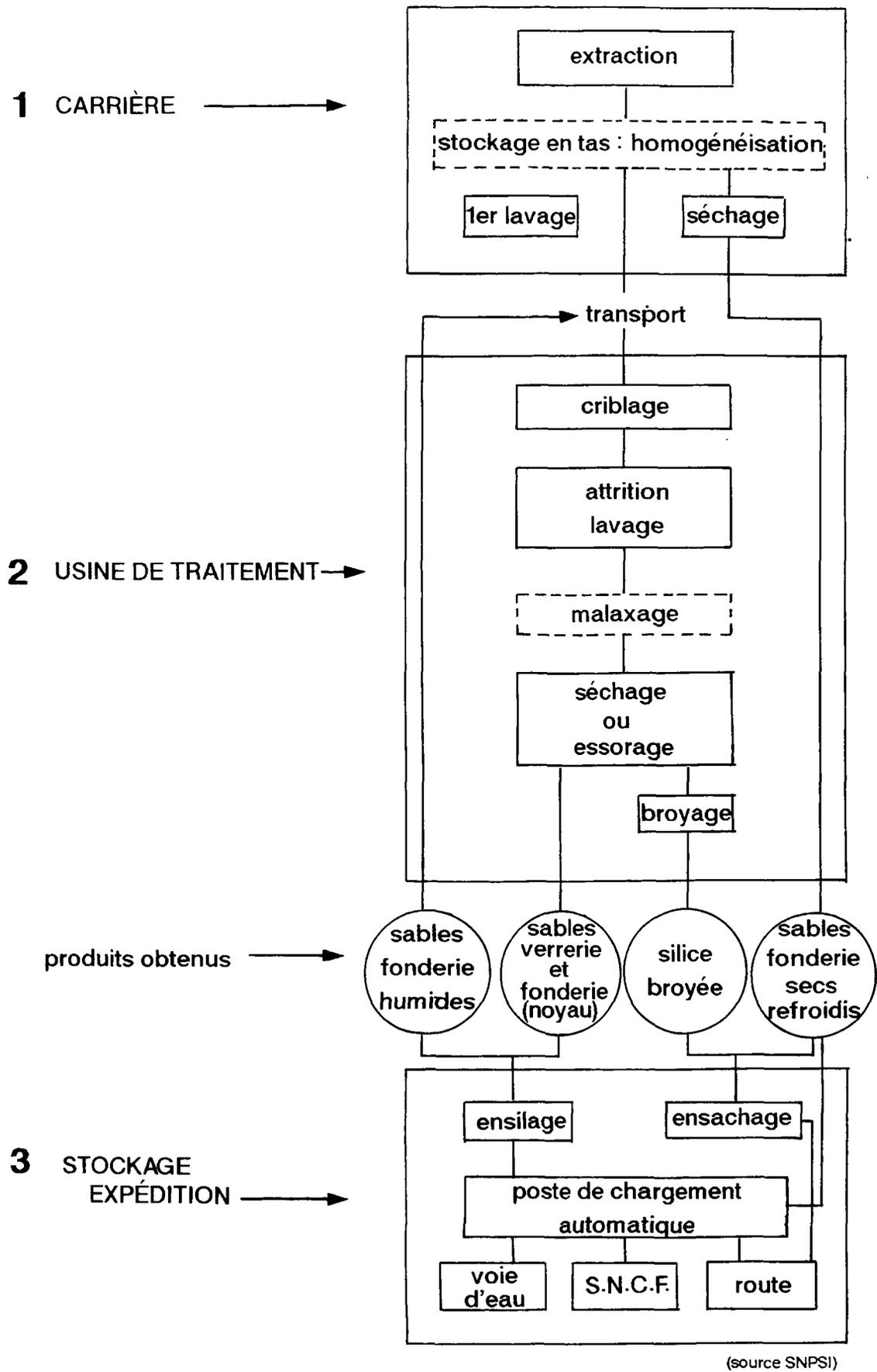


Fig. 4 - Schéma de traitement des sables siliceux.

Ces derniers dépendent bien évidemment des caractéristiques intrinsèques des substances brutes, de la qualité et du degré de pureté des produits recherchés.

Les plus couramment utilisés dans le cas des sables siliceux sont énumérés ci-dessous.

- Décantation primaire (station de prétraitement) : séparation entre silice, argiles et éléments indurés.
- Criblage (cribles dynamiques, trommels ou cribles statiques) : élimination des blocs plus ou moins cimentés, des argiles et impuretés de taille > 10 mm, des grains de taille > 500 μm .
- Attrition (cellules d'attrition, attriteurs à hélice) : séparation des incrustations ferrifères et des enveloppes argileuses des grains de quartz, par friction.
- Lavage et classification granulométrique, qui peuvent être réalisés en plusieurs étapes. Le lavage primaire, ou "débouillage", permet l'élimination de la fraction argileuse et des éléments ≤ 100 μm par voie humide (classificateurs à vis). Cette séparation des particules fines se fait par décantation différentielle et entraînement dynamique par surverse.

Le lavage secondaire par voie humide (hydrocyclones) permet l'élimination des impuretés, argileuses et autres, de taille < 20 ou 30 μm .

Accompagnés de séparateurs hydrauliques et d'égoutteurs vibrants, les hydrocyclones assurent la réalisation de coupures granulométriques successives (par exemple $0,10 - 0,45$ mm pour les sables destinés à la verrerie et à la fonderie et refus $> 0,45$ mm pour ceux destinés au bâtiment).

Les eaux de lavage sont rejetées dans des bassins de décantation où les matières en suspension les plus fines ($< 0,10$ mm), constituées de sables et d'argiles, se déposent.

- Essorage et séchage : réduction de l'humidité à un taux minime ($\leq 2,50$ %) par un procédé mécanique (essoreurs à dépression), et séchage thermique complet pour éliminer toute trace d'humidité (fours rotatifs, fours à lit fluidisé).
- Refroidissement : abaissement de la température du produit jusqu'à 25° C environ.
- Broyage : obtention de grains < 80 μm (broyeurs à boulets ; broyeurs cylindriques à galets de quartzite et parois pavées de silex pour éviter toute pollution).
- Malaxage : homogénéisation des produits à l'aide de malaxeurs.
- Flottation : séparation et élimination, par voie humide, de tous les oxydes de fer et minéraux lourds libres (cellules de flottation). Cette technique efficace et sophistiquée d'épuration n'est cependant mise en oeuvre qu'exceptionnellement compte tenu de son coût.

- Séparation magnétique : élimination de certains minéraux lourds contenant du fer (biotite, amphiboles, tourmaline, ilménite, pyroxènes, zircon, rutile...) et des grains de quartz partiellement pollués par des oxydes de fer, par voie sèche (séparateurs magnétiques haute intensité).
- "Dewatering" : procédé permettant la stabilisation finale de l'humidité.

Les autres matériaux siliceux subissent les mêmes modes d'exploitation et de traitement que les sables, à quelques variantes près :

- l'abattage des quartzites se fait à l'explosif ;
- les galets de quartz, destinés à l'électro-métallurgie, nous l'avons vu, font systématiquement l'objet d'un tri manuel ;
- le quartz ultra-pur, abattu à l'explosif peut faire l'objet d'un tri manuel, voire être épuré chimiquement afin d'éliminer toute trace de fer introduit lors des opérations de broyage.

Les produits siliceux ainsi élaborés sont commercialisés sous différentes formes et granulométries, les produits les plus fins correspondant à de la farine de silice ou à de la silice micronisée ($< 10 \mu\text{m}$).

9. Utilisations et spécifications industrielles

Dans l'industrie, la silice est destinée à quatre secteurs principaux : la verrerie, la fonderie, le bâtiment et l'électro-métallurgie auxquels il faut ajouter un grand nombre d'applications très diverses aussi bien quant aux qualités requises qu'en ce qui concerne les volumes en jeux.

Les spécifications industrielles diffèrent non seulement selon les types d'applications, mais aussi suivant les utilisateurs, en particulier dans l'industrie du verre. Cependant, il existe des normes précises pour certaines utilisations, la fonderie en particulier, où référence est faite à des essais normalisés.

D'une manière générale, trois ensembles de paramètres sont à prendre en compte pour définir un produit siliceux d'un point de vue qualitatif :

- sa granularité (qui se définit par la courbe ou l'histogramme granulométrique et par l'indice de finesse) ; la granularité d'un produit sableux peut être corrigée par élimination d'une partie des éléments compris entre deux mailles successives de tamis ou par ajout d'un sable correcteur, le spectre granulométrique du produit commercialisé peut donc souvent être éloigné du matériau naturel ;
- sa composition chimique (teneur en silice et en autres éléments), qui est le reflet de sa minéralogie ;
- la régularité de ces caractéristiques physico-chimiques.

9.1. VERRERIE

L'industrie du verre regroupe deux activités très différentes (d'après Economie Géographie n° 316 revue mensuelle de l'Institut de l'Entreprise) :

- le verre mécanique, industrie à investissements lourds, effectue une production de masse ;
- le verre à main, industrie de main d'oeuvre d'art et de création, effectue des productions de prestige qui mettent en jeu des volumes comparativement limités de matière première.

L'industrie du verre mécanique peut être subdivisée en quatre secteurs principaux :

- le **verre creux mécanique** qui, en tant qu'emballage de la plupart des liquides (bouteilles, flacons, pots), **constitue le plus gros tonnage de verre fabriqué**. La verrerie de table (verre à boire, vaisselle) peut y être également rattachée ;
- les **fibres de verre** pour l'isolation ou le renforcement des matières plastiques ;
- le **verre technique**, comme le verre optique et la verrerie industrielle : verre de silice, fibres "quartzel" ;
- le **verre plat**, surtout destiné aux vitrages pour le bâtiment et l'automobile.

9.1.1. Composition

La verre peut être défini d'un point de vue physique comme un solide non cristallin. Il nécessite, pour sa fabrication la mise en oeuvre :

- de formateurs du réseau vitreux, ce sont des oxydes : silice sous la forme de sables siliceux, de calcin (verre recyclé) ou, pour certains verres, oxyde de bore (B_2O_3) ;
- de fondants pour rendre la température de fusion compatible avec les performances des fours : ce sont des oxydes alcalins (Na_2O , K_2O sous la forme notamment de feldspath, de carbonate de sodium ou de phonolite) ;
- de stabilisants qui permettront d'augmenter sa résistance chimique, ce sont les oxydes alcalino-terreux : CaO , MgO , sous la forme de calcaire et dolomie voire d'alumine Al_2O_3 ;
- d'affinants, oxydes d'arsenic ou d'antimoine en milieu oxydant, sulfate de sodium, ou de calcium ;
- de colorants qui sont le plus souvent des oxydes : oxydes de fer ou de chrome pour la couleur verte, oxydes de cobalt pour le bleu, oxydes de nickel pour le gris etc.

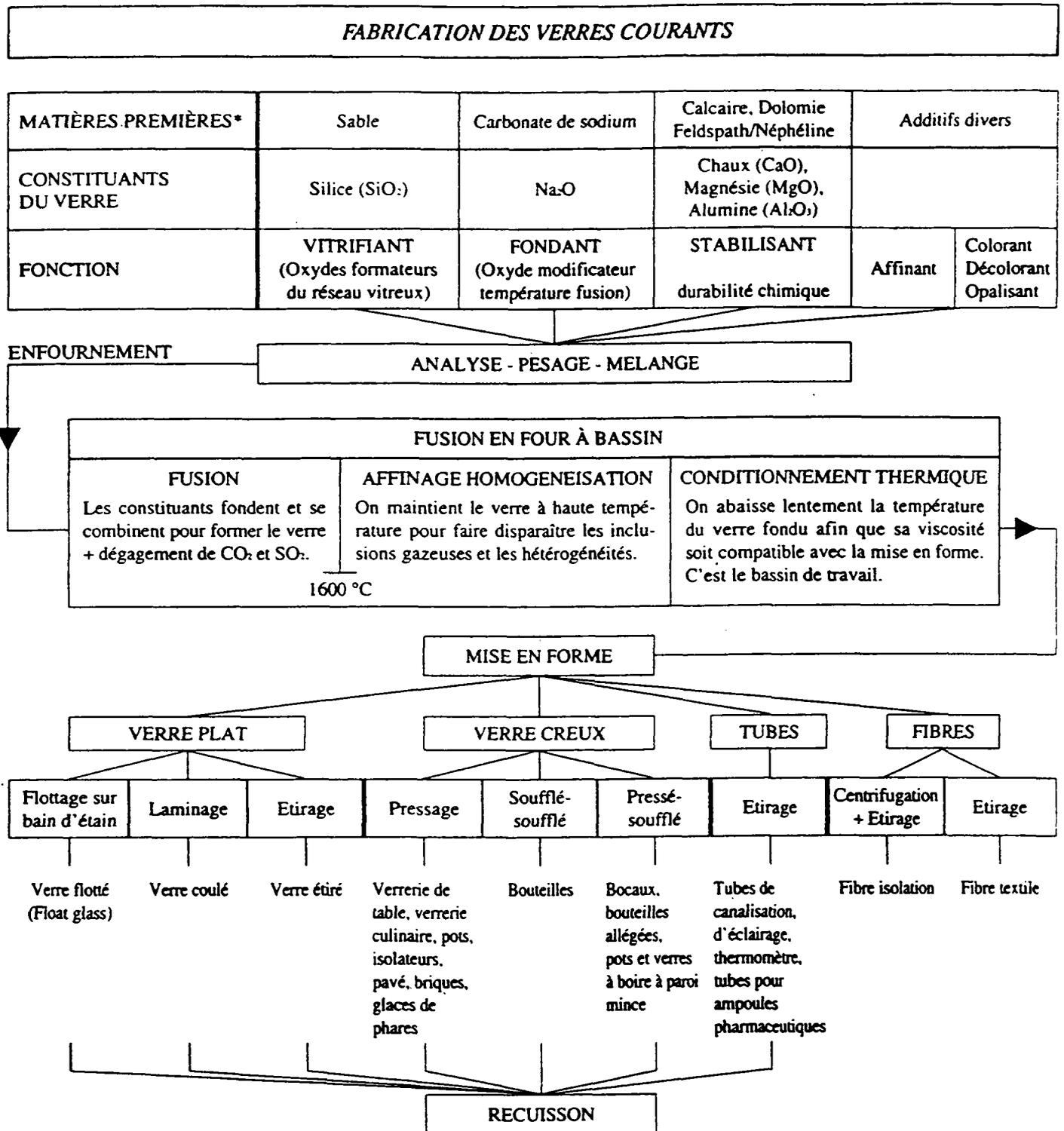
Il s'agit là de la composition des verres silico-sodo-calciques qui servent pour l'essentiel à la fabrication des verres creux. Il existe, dans des domaines plus techniques, d'autres verres :

- le verre pur de silice caractérisé par une haute résistance thermique ($1\ 700^\circ C$) et un faible coefficient de dilatation, il est de plus soudable au métal. C'est le verre le plus transparent dans le domaine optique ;
- des verres de borosilicates qui présentent un faible coefficient de dilatation et une forte résistance chimique et au choc : le plus connu est le verre Pyrex ;
- les verres à l'oxyde de plomb caractérisés par un indice de réfraction élevé. Ils sont surtout valorisés en optique (lentilles et objectifs). On réserve le nom de cristal au verre qui contient plus de 24 % de PbO . Cette teneur peut atteindre 80 % dans certains verres spéciaux (optiques "flint") ;
- les vitrocéramiques sont des produits intermédiaires entre les verres et les céramiques, on les assimile aux produits verriers car les procédés de fusion et de mise en forme sont les mêmes que pour les verres. Les vitrocéramiques diffèrent des céramiques par la finesse du grain et l'absence totale de porosité.

9.1.2. Fabrication

La composition après apport de calcin (rebut de verre, le plus souvent en provenance du site) est fondue à des températures variant entre $1\ 450$ et $1\ 600^\circ C$. Suivent ensuite la mise en forme à chaud, la recuisson et le façonnage des produits.

La figure 5 synthétise les différents modes de fabrication du verre.



* En outre dans le cadre des politiques actuelles d'économie en énergie et d'élimination des déchets, des quantités croissantes de verre usagé (calcin) sont recyclées, c'est-à-dire mélangées, après broyage, aux matières premières.

Fig. 5 - Modes de fabrication du verre (d'après Economie géographique n° 316).

Les tableaux 13 a et 13 b donnent un panorama de la diversité des productions et des usages pour les différents types de verre.

Les matières premières utilisées sont en général naturelles, non toxiques et peu coûteuses. La silice utilisée varie, en poids de 70 à 73 % pour les verres silico-sodocalciques à 55 à 60 % pour les verres au plomb et 40 à 70 % pour les verres spéciaux.

9.1.3. Spécifications

La **composition chimique** est le paramètre le plus contraignant, elle concerne essentiellement la teneur minimale acceptable en SiO_2 et les teneurs maximales tolérées en impuretés.

D'une manière générale les teneurs sont les suivantes : $\text{SiO}_2 \geq 98 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 0,5 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,01 \%$ pour le verre blanc et $\leq 0,3 \%$ pour le verre coloré (la coloration du verre est très dépendante des oxydes métalliques, Fe_2O_3 principalement, contenus dans les sables siliceux).

Certaines spécifications imposent par ailleurs des teneurs limites en d'autres éléments tels que Cr_2O_3 , $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (alcalins), TiO_2 (proscrit pour les verres boro-silicatés). Dans le cas particulier des verres optiques, les teneurs maximales tolérées sont de 1 ppm pour le cuivre, le cobalt et le nickel, et de 3 ppm pour le vanadium. Le nickel, le cuivre et le cobalt sont des éléments indésirables, étant à l'origine de colorations et de défauts dans le verre.

Les spécifications concernant les principaux oxydes, en fonction des types de produits, sont consignées dans le tableau 14. Celles relatives au quartz (silice ultra-pure) produit en France et destiné à la fabrication de verres optiques spéciaux (optique de précision) sont les suivantes :

- $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 10$ ppm (teneur originelle de la roche), < 25 ppm ou < 18 ppm (selon les granulométries après traitement) ;
- TiO_2 , CuO , Cr_2O_3 , NiO , CoO , $\text{MnO} < 10$ ppm ;
- $\text{Al}_2\text{O}_3 < 200$ ppm.

La **granularité** des produits siliceux doit être constante et très resserrée afin d'obtenir une grande homogénéité du mélange permettant de fondre l'ensemble des grains à des températures proches (la fusibilité est fonction de la grosseur des grains) (tabl. 15).

Les différentes normes en vigueur en France fixent les limites suivantes :

- taille des grains comprise entre 100-150 μm et 400 - 600 μm ;
- absence de grains de taille supérieure à 0,85 mm (tamis 20) ;
- coefficient de variation du passant à $D_{50} < 15 \%$.

Produits verriers	Utilisations	Fonctions	Composition du verre
Glace = Verre flotté (float)	bâtiment Fenêtre, porte Façade Toit, plafond, plancher Garde-corps, cloison Sanitaire Mobilier Décoration transport Automobile Train Avion aquarium, piscine	Eclairage naturel isolation thermique et apport solaire sécurité (choc, chute de personnes, agression, incendie) isolation acoustique résistance à la pression hydrostatique	Silicosodocalcique
Verre étiré	décoration intérieur	décoration	Les produits de base du verre plat sont transformés par des traitements qui lui confèrent leurs performances cf. chapitre transformation du verre plat
Verre coulé armé	Toiture, fenêtre	pare flamme retardateur d'effraction	
Verre coulé imprimé	décoration intérieure capteur solaire serre horticole	décoration transmission lumineuse	
Verre soufflé	décoration intérieure rénovation vitraux anciens	aspect ancien accroche la lumière	
Plaque de cuisson, hublot, porte de four	Électroménager (cuisinière, rôtissoire, machine à laver, four)	résistance choc thermique résistance hydrolytique	Vitrocéramique borosilicate verre silicosodocalcique trempé sérigraphié
Bouteille bocal pot	Emballage alimentaire	inaltérabilité résistance mécanique (pression interne des liquides carbonatés) anti UV transparence résistance au choc thermique (stérilisation des aliments) recyclabilité	Silicosodocalcique
Flacon et pot	conditionnement parfum cosmétique conditionnement pharmaceutique	résistance hydrolytique élevée résistance choc thermique résistance hydrolytique élevée résistance hydrolytique moyenne protection contre les UV	Verre borosilicate, verre opale verre borosilicate neutre (type I) verre silicosodocalcique (+B ₂ O ₃) • avec traitement surface = type II • sans traitement surface = type III verre type I, II, III jaune (ambre)
Article en cristal	Arts de la table et ornementation article pour cadeau	haut indice réfraction brillance sonorité	Verre au plomb
Verre à boire	Article de ménage	résistance mécanique	Silicosodocalcique borosilicate
Verrerie culinaire	Article de ménage	résistance au choc thermique (four, cuisinière) propriété diélectrique (four micro-ondes) opalescence/transparence inaltérabilité	borosilicate vitrocéramique verre opale (recouvert de borosilicate)
Produits façonnés à partir de tubes	hautes températures : thermomètre, niveaux d'eau chaudière, tube combustion	point ramollissement élevé (difficile à fondre)	aluminosilicate
Verrerie industrielle	tuyauterie pour fluides corrosifs canalisation, échangeur de chaleur et jauge pour l'industrie chimique	résistance au choc thermique résistance à la corrosion	borosilicate
Verrerie laboratoire	tube à essai, ballon, pipette éprouvette, thermomètre	haute résistance au choc thermique	borosilicate verre de silice

Tabl. 13a - Panorama de la diversité des productions et des usages pour les différents types de verre.

Produits verriers	Utilisations	Fonctions	Composition du verre
Tube luminescent Ampoule pharmaceutique seringue, flacon	éclairage enseigne lumineuse emballage pharmaceutique prélèvement sanguin perfusion	transparence résistance hydrolytique élevée résistance choc thermique résistance hydrolytique élevée résistance hydrolytique moyenne protection contre les UV	silicosodocalcique borosilicate neutre (type I) silicosodocalcique (+B ₂ O ₃) • avec traitement surface = type II • sans traitement surface = type III verre ambre (type I, II, III)
Cône TV (tube cathodique) et écran	Télévision, ordinateur	absorption des rayons X émis par l'anticathode	verre au plomb
Verre d'optique	lunetterie composants instrument optique (photo, cinéma, télescope, microscope), laser	homogénéité transparence isotropie photochrome (absorbe UV)	compositions diverses • avec PbO (flint) • sans PbO (crown)
Ampoule électrique	éclairage	transparence	silicosodocalcique spécial compatible avec procédé fabrication ultra rapide
Isolateur	distribution du courant électrique	isolation électrique résistance mécanique et chimique	silicosodocalcique (+ trempe) borosilicate
Glace de phare	Transport		Silicosodocalcique
Verre cellulaire	Isolation des murs, plafonds, planchers isolation des équipements industriels, tuyauteries	conductivité thermique faible légereté imperméable à la vapeur d'eau résistant aux acides incombustibles, inertie chimique	
Vitrification des déchets radioactifs	Stockage nucléaire	stabilité	aluminoborosilicate de sodium
Bille et microbille	Filtration, revêtement antidérapant, traitement de surface, signalisation (peintures réfléchissantes) laboratoire, charges des matières plastiques		
Fenêtre glace protection	Centrale électronucléaire Radiologie médicale et industrielle	absorption rayons X alpha, bêta, gamma, neutron	verre au plomb
Fibres transformées Verre textile	Renforcement des matières plastiques (matériaux composites)		verre E : propriétés Electriques verre D : hautes propriétés Diélectriques verre A : haute teneur en Alkali verre C : bonne résistance Chimique verre R ou S : haute Résistance mécanique Verre AR : Alcalis-Résistant
Laine de verre	Renforcement des ciments isolation thermique isolation phonique revêtement routier drainant	empêche mouvement convectif de l'air résistance au feu diffusion du rayonnement IR absorption de l'eau, réduction de l'énergie, acoustique des pneus	Silice + soude et potasse + chaux + alumine
Laine de roche	isolation, culture hors sol	rétenion eau et air haute pureté	Silice + chaux + alumine + magnésie + fer
Fibre optique	télécommunication transmission de signaux	transparence, homogénéité variation de l'indice de réfraction par variation de la composition	verre de silice dopé au fluor ou B ₂ O ₃ ou GeO ₂ ou P ₂ O ₅
	Médecine	utilise le domaine spectral IR mesure à distance la température des tissus vivants (thermographie IR)	verre fluoré

Tabl. 13b - Panorama de la diversité des productions et des usages pour les différents types de verre.

Types de verre	Verre creux blanc	Verre creux coloré	Verre de table	Verre boro-silicaté	Cristal au plomb	Verre plat	Verre optique	Fibres de verre (isolation)
SiO ₂	≥ 98,8 ± 0,2	≥ 97,0 ± 0,1	≥ 99,6 ± 0,1	≥ 99,6 ± 0,1	≥ 99,6 ± 0,1	> 99,0 + 0,2 > 96,0 ± 0,3	≥ 99,7 ≥ 99,8 *	≥ 94,5 ± 0,5
Al ₂ O ₃	≤ 0,6 ± 0,1	≤ 0,6 ± 0,1	≤ 0,2 ± 0,1	≤ 0,2 ± 0,1	≤ 0,2 ± 0,1	≤ 0,5 ± 0,15 0,2 à 1,6 ± 0,1	≤ 0,2 ≤ 0,1	≤ 3,0 ± 0,5
Fe ₂ O ₃	≤ 0,03 ± 0,003	≤ 0,25 ± 0,03	≤ 0,010	≤ 0,010	≤ 0,010	≤ 0,010	≤ 0,010	≤ 0,3 ± 0,05
		≤ 0,3 (vert) ≤ 1,0 (ambré brun)				± 0,005 < 0,1 ± 0,005	≤ 0,02 *	
Cr ₂ O ₃	≤ 0,0005	-	≤ 0,0002	≤ 0,0002	≤ 0,0002	-	≤ 0,00015	-
K ₂ O + Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	≤ 2,5 ± 0,3
Perte au feu	≤ 0,20 ± 0,02	≤ 0,5 ± 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,5

Données en % pondéraux

* Normes A.C.S. (USA)

Tabl. 14 - Spécifications relatives à la composition chimique des matériaux siliceux utilisés en verrerie (d'après Griffiths, 1987 et Maubert, 1989).

La teneur en minéraux lourds réfractaires (sillimanite, andalousite, zircon, spinelle, corindon, chromite,...) d'un diamètre supérieur à 250 µm doit être en général au maximum de 3 ppm de la masse. La fabrication du verre plat nécessite l'absence de minéraux réfractaires de taille supérieure à 0,4 mm et de chromite de taille supérieure à 0,2 mm.

Types de verre	Verre plat	Verre incolore qualité optique	Fibre de verre
Granulométrie	125 µm à 1 mm (moyenne ~ 250 µm)	100 % < 20 mesh 40-60 % refus tamis n° 60 10-20 % refus tamis n° 80 ≤ 5 % passant tamis n° 100	20 % > 60 mesh

Tabl. 15 - Spécifications relatives à la granulométrie des matériaux siliceux utilisés en verrerie (d'après Griffiths, 1987).

9.2. FONDERIE

La technique de base utilisée dans l'industrie de la fonderie consiste à faire fondre un métal ou un alliage de métaux, puis à le couler dans une empreinte, le moule, afin de réaliser une pièce de forme bien déterminée. Cette industrie utilise des sables fins capables de résister au métal fondu à deux niveaux :

- pour la réalisation des moules dans lesquels seront coulés les métaux ;
- pour la confection des noyaux qui correspondront aux parties évidées des pièces quand celles-ci sont creuses.

La plupart des pièces de fonderie sont coulées dans des moules dits "au sable" selon un procédé ancien encore très largement utilisé. Ces moules, autrefois réalisés à base de sables argileux ou silico-argileux (sables de moulage "naturels") sont à présent confectionnés avec des sables siliceux ou extra-siliceux (sables de moulage "synthétiques") auxquels on incorpore un liant argileux (bentonite) ou synthétique (résine, ciment, Na₂ SiO₃,...) afin d'obtenir une plasticité suffisante. On utilise également, surtout pour le noyautage, des sables dits "semi-synthétiques" constitués de sables siliceux peu argileux (4 à 8 % d'argiles) dont la composition est rectifiée par des ajouts d'argiles spéciales et contrôlées.

La dilatation brutale de la silice pouvant entraîner l'apparition de défauts sur les pièces (gales), d'autres types de sables sont utilisés pour l'obtention de pièces de qualité et de grande précision. Il s'agit de sables constitués de minéraux réfractaires tels que le zircon, la chromite et l'olivine. Compte tenu du prix élevé de ces derniers, la très grande majorité des sables utilisés en fonderie sont des sables siliceux.

Dans le domaine de la fonderie, les spécifications concernent cinq paramètres principaux : l'indice de finesse, la répartition granulométrique, la teneur en argiles, la teneur en impuretés chimiques et l'aspect morphoscopique des grains.

L'indice de finesse d'un sable siliceux constitue un critère prépondérant de choix pour les applications en fonderie dans la mesure où il influe directement sur l'état de surface de la pièce fabriquée. Les valeurs généralement préconisées varient en fonction de différents paramètres (cf. tabl. 5) : nature du métal coulé, genre de pièces et type d'utilisation (moulage ou noyautage). La tolérance de variation de ces valeurs est de ± 5 au moment de la livraison des produits.

La répartition granulométrique du sable de fonderie a également une grande importance car elle agit sur la possibilité de dilatation du moule (donc sur sa fragilité) et sur la diffusion des gaz au moment de la coulée. Les spécifications techniques sont les suivantes :

- éléments de dimension comprise entre 50 μm et 3,5 mm ;
- répartition granulométrique tendant vers l'allure d'une courbe de Gauss et présentant certaines caractéristiques :
 - . au moins 97 % de la masse des grains retenue sur au plus 5 tamis successifs (séries AFS (norme américaine), GF (norme DIN allemande) ou AFNOR) ;
 - . teneur en particules de dimensions inférieures à 20 μm :
 - ≤ 4 % pour un sable siliceux ;
 - de 0,3 à 0,8 % pour un sable extra-siliceux.

Les sables de moulage dits "naturels" (sables argileux ou silico-argileux), dont l'emploi décline, doivent présenter une teneur en argiles significative, variable suivant les applications (tabl. 16). Celle-ci doit être très restreinte dans le cas des sables siliceux (utilisés pour la préparation des mélanges à base de liants minéraux) et des sables extra-siliceux (servant à l'élaboration des mélanges à base de liants organiques et autres) :

- < 0,5 % pour tous les liants, notamment les résines synthétiques ;
- de 0,5 à 1 % pour les silicates de soude en particulier ;
- de 1 à 2 % pour les huiles siccatives notamment.

La teneur en impuretés chimiques doit être rigoureusement contrôlée dans la mesure où elle peut entraîner des réactions préjudiciables entre le moule et le métal coulé. La présence de carbonates (calcite, dolomite,...) est à proscrire car le dégagement de CO_2 pendant la coulée peut provoquer la formation de cavités dans les pièces moulées. Exprimées sous forme de CO_2 , les teneurs limites spécifiées sont les suivantes :

- $\leq 0,4$ % pour les sables siliceux ;
- $\leq 0,1$ % pour les sables extra-siliceux.

La présence de feldspaths et de matière organique est également néfaste lors des opérations de coulée.

Enfin, la forme des grains de quartz doit être la plus arrondie possible. Cette caractéristique se traduit par une moindre consommation de liant (par rapport aux particules anguleuses à plus grande surface) et par un échappement maximal du gaz durant la trempe.

Métal coulé	Genre de pièces	Indices de finesse		Teneur en argiles des sables "naturels (%)
		Moulage	Noyautage	
Acier	Grosse et moyennes > 15 mm ép.	< 50	40 à 50	> 8
	Petites < 15 mm ép.	50 à 70		< 15
Fonte grise	Grosses > 30 mm ép.	40 à 70	50 à 70	15-20
	Moyennes 15 à 30 mm ép.	70 à 100		12-18
	Petites 0 à 15 mm ép.	100 à 140		12-18
Alliages cuivreux	Grosses > 30 mm ép.	90 à 110	60 à 80	15-20
	Moyennes 15 à 30 mm ép.	100 à 120		12-18
	Petites 0 à 15 mm ép.	120 à 140		12-18
Alliages légers	Grosses > 30 mm ép.	100 à 120	(100 à 140)	15-20
	Moyennes et petites < 30 mm ép.	120 à 140		10-20

Tabl. 16 - Spécifications relatives à l'indice de finesse et à la teneur en argiles des sables siliceux utilisés en fonderie.

9.3. ELECTRO-METALLURGIE

La réduction de minerais au four électrique permet l'élaboration d'alliages (ferro-silicium, ferro-silico-manganèse, nitrures de silicium, siliciure de calcium), de métaux légers (silicium, magnésium, calcium) et de produits électro-fondus (carbure de silicium) qui constituent des matériaux intermédiaires à forte valeur ajoutée destinés aux secteurs de la métallurgie, de la chimie, des réfractaires, des abrasifs ou de l'électronique.

Les procédés d'élaboration mis en oeuvre ont en commun de forts besoins en énergie électrique, celle-ci représente en général plus du 1/3 du coût du produit final.

Malgré leur faible coût unitaire, les matières premières doivent présenter des caractéristiques physiques et chimiques strictement encadrées pour parvenir à l'élaboration de produits à haute pureté ou à teneur contrôlée.

• Métallurgie

Dans le domaine de la fonderie, ces produits interviennent comme :

- **adjuvants** pour ajuster la composition chimique en silice, fer et carbone (ferro-silicium standard ou de haute pureté) ;
- **nodulissants**, qui, en changeant la texture des fontes (fonte à graphite sphéroïdal) permet des emplois spécifiques notamment dans les pièces en rotation (vilebrequin etc.) ;
- **inoculants** qui rendent homogène la structure de la fonte en diminuant le risque de formation de carbures et partant lui confèrent ses caractéristiques mécaniques. Les alliages de ferro-silicium utilisés se différencient par la nature des éléments volontairement ajoutés (baryum, bismuth, calcium, strontium, zirconium).

La composition chimique des aciers emboutissables pour carrosserie automobile doit être rigoureusement contrôlée pour obtenir une ductibilité optimale. Par ailleurs, les alliages de traitement à base de siliciure de calcium ou de calcium garantissent l'absence d'inclusions dans ces aciers.

Dans le domaine des alliages légers, le silicium accroît la coulabilité et les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium. Les qualités de silicium à très basse teneur en impuretés (fer, calcium ou phosphore) sont notamment destinées aux alliages d'aluminium de première et de deuxième fusion qui trouvent leur application dans les jantes, les bras de suspension et les pistons. C'est aussi un agent désoxydant.

• Chimie et électronique

Le silicium est la matière première principale utilisée dans la fabrication des silicones ou polyorganosilanes. Ils présentent la particularité de posséder dans leur structure moléculaire des groupes carbonés qui, suivant les composés organiques qui leur sont liés et les modes de fabrication peuvent donner des produits se présentant sous des formes diverses : liquides, pâteuses, élastomères ou même rigides.

Les silicones sont fabriqués à partir de chlorosilanes obtenus par réaction du chlorure de méthyl (CH_3Cl) sur du silicium en poudre. Ces chlorosilanes sont ensuite séparés par distillation.

Les principales propriétés des silicones sont :

- une stabilité thermique dans une gamme très large de température ;
- une résistance chimique ;
- des propriétés diélectriques ;
- des propriétés organophobiques et hydrophobiques variables ;
- des propriétés adhésives variables ;
- une innocuité pour la santé humaine ;
- des propriétés lubrifiantes ;
- une perméabilité aux gaz.

Les silicones se présentent en général sous trois formes : des huiles, des élastomères ou des résines qui permettent de confectionner une large gamme de produits destinés aussi bien à l'industrie du bâtiment qu'à celle de l'automobile, du papier etc.

Dans le domaine de l'électronique, le silicium est le métal le plus utilisé dans les semi-conducteurs haute fréquence, loin devant l'arséniure de gallium. Il reste de plus le matériau de référence de l'électronique haute température ($> 300^\circ\text{C}$), de plus en plus utilisé dans l'industrie pétrolière mais aussi dans l'industrie automobile.

• Abrasifs

Aux abrasifs naturels comme la silice, se substituent de plus en plus des abrasifs de synthèse comme le carbure de silicium commercialisé sous des appellations diverses : carborandum, crystolon, carbolon ou silcaride. Le carbure de silicium est principalement utilisé pour l'élaboration de meules et revêtements abrasifs, notamment pour le polissage des métaux ferreux.

• Céramiques

Silicium métal et carbures de silicium interviennent également dans la réalisation de composants électriques et de céramiques techniques avancées.

Les matières premières utilisées dans l'électro-métallurgie interviennent en tant que :

- source de silicium :
 - . silice ultra-pure en blocs pour le silicium métal, mais aussi pour le ferro-silicium et le nitrure de silicium ;
 - . les sables siliceux sont utilisés pour la fabrication du carbure de silicium ;

- fondants : calcaire et dolomie ;
- réducteur carboné : coke de pétrole, charbon.

Pour mieux préciser les enjeux concernant les spécifications des matières premières, nous décrirons les principes de fabrication du silicium métal, comparables à celles du ferro-silicium, mais avec des contraintes plus grandes concernant les teneurs en fer.

Elaboration du silicium métal

La réduction carbothermique de la silice se fait dans des fours à arc électrique submergé d'une capacité de production de 60 à 100 t de silicium métal par jour.

Dans ces fours, l'arc électrique est produit par une électrode verticale en graphite, régulièrement rechargée. Ces fours fonctionnent en continu, l'alimentation en matières premières s'effectuant dans la partie supérieure. A la base des fours, le silicium en fusion (environ 1 700°C) est régulièrement soutiré dans des "poches" en fonte dans lesquelles s'effectue un affinage incluant l'adjonction d'éléments spécifiques suivant les qualités désirées.

Après refroidissement, le silicium métal est concassé en morceaux, broyé en grains ou réduit en poudre, suivant les spécifications des clients.

La fabrication d'une tonne de silicium métal nécessite entre 8 000 et 12 000 kWh, mais un nombre limité de matières premières :

- 2 500 kg de silice ultra-pure en roche massive : (quartz, grès) ;
- 1 300 kg de houille ;
- 150 kg de coke de pétrole ;
- 1 600 kg de bois sous forme de copeaux ;
- 12 à 20 kg de calcaire.

Les traces en fer et en titane seront d'autant plus à surveiller à l'entrée matière que ces éléments ne peuvent être éliminés au cours du processus d'élaboration. Pour ce qui est de la teneur en fer, elle doit être d'autant plus faible que les procédés de fabrication ne permettent pas d'éviter des contaminations par les instruments en cours d'élaboration (l'enveloppe de l'électrode est en acier ainsi que les instruments de manipulation à la sortie des coulées).

Notons enfin, que les fumées sont récupérées et valorisées pour la fabrication de bétons spéciaux réfractaires ou poreux. Elles sont constituées de silice amorphe sphérique inférieure à 0,2 µm avec une teneur en silice supérieure à 95 %. Leur valorisation ne couvre cependant qu'à 30 % les coûts de récupération dus à la réglementation (communication orale producteur).

Le mode de présentation des matières premières est conditionné par la nécessité de maintenir, dans le four, une porosité en masse autorisant l'évacuation des gaz (CO₂),

faute de quoi il pourrait se former des empâtements avec création de soles intermédiaires pouvant conduire à l'explosion des fours.

Le procédé de fabrication du carbure de silicium dans des fours électriques par le procédé Acheson permet la fabrication de lingots élaborés à partir de sables et non de blocs. La teneur de ces lingots varie de 80 à 100 % SiC, elle est toujours plus forte à leur coeur.

Pour ce qui est de la composition chimique, les spécifications portent d'une manière générale sur SiO₂, Fe₂O₃, TiO₂, Al₂O₃, et CaO (tabl. 17). Certains autres éléments doivent faire l'objet d'un contrôle rigoureux particulier : l'arsenic, le phosphore et le soufre pour le ferro-silicium ; et le magnésium pour le carbure de silicium.

Société	ERIMSA		SPIR	Quartzite de Meillers	D.A.M. Saint-Jean-de-Côle
	Silicium métal	Ferro silicium	Ferro silicium	Ferro silicium	Silicium métal
SiO ₂	> 99,5 %	> 99 %	> 99 %	98 à 99 %	99,8 %
Al ₂ O ₃	< 0,35 %	< 0,5 %	< 0,2 %	< 0,3 %	< 450 ppm
Fe ₂ O ₃	< 300 ppm	< 300 ppm	< 450 ppm	< 600 ppm	< 340 ppm
TiO ₂	< 40 ppm	< 80 ppm	< 200 ppm	< 0,2 %	< 40 ppm
CaO	< 50 ppm	< 50 ppm		< 100 ppm	
MgO	< 60 ppm	< 100 ppm		< 100 ppm	
K ₂ O	< 250 ppm	< 250 ppm		< 300 ppm	
Na ₂ O	< 70 ppm	< 70 ppm		< 100 ppm	
MnO	< 20 ppm	< 20 ppm			
P ₂ O ₅	< 25 ppm	< 25 ppm			

Tabl. 17 - Spécifications de quelques produits marchands destinés à l'électrometallurgie.

(source : enquête auprès des producteurs)

Les teneurs en sodium, potassium, bore et plomb peuvent également être limitées pour des produits spécifiques.

Les matériaux siliceux utilisés en France pour la production de ferro-silicium et de silicium métal présentent les granulométries suivantes : 10-60 mm, 20-60 mm, 25-140 mm, 30-140 mm, 30-150 mm, 40-130 mm, 60-100 mm et 100-150 mm. Pour la production du carbure de silicium, la granulométrie varie de 0,1 à 0,7 mm.

9.4. BATIMENT

D'une manière générale, le domaine du bâtiment a recours à des matériaux siliceux moins purs et moins élaborés que ceux consommés dans les industries précédemment évoquées.

Il sont utilisés pour la fabrication d'une grande variété de produits : enduits (revêtements de façades,...), crépis, mortiers (mortiers techniques à base de résines,...), produits d'étanchéité, plaques isothermiques et isophoniques, résines époxy, bétons (bétons de sable, bétons spéciaux : bétons cellulaires, bétons architectoniques, bétons de résines, bétons blancs,...), dalles industrielles, tuiles bétons.

Les bétons cellulaires, qui présentent des caractéristiques thermiques et techniques intéressantes, sont obtenus à partir d'un mélange de silice finement broyée (sables siliceux), de gypse, d'eau, de chaux et de ciment. La proportion de silice varie de 26 à 50 % selon la densité des bétons.

Le quartz coloré sert pour la décoration (revêtement de sols et de murs).

La cristobalite provenant de la calcination des galets de silex constitue un filler extra-blanc pour des bétons utilisés dans des ouvrages de prestige.

Pour la fabrication des bétons spéciaux et des dalles industrielles, la silice est un agrégat durcisseur recherché pour sa dureté et l'angulosité de ses grains. L'élaboration des dalles industrielles nécessite des matériaux présentant un très bon coefficient de forme, une bonne résistance au poinçonnement et aux chocs, et une neutralité chimique. La production des micromortiers pour couches d'usure fait appel à des produits chimiquement inertes, antidérapants et résistants à l'usure, aux huiles, aux graisses et au gel.

Les spécifications relatives aux sables siliceux servant à la fabrication des bétons cellulaires sont les suivantes :

- pureté : 2 à 3 % de fines argileuses tolérés ;
- granulométrie : refus à 90 µm compris entre 5 et 20 % ; courbes granulométriques stables, l'idéal correspondant à des sables monogranulaires de 0 à 500 µm ;
- teneur en silice > 80 %.

9.5. AUTRES UTILISATIONS

• Céramique

Dans l'industrie céramique, la silice agit en tant que dégraissant des argiles trop plastiques, à l'instar des chamottes. Elle constitue un agent stabilisateur qui évite les accidents de dilatation (casse, fente,...). Elle est utilisée pour la fabrication de différents types de produits : réfractaires, pièces sanitaires, carreaux de revêtement, vaisselle, poteries et tuiles.

Dans le secteur du sanitaire, la silice participe à la vitrification tout en permettant d'ajuster le comportement dilatométrique du tesson.

Elle peut représenter jusqu'à 40 % des matières premières de base nécessaires à l'industrie céramique, de 10 à 25 % dans le cas de la porcelaine et de la faïence.

Les matériaux siliceux impliqués dans ces fabrications sont de plusieurs types : sables quartzeux ; calcédoine, tridymite et cristobalite provenant de galets de silex (galets de mer), quartzites pour les produits réfractaires siliceux.

En céramique, les spécifications fondamentales concernent la composition chimique et la granulométrie : $\text{SiO}_2 > 97,5 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,2 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 0,55 \%$.

La céramique fine utilise des produits (farine de silice) à haut degré de pureté : $\text{SiO}_2 \simeq 99 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,03 \%$, $\text{TiO}_2 \leq 0,05 \%$.

• Charges minérales

Sous différentes formes (farine : $< 10 \mu\text{m}$, micronisée, précipitée), la silice représente une charge de renforcement qui entre dans la composition de différents produits. Les propriétés qu'elle procure à ces derniers sont les suivantes (Griffiths, 1987) :

- plastiques : amélioration de la résistance à la flexion, à la compression et aux chocs thermiques ; et de la stabilité dimensionnelle, elle intervient sous forme de charges mais aussi de fibres de renforcements ;
- peintures : amélioration de la résistance chimique (du fait de sa résistance à l'acide et de sa dureté), de la rétention des teintures, de la durabilité et de la coulabilité ; la cristobalite constituant, en particulier, une charge extrablanche à bonne réflectance ;
- caoutchoucs : renforcement et amélioration de l'adhérence ;
- ciments : ajustement du rapport Ca/Si, mais aussi correcteur granulométrique.

Elle est également utilisée pour l'élaboration de résines, enduits, colles, polyesters, mastics, pigments, vernis, engrais, insecticides, pesticides, lessives, savons, dentifrices, encres.

Les principales spécifications des produits siliceux utilisés dans ce domaine concernent la granulométrie et la surface spécifique. La granulométrie varie de moins de $10 \mu\text{m}$ à $200 \mu\text{m}$.

• Abrasifs naturels

Compte tenu de sa dureté relativement importante (7 sur l'échelle de Mohs), de sa résistance mécanique et de l'aspect conchoïdal des fractures qu'elle développe quand elle est brisée, la silice est un produit abrasif utilisé pour le décapage et le sablage des bétons, pierres et métaux, l'égrisage du verre, le traitement de surface d'une manière générale, le sciage et le polissage de pierres (marbre, granite). Elle entre dans la composition de meules, de produits à polir les métaux, de papiers et toiles abrasifs, de poudres et pâtes à récurer et à polir.

L'emploi des matériaux siliceux pour le sablage à sec à l'air libre est cependant interdit en France depuis 1969 du fait des risques encourus (silicose).

• Filtration des fluides et incinération des boues

Les matériaux siliceux de types sables et galets sont utilisés pour la filtration, par capillarité, des particules solides et des micro-organismes contenus dans des fluides divers : eaux potables, résiduaires et industrielles, eaux de piscines, hydrocarbures et gaz notamment. Les lits fluidisés des fours servant à l'incinération des boues sont composés de silice (silex). Ces modes de traitement nécessitent des matériaux présentant les caractéristiques suivantes :

- inertie chimique : résistance aux acides (insolubilité dans l'acide HCl \geq 98 %), sels, bases et hydrocarbures ;
- faible friabilité (attrition très lente) : absence de production de particules fines.

La granulométrie doit être adaptée à chaque usage spécifique.

• Fracturation hydraulique

Afin de stimuler la production des puits de forages (eau, pétrole, gaz, géothermie), on met en oeuvre une technique qui consiste à injecter un fluide contenant du sable siliceux en suspension. Celui-ci est ensuite pompé sous haute pression, ce qui crée et maintient ouverts des espaces par lesquels les fluides peuvent plus librement se déplacer en direction des puits de production. Les matériaux siliceux recherchés pour cet usage, qui se comportent comme des agents de soutènement, doivent répondre aux spécifications suivantes (Griffiths, 1987) :

- $\text{SiO}_2 \geq 98$ %, avec absence de toute trace d'humidité et de minéraux tels que le feldspath, la calcite ou les argiles ;
- granulométrie : 20 à 40 mesh ;
- inertie chimique : solubilité à HCl $\leq 0,3$ % ;
- haut degré de sphéricité des grains (pour améliorer leur déplacement et augmenter la perméabilité), qui doivent de plus être non agglomérés et non fracturés ;
- forte résistance à la compression.

• Industrie chimique

La silice est utilisée dans l'industrie chimique comme fondant pour la préparation du phosphore et de minerais métalliques de base dont les éléments sont sous forme de silicates. Pour ces derniers, les caractéristiques des matériaux siliceux sont les suivantes (Griffiths, 1987) : $\text{SiO}_2 > 90$ %, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 1,5$ %, $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 1,5$ %, granulométrie ≤ 250 μm .

Elle est également employée pour la production de silicates de soude (sables extra-siliceux très purs fondus en association avec du carbonate de sodium) qui entrent dans la composition des détergents et constituent une alternative à l'utilisation des phosphates.

- **Alimentation animale**

La silice constitue un adjuvant minéral utilisé dans l'alimentation animale en aviculture où elle a pour effet de provoquer une assimilation complète des aliments (d'où une économie de consommation) et une amélioration des rendements et de l'état de santé.

- **Emplois divers**

Les matériaux siliceux sont employés également pour l'élaboration de produits spéciaux tels que les quartz calcinés, céramisés et enrobés de matière active, pour la fabrication de cartouches fusibles en électrotechnique (quartz "déferré").

Enfin, citons l'utilisation du sable calibré de Leucate (Société Nouvelle du Littoral) pour la réalisation d'essais normalisés destinés à l'industrie cimentière.

10. La réglementation sanitaire

Les risques de pneumoconiose (dont la silicose) induite par les poussières alvéolaires ont conduit à l'établissement d'une réglementation de plus en plus contraignante.

Les travaux de décapage, de dépolissage ou de dessablage au jet étaient réglementés dès le 6 juin 1969 par le décret n° 69-558. Celui-ci interdisait l'emploi des abrasifs contenant plus de 5 % de silice libre lorsque les opérations s'effectuaient en cabine ou à l'air libre, sauf projection conjointe d'eau. La réglementation a en fait, pour les sablages à sec, abouti à la mise en oeuvre de produits de substitution essentiellement constitués de silicates d'alumine.

La réglementation a ensuite concerné tous les sites d'extraction, puis tous les sites de travail empoussiérés :

- le décret n° 94-784 du 2 septembre 1994 complète le règlement général des industries extractives institué par le décret n° 80-331 du 7 mai 1980 modifié en créant un titre empoussiérage. Cette réglementation vise à réduire les émissions de poussière inhalables dans tous les sites d'extraction, elle fixe les modalités de suivi et de mesures de ces poussières. L'arrêté du 9 novembre 1994 fixe la procédure d'autorisation d'un appareil de prélèvement de poussières, les modalités de prélèvement, ainsi que les règles de transmission des statistiques qui permettront de suivre l'évolution du risque pulmonaire ;
- le décret n° 97-331 du 10 avril 1997 relatif à la protection de certains travailleurs exposés à l'inhalation de poussières siliceuses sur leur lieu de travail. Ce décret précise que la concentration moyenne en silice cristalline libre des poussières alvéolaires de l'atmosphère inhalée par un travailleur pendant une journée de travail de 8 heures ne doit pas dépasser :
 - . 0,1 mg/ m³ pour le quartz,
 - . 0,05 mg/ m³ pour la cristobalite et la tridymite.

Les méthodes de mesure des concentrations moyennes en poussières alvéolaires de silice cristalline sont fixées par un arrêté des ministres chargés du travail et de l'agriculture.

Notons qu'aux Etats-Unis, compte tenu du risque cancérigène dû à la silice cristalline tout matériau qui contient plus de 0,1 % de silice doit présenter un étiquetage spécifique.

11. Recyclage : évolution récente et perspectives

La silice reste une matière première à faible coût unitaire dans ses principales utilisations de masse : verre creux, verre plat, fibre de verre, sables de fonderie, source de silicium en électro-métallurgie. Il pourrait donc sembler difficile de trouver une alternative à cette ressource qui nécessite des spécifications bien précises.

Dans le souci d'une gestion durable des ressources naturelles, aussi bien que pour des raisons de protection de l'environnement, la mise en oeuvre de filières de recyclage se généralise et ne peut qu'avoir une incidence sur la demande en ressource naturelle. Nous essaierons ci-après d'en préciser les enjeux dans les deux secteurs où elle prend de plus en plus d'importance.

11.1. VERRERIE

Une filière de récupération du verre creux a été mise en oeuvre à l'échelle européenne, il faut s'attendre à la mise en place d'une filière comparable pour le verre plat.

En 1997, 1,5 Mt de verre a été ainsi récupéré soit un taux de récupération supérieur à 50 %, l'objectif en 2002 étant d'atteindre un taux de récupération de 75 % (source C.S.V.M.).

La consommation totale de l'industrie du verre en sables siliceux avoisinant 3,7 Mt, il est facile d'imaginer l'impact de la récupération sur la consommation en matière première naturelle. Cependant, l'utilisation en forte proportion de calcin d'origines diverses posera un problème de qualité matière aussi bien que de régularité de ces qualités. Il reste en effet à transposer à l'échelle industrielle un tri du calcin par couleur (tri optique), permettant d'étendre la réutilisation à d'autres domaines que ceux auxquels il est actuellement destiné : celui des verres creux colorés caractérisé par les spécifications les moins contraignantes en terme de pureté chimique.

L'usage de calcin issu du recyclage interne à l'usine a toujours représenté jusqu'à 5% de l'apport en matière première siliceuse, pour les verres plats, il permet en effet d'optimiser le fonctionnement des fours en facilitant la fusion des mélanges (il fond à 1 350°C alors que le mélange ne fond que vers 1 450°C).

A l'heure actuelle, jusqu'à 50 % de calcin externe est accepté pour l'élaboration des verres creux colorés. L'augmentation de cette proportion nécessiterait probablement l'adaptation de l'appareil de production. La mise en oeuvre de quantités de calcin "externe" atteignant 90 %, a été réalisée en Suisse, cet investissement se justifiant par la rareté en ressource naturelle siliceuse de ce pays. Pour le moyen terme, les sables extra-siliceux sont donc toujours la matière première principale pour les verres extra-blancs (verres creux ou verre plat).

11.2. FONDERIE

En raison de leur faible coût de remplacement les sables siliceux de fonderie étaient, jusqu'à une date récente, mis en décharge. Cependant, les résines auxquels ils sont le plus souvent associés en font, du fait de la nouvelle réglementation, des déchets industriels spéciaux, ils doivent donc à ce titre être mis en décharge de classe 1. Les surcoûts ainsi engendrés ont rendu économiquement viables la mise en place de filières de recyclage.

Après avoir envisagé un certain nombre de possibilités de reconversion comme granulats (sables de construction, fabrication d'enrobés, de revêtements routiers) l'essentiel des efforts porte maintenant sur sa réutilisation en sables de moulage.

Les sables siliceux se prêtent particulièrement à ce recyclage qui met en oeuvre des procédés mécaniques (attrition), pneumatiques ou thermiques.

Face à la généralisation du recyclage la demande de matière première "primaire" va donc décliner mais devrait se stabiliser compte tenu du rôle de la matière première "neuve", en particulier comme correcteur granulométrique pour limiter la proportion de fines.

Actuellement on estime qu'environ 1 t de sables siliceux naturels devraient toujours être nécessaire par 1,25 t de produit moulé (Industrial Minerals).

Conclusion

• Pour le moyen terme

La demande de sables siliceux destinés à l'industrie devrait, en volume, se stabiliser, voire baisser compte tenu de la part prise par le recyclage dans deux secteurs qui représentent actuellement 64 % de la consommation : la verrerie et la fonderie.

Cependant, en terme de qualité, la demande en sables extra-siliceux à basse teneur en fer et titane se maintiendra dans l'industrie du verre creux, du verre plat aussi bien que du verre technique. L'accès à des réserves en sables présentant naturellement ces qualités devra donc être maintenu, tant que les coûts des matières premières ne permettront pas la mise en oeuvre de procédés d'affinage sophistiqués.

Dans le domaine des ressources en roches massives destinées à l'industrie électro-métallurgique, des difficultés d'approvisionnement en ressource de haute pureté en silice et basse teneur en fer, titane et alumine risquent de se poser, en terme de volume et surtout de régularité de qualité, d'autant plus que les possibilités d'affinage sont limitées par les granulométries grossières requises. L'évolution de l'appareil de production pour s'adapter à des matières premières sous d'autres formulations ne peut s'envisager que dans le long terme compte tenu des investissements en jeux.

• Pour le long terme

L'avenir de l'utilisation de la silice naturelle pour l'industrie ne peut se concevoir sans prendre en compte la réglementation sanitaire et son évolution.

L'impact sur l'économie d'un bannissement de la consommation de tout produit contenant plus de 0,1 % de silice cristalline a été envisagé. Il est vite apparu que de tels seuils impliquant aussi les silicates, c'est l'économie tout entière qui serait affectée : le cabinet B.M. Coope et partners estime que 26 % de la consommation industrielle serait remise en cause et 8,3 % du P.N.B. européen.

Une telle mesure semble donc d'autant plus improbable que la silice naturelle reste irremplaçable aussi bien pour des raisons techniques qu'économiques comme agent vitrifiant ou source de silicium.

La substitution par des produits de synthèse est néanmoins envisageable dans des secteurs particuliers : le quartz piézo-électrique est depuis longtemps artificiellement "cultivé".

La silice synthétique parce qu'elle se présente sous forme amorphe, colloïdale ou de polymère ne constitue, en effet, pas un enjeu sanitaire, cependant elle ne trouve des applications que dans des domaines spécifiques et nécessite toujours le recours à une matière première siliceuse (sables).

La silice précipitée obtenue par réaction de l'acide chlorhydrique sur le silicate de soude (fabriqué à partir de sables) se caractérise par un grain très fin : (10 à 60 nanomètres), elle trouve des applications dans la chimie de spécialité en raison de son grand pouvoir réactif, mais aussi comme charge dans les caoutchoucs.

Références bibliographiques

- Astruc J-G. (1986) - Notice explicative. Carte géologique de la France à 1/50 000, Puy-l'Evêque. BRGM, 38 p.
- Benbow J. (1989) - Industrial silica sand. An operational review. *Industrial Minerals*, July 1989, p. 19-39.
- Berton Y., Le Berre P. (1983) - Sables industriels. Sables de verrerie et de fonderie. Guide de prospection des matériaux de carrière, *Manuels et méthodes*, n°5, BRGM, p. 127-134.
- BRGM (1997) - Estimation de la consommation française de matériaux de carrières et produits dérivés. Synthèse des travaux réalisés en 1997. Rap. BRGM R39705, 156 p., 10 fig., 2 tabl., 5 ann.
- Cavelier C. (1967) - Notice explicative. Carte géologique à 1/50 000, Creil. BRGM, 23 p.
- Clément J-P., Limasset J-C. (1976) - Substances utiles dans la région Pays-de-la-Loire. Rap. BRGM 76 SGN 002 BPL, 80 p.
- Damiani L. *et al.* (1967) - Notice explicative. Carte géologique à 1/50 000, Uzès. BRGM, 12 p.
- Debelmas J. *et al.* (1989) - Notice explicative. Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Moûtiers (751). BRGM, 53 p. Carte géologique par Debelmas J. *et al.* (1989).
- Denizot G. (1970) - Notice explicative. Carte géologique à 1/50 000, Fontainebleau. BRGM, 20 p.
- Dubreuilh J., Capdeville J-P. (1983) - Prospection générale des Landes de Gascogne. 1ère année : 1982-1983. Feuille de Soustons à 1/100 000. Rap. BRGM 83 SGN 878 AQI, 19 p. + annexes et carte hors texte.
- Fleury R., Le Berre P. (1987) - Cartographie et prospection de la Sologne. Programme 1986. Feuille Aubigny-sur-Nère. Recherche de gisements de roches et minéraux industriels. Rap. BRGM 87 SGN 005 GEO, 36 p. + annexes.
- Grès M. (1978) - Minéraux industriels de France. Rap. BRGM 78 SGN 270 MTX, 22 p.
- Grès M. *et al.* (1986) - Inventaire du territoire métropolitain. Intérêt économique et possibilités de valorisation des minéraux industriels en faibles teneurs dans les carrières de granulats. massif armoricain et Massif central nord. Rapport BRGM 86 SGN 585 GEO, 13 p. + annexes hors texte.
- Griffiths J. (1987) - Silica. Is the choice crystal clear ? *Industrial Minerals*, April 1987, n° 235, p. 25-43.
- Guillot P-L. *et al.* (1979) - Notice explicative, Carte géologique de la France à 1/50 000, Thiviers. BRGM, 60 p.

- Karnay G., Le Pochat G. (1986). Recherche de gisements de silice en roche dans la vallée des Aldudes (Pyrénées Atlantiques). Rap. BRGM 86 SGN 336 AQI, 21 p. + annexes.
- Maubert F. (1989) - La silice pour l'industrie. Mémento roches et minéraux industriels. Rap. BRGM 89 SGN 150 GEO, 66 p..
- Ménillet F. *et al.* (1970) - Notice explicative. Carte géologique de la France à 1/50 000, Hagueneau (198). BRGM, 48 p..
- Pickering S.N. *et al.* (1994) - Industrial Minerals and rocks 6th edition.
- Platel J-P. (1979) - Les ressources en sables industriels de la région Poitou-Charentes. Rap. BRGM 79 SGN 471 POC, 35 p. + annexes.
- Platel J-P. (1990) - Notice explicative, Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Tartas (950). Orléans : BRGM, 51 p. Carte géologique par Platel J-P. *et al.* (1990).
- Prax A. (1980) - Sables siliceux industriels (applications verrerie et fonderie). Mémento substances utiles. Rap. BRGM 80 SGN 909 MTX, 43 p..
- Rocher P. (1993) - Mémento Roches et Minéraux Industriels, la Silice. Rap. BRGM R37830 GEO SGN 93.

ORGANISMES PROFESSIONNELS

Centre Technique des Industries de la Fonderie - C.T.I.F.

44, avenue de la Division Leclerc

92310 Sèvres

Tél. 01 41 14 63 00

Fax 01 45 34 14 34

Chambre Syndicale des Verreries Mécaniques de France - C.S.V.M. de France

3, rue de la Boétie

75008 PARIS

Tél. 01 42 65 98 75

Fax 01 42 66 23 88

Fédération Chambres Syndicales des Minerais et des Métaux non ferreux

30, avenue de Messine

75008 PARIS

Tél. 01 45 63 02 66

Fax 01 45 63 61 54

SESSI - Service des Statistiques Industrielles

Direction Générale des Stratégies Industrielles des G.S.I.

Ministère de l'Environnement, des Finances et de l'Industrie

20, avenue de Ségur

75353 PARIS 07 SD

Tél. 01 43 19 41 08

Fax 01 43 19 41 73

Syndicat National des Producteurs de Silice pour l'Industrie

30, avenue de Messine

75008 PARIS

Tél. 01 45 63 02 66

Fax 01 45 63 61 54

ADRESSES DES SOCIÉTÉS EXPLOITANT DES RESSOURCES SILICEUSES EN FRANCE

CM Quartz Établissements MANGIEU

La Brousse
46150 St-Denis Catus
Tél. 05 65 22 79 95
Fax : 05 65 21 21 06

Denain Anzin Minéraux

4, avenue Vélasquez
75008 PARIS
Tél. 01 53 76 85 70
Fax 01 43 59 71 16

Fulchiron Industrielle S.A.

Chemin St Eloi
91720 MAISSE
Tél. 01 64 99 25 00
Fax 01 64 99 25 08

Grès et Sables Industriels - G.S.I.

4, rue Foljuif
77140 SAINT-PIERRE-LES-NEMOURS
Tél. 01 64 28 17 98
Fax 01 64 29 22 22

Kaolins d'Arvor

Kergantic
56270 PLOEMEUR
Tél. 02 97 86 16 16
Fax 02 97 86 16 11

Kaolins du Morbihan - Groupe Mineral Harwanne (G.M.H.)

Lanvrian
BP 49
56274 PLOEMEUR
Tél. 02 97 86 32 03
Fax 02 97 86 19 24

Péchiney Electrométallurgie

Tour Manhattan
92087 Paris La Défense Cedex
Tél. 01 47 62 28 00
Fax 01 47 74 82 36

Premier Réfractories International anc. - Les produits siliceux du Centre

Route de Vendoeuvres
BP 13
36500 BUZANCAIS
Tél. 02 54 02 25 25
Fax 02 54 02 18 10

QPB (Quartz de Pierre Blanche)

ZAC les Ribes
BP 34
63171 Aubière Cedex
Tél. 04 73 28 52 98
Fax 04 73 28 52 71

Quartz d'Alsace

13, rue de la Sablière
BP 40
Kaltenhouse
67242 BISCHWILLER CEDEX
Tél. 03 88 06 24 44
Fax 03 88 06 24 39

Quartzites de Meillers (CERF)

Bruyère Chaumiau
03210 Meillers
Tél. 04 70 47 23 20
Fax 04 70 47 24 92

SAMIN - Société d'Exploitation de Sables et Minéraux

9, Square Watteau
BP 4
92403 COURBEVOIE CEDEX 03
Tél. 01 46 91 98 46
Fax 01 43 34 81 87

SEMANAZ et Cie

107, quai du Rancy
94388 BONNEUIL-sur-MARNE Cedex
Tél. 01 43 39 52 00
Fax 01 49 80 31 89

SIFRACO - Compagnie Française des Silices et des Sables de Nemours

11, rue de Téhéran
75008 PARIS
Tél. 01 53 76 82 00
Fax 01 42 25 32 23 et 01 42 89 55 49

SIKA S.A. - Produits Minéraux Siliceux du Sud-Est

BP 2
26730 HOSTUN
Tél. 04 75 05 81 00
Fax 04 75 48 85 57

SILICE et KAOLIN

26300 Barbières
Tél. 04 75 47 44 88
Fax 04 75 47 49 13

SILMER S.A.

Rue Ancel de Caëu - BP 40
80410 CAYEUX-sur-MER
Tél. 03 22 26 61 00
Fax 03 22 26 59 24

SOCIETE NOUVELLE DU LITTORAL

Zone artisanale de Leucate
11370 LEUCATE
Tél. 04 68 40 14 05
Fax 04 68 40 92 72

BRGM
SERVICE MINIER NATIONAL
Département Ressources Minérales
BP 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX 2 - France - Tél. : (33) 02 38 64 34 34