



Mémento roches et minéraux industriels

Silice

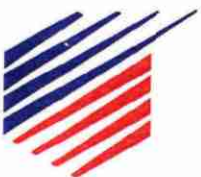
Ph. Rocher

novembre 1993
R 37830

Ministère de l'Industrie,
des Postes et Télécommunications
et du Commerce extérieur

Étude réalisée dans le cadre des
actions de Service public du BRGM

BRGM
SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL
Département Géologie
B.P. 6009
45060 ORLEANS CEDEX 2 - France
Tél : (33) 38 64 34 34



RESUME

La silice (SiO_2) d'origine naturelle utilisée industriellement sous forme de quartz, de tridymite ou de cristobalite, est le constituant essentiel ou unique de différents types de matériaux : sables extra-siliceux et silico-argileux, galets, quartzites, grès et quartz. Une très large majorité des matériaux siliceux consommés correspond à des sables quartzeux.

Les gisements les plus intéressants à valoriser sont représentés par des dépôts marins épicontinentaux qui ont connu au cours de leur formation un tri éolien. Les principales régions productrices françaises sont le Bassin de Paris (départements de Seine-et-Marne, de l'Oise et de l'Aisne notamment), le Sud-Est et le Sud-Ouest.

Les industries de la verrerie et de la fonderie sont les premières consommatrices de silice (45 % et 35 % respectivement en France). Les autres principaux domaines d'utilisation sont l'électrometallurgie, le bâtiment, la céramique, les charges minérales, les abrasifs et la filtration des eaux.

L'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord constituent les plus importants marchés de la silice au niveau international. La production européenne est dominée, d'un point de vue quantitatif et qualitatif, par quatre pays : Belgique, Allemagne, France et Pays-Bas. En 1992, notre pays a produit près de 7 Mt de matériaux siliceux, dont plus de 90 % de sables. Les importations de ces derniers s'élevaient à 404 kt, dont 62 % en provenance de Belgique, et les exportations à 1,155 Mt, principalement en direction de l'Italie (50 %) et de l'Allemagne (36 %). La consommation nationale apparente de silice était de l'ordre de 6,2 Mt en 1992.

Le marché de la silice est orienté à la baisse du fait d'une diminution de la demande, en verrerie et en fonderie notamment, et de l'absence d'un développement important dans les autres domaines.

TABLE DES MATIERES

1 - DEFINITIONS	7
1.1 - Minéralogie de la silice	7
1.2 - Matériaux siliceux	7
2 - GEOLOGIE ET GISEMENTS	10
2.1 - Contextes géologiques et genèse.....	10
2.2 - Méthodes de prospection des gisements de sables siliceux et de caractérisation des matériaux	11
2.3 - Critères d'exploitabilité des gisements de sables siliceux et de sélection des matériaux.....	13
2.4 - Gisements français.....	14
2.4.1 - Généralités	14
2.4.2 - Les sables et grès de Fontainebleau	18
2.4.3 - Les sables et grès de Beauchamp	18
2.4.4 - Les formations alluviales à galets de quartz de Saint-Denis-Catus (Lot)	19
2.4.5 - Le filon de quartz de Saint-Paul-la-Roche (Dordogne).....	19
2.4.6 - Autres exemples de gisements français.....	20
2.5 - Modes d'exploitation et de traitement des matériaux	21
3 - PROPRIETES PHYSIQUES ET CHIMIQUES	23
3.1 - Propriétés physiques.....	23
3.2 - Propriétés chimiques	25
4 - SECTEURS D'UTILISATION ET SPECIFICATIONS INDUSTRIELLES	27
4.1 - Généralités	27
4.2 - Verrerie.....	28
4.3 - Fonderie	31
4.4 - Electrometallurgie	33
4.5 - Bâtiment	35
4.6 - Autres utilisations.....	37

5 - ECONOMIE ET MARCHE	40
5.1 - Introduction	40
5.2 - Production mondiale	40
5.3 - Production française	41
5.4 - Importations. Exportations. Consommation française apparente	44
5.5 - Prix	46
6 - PRODUITS DE SUBSTITUTION	48
7 - REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	49

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 - Diagramme de stabilité des diverses formes de la silice en fonction de la pression et de la température.
- Fig. 2 - Carte de localisation des principaux gisements français de matériaux siliceux.
- Fig. 3 - Evolution de la production et de la consommation apparente de sables et grès siliceux en France entre 1983 et 1992.
- Fig. 4 - Répartition de la production française de silice par types de matériaux en 1992
- Fig. 5 - Répartition géographique de la production française de sables siliceux en 1992.
- Fig. 6 - Evolution des importations et des exportations françaises de sables siliceux entre 1983 et 1992.

LISTE DES TABLEAUX

- Tabl. 1 - Exemple de calcul de l'indice de finesse AFS d'un sable.
- Tabl. 2 - Caractéristiques des principaux gisements français de sables siliceux.
- Tabl. 3 - Propriétés physiques de quelques matériaux siliceux produits en France.
- Tabl. 4 - Caractéristiques granulométriques moyennes de quelques sables siliceux bruts exploités en France.
- Tabl. 5 - Compositions chimiques de quelques matériaux siliceux produits en France.
- Tabl. 6 - Teneurs en éléments en traces du quartz de Saint-Ouen-Sur-Gartempe (Haute-Vienne).
- Tabl. 7 - Spécifications relatives à la composition chimique des matériaux siliceux utilisés en verrerie.
- Tabl. 8 - Spécifications relatives à la granulométrie des matériaux siliceux utilisés en verrerie.
- Tabl. 9 - Spécifications relatives à l'indice de finesse et à la teneur en argiles des sables siliceux utilisés en fonderie.
- Tabl. 10 - Spécifications relatives à la composition chimique des matériaux siliceux utilisés en électrometallurgie.
- Tabl. 11 - Composition chimique et nature des matériaux siliceux utilisés en France en électrometallurgie.

Tabl. 12 - Spécifications concernant la composition chimique des matériaux siliceux utilisés en électrométallurgie au niveau international.

Tabl. 13 - Importations et exportations françaises de sables siliceux en 1992.

Tabl. 14 - Prix de quelques matériaux siliceux commercialisés en France en 1993.

1 - DEFINITIONS

1.1 - MINERALOGIE DE LA SILICE

La silice, ou dioxyde de silicium (SiO_2), constitue une famille de minéraux de type tectosilicates comprenant diverses variétés polymorphes : quartz, tridymite, cristobalite, coésite, stishovite, calcédoine, opale. Les conditions de stabilité de ces différentes espèces cristallines de la famille de la silice, en fonction de la pression et de la température, sont rappelées à la figure 1.

Dans la nature, la forme cristallisée de la silice la plus courante est le quartz qui se rencontre indifféremment dans les roches plutoniques, métamorphiques, volcaniques et sédimentaires. Il peut se présenter en cristaux xénomorphes limpides ou troublés par des inclusions, à cassure conchoïdale, ou bien en cristaux automorphes, prismatiques et souvent bipyramidés, à éclat vitreux. La tridymite et la cristobalite, variétés de plus haute température, se rencontrent dans certaines laves riches en silice où elles constituent les derniers produits de cristallisation des magmas.

La coésite et la stishovite, formes de très haute pression, sont rares à l'état naturel (impactites).

La calcédoine et l'opale sont des produits de concrétionnement de la silice en contexte sédimentaire (silex, chert,...) ou igné (nodule d'agate, remplissage de vacuoles). La calcédoine est une variété de silice à structure fibreuse constituée de cristallites de quartz α empilés les uns sur les autres. L'opale, d'aspect amorphe, est formée de cristallites de cristobalite et de tridymite désordonnées. Elle compose, associée au quartz et à la calcédoine, le silex qui est une roche siliceuse d'origine biochimique.

1.2 - MATERIAUX SILICEUX

La silice utilisée industriellement correspond à différents types de matériaux naturels caractérisés par une importante teneur en SiO_2 . On en distingue habituellement deux catégories :

- la silice "en grains", provenant de formations géologiques meubles d'origine détritique, et comprenant les sables siliceux (anciennement dénommés "sables industriels") et les galets ;
- la silice "en roches", correspondant à des roches massives ou consolidées de types quartz, quartzites ou grès hyper-siliceux.

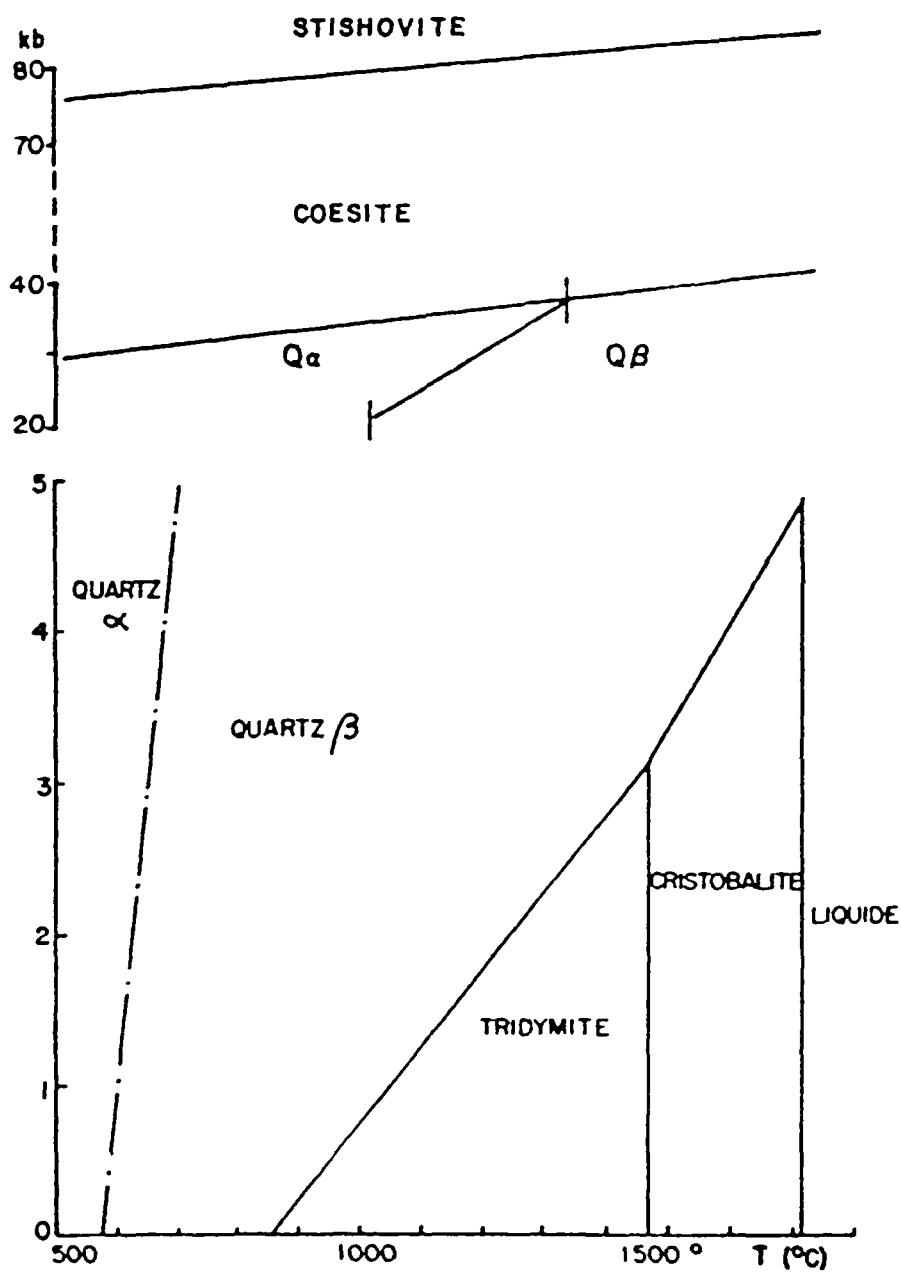


Fig. 1 - Diagramme de stabilité des diverses formes de la silice en fonction de la pression et de la température (d'après Tuttle et Bowen, 1958).

Selon qu'ils sont ou non mélangés avec d'autres minéraux issus de l'altération continentale, les sables sont subdivisés en deux groupes :

- les sables extra-siliceux, exceptionnellement riches en silice, qui comprennent, suivant leurs compositions minéralogiques, trois types de matériaux :
 - les sables siliceux purs ($\text{SiO}_2 > 99 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,02 \%$) utilisés en cristallerie, verrerie optique, miroiterie et céramique fine ;
 - 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 verrerie, en fonderie, en filtration, en céramique classique et comme abrasifs ;
 - les sables siliceux maigres ($\text{SiO}_2 : 95-97 \%$) consommés en fonderie, aciérie et à la rigueur en verrerie.
- les sables silico-argileux, dont la teneur en silice varie de 75 à 92 %, essentiellement utilisés en fonderie et pour la confection des pisés réfractaires en métallurgie.

La silice dite ultra-pure ($\text{SiO}_2 > 99,9 \%$) correspond à des matériaux de type quartz filonien pur ou quartz pegmatitique.

Ces différentes substances contiennent naturellement de hautes teneurs en silice ou sont lavées et épurées pour atteindre un degré de pureté élevé.

La production française des matériaux siliceux susmentionnés concerne pour une très large majorité les sables, et en quasi totalité la forme minéralogique du quartz. Cependant, il convient de noter l'existence d'une production de cristobalite et de tridymite qui est réalisée, sous l'effet de la température, à partir de galets de mer siliceux (quartz cryptocristallin et silice amorphe). La calcination à basse température produit de la calcédoine, utilisée pour la faïencerie anglaise en particulier. A une température de l'ordre de 900-1100° C, on obtient un produit dans lequel prédomine la tridymite (jusqu'à 45 % de cristobalite). A température élevée (1450 à 1600°C), le produit final est composé principalement de cristobalite (80 à 90 %), la tridymite représentant le complément.

Le présent document ne prend pas en compte :

- les roches sédimentaires siliceuses d'origine biologique telles que les diatomites ou les spongolites ;
- les formations alluvionnaires (sables, sablons,...) et les roches massives (grès, quartzites,...), parfois riches en silice, qui sont utilisées, après calibrage, comme sources de granulats dans les secteurs du bâtiment et des travaux publics.

2 - GEOLOGIE ET GISEMENTS

2.1 - CONTEXTES GEOLOGIQUES ET GENESE

Le quartz, forme minérale la plus courante de la silice, est un constituant essentiel de certaines roches plutoniques (granites) et métamorphiques (granulites, gneiss). Du fait de sa résistance chimique et physique, il est communément concentré durant les processus d'altération et d'érosion qui affectent ces roches, ce qui aboutit à la formation de sédiments détritiques qui sont le plus souvent des sables, éventuellement des galets et des grès.

Les sables siliceux se rencontrent dans des sédiments meubles ou faiblement consolidés d'origine marine, lacustre, fluviale ou éolienne.

Un sable (ou un grès, ou un niveau de galets) extra-siliceux "mature" est composé d'un matériel qui a subi un transport fluviale dans une première phase, puis des processus intenses de redistribution et de sélection (par des agents tels que les eaux marines côtières ou le vent) durant une longue période, avec remobilisation éventuelle de tous les minéraux à l'exception du quartz. La plupart de tels sables ou de tels grès sont probablement des sédiments d'une seconde ou troisième génération, et sont issus de sables et grès moins purs déposés lors d'un cycle sédimentaire plus ancien.

Le dépôt de formations telles que les argiles, marnes et calcaires à la fin du cycle géologique permet de protéger les sables de l'érosion.

Les sables extra-siliceux se rencontrent :

- fréquemment dans les formations marines épicontinentales. Ces matériaux sont les plus intéressants industriellement, représentent des réserves considérables mais sont hétérogènes en ce qui concerne la granularité et la composition chimique ;
- dans les formations sédimentaires continentales :
 - sur le littoral où les dunes constituent d'importantes réserves homogènes, de bonne qualité, mais également des milieux sensibles d'un point de vue environnemental ;
 - dans les alluvions des rivières où ils sont peu fréquents, peu volumineux et où les sables contiennent fréquemment des graviers et des fines argileuses (bonnes qualités industrielles rares) ;
- couramment dans les massifs de roches granitiques, associés à la kaolinite et aux micas, du fait de la décomposition sur place des roches. Il s'agit de petits gisements locaux souvent très impurs qui peuvent néanmoins être valorisés industriellement en tant que sous-produits des kaolins.

Les quartzites peuvent être sédimentaires (orthoquartzites), provenant de la cimentation d'un grès, par diagenèse ou sous l'action de phénomènes hydrothermaux ; ou métamorphiques (métaquartzites). Dans ce dernier cas, elles sont issues de la recristallisation d'un grès, d'une radiolarite ou d'un filon de quartz.

Les conditions de formation de quelques gisements français de matériaux siliceux sont précisées au paragraphe 2.4.

2.2 - METHODES DE PROSPECTION DES GISEMENTS DE SABLES SILICEUX ET DE CARACTERISATION DES MATERIAUX

Pour 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.
- Essais sur les matériaux :
 - Etude de la granularité : détermination de la courbe granulométrique et de l'indice de finesse (tabl. 1).
 - Etude minéralogique : examen à la loupe binoculaire, séparation des minéraux lourds par liqueurs denses.
 - Calcimétrie sur quelques échantillons.
 - Analyses chimiques dans le cas des sables pour verrerie :
 - . détermination des teneurs en SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O et de la perte au feu sur quelques échantillons de sables lavés ;
 - . dosage systématique de Fe_2O_3 et calci-dolomimétrie si nécessaire ;
 - . 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.

Soit : M la masse du prélèvement séché 100 g
 M₁ la masse résiduelle après lavage et séchage 78 g
 M₂ = 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.

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 (M ₁)	78,00 M ₁		5 375,20
Indice de finesse AFS $\frac{(P)}{R} : \frac{5\,375,20}{78,00} = 68,9$ arrondi à 69				

(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 % pres).

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

Tabl. 1 - Exemple de calcul de l'indice de finesse AFS d'un sable.

2.3 - CRITERES D'EXPLOITABILITE DES GISEMENTS DE SABLES SILICEUX ET DE SELECTION DES MATERIAUX

La taille des gisements de sables 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. Cependant, compte tenu des contraintes économiques (approvisionnement des secteurs de consommation, investissements liés aux installations de traitement des matériaux), la prospection doit être orientée vers des gisements dont les réserves minimales sont de 1 à 2 Mt (Berton et Le Berre, 1983).

Les sables siliceux sont toujours exploités à ciel ouvert. L'épaisseur des niveaux sableux exploitables est elle aussi très 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 ($\leq 1/3$), 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. 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 opéré 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 ;
- 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.

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.

2.4 - GISEMENTS FRANCAIS

2.4.1 - Généralités

La carte de la figure 2 répertorie les principaux gisements français de matériaux siliceux actuellement exploités.

Les plus importantes régions productrices de sables siliceux, en termes de bassins de production et de départements concernés, sont les suivantes :

- Sud Picardie : Oise, Aisne ;
- Centre Bassin de Paris : Seine-et-Marne, Essonne, Eure-et-Loir, Val-de-Marne ;
- Sud-Est : Vaucluse, Drôme, Gard, Isère ;
- Sud-Ouest : Gironde, Lot-et-Garonne, Charente-Maritime, Landes ;
- Alsace : Bas Rhin.

Les sables siliceux exploités en France sont des sables s.s., extra-siliceux et silico-argileux, et également des matériaux associés géologiquement aux kaolins, qu'il s'agisse de gîtes secondaires (Drôme) ou de gîtes primaires (Bretagne). Le tableau 2 synthétise les caractéristiques des principaux gisements français de sables siliceux.

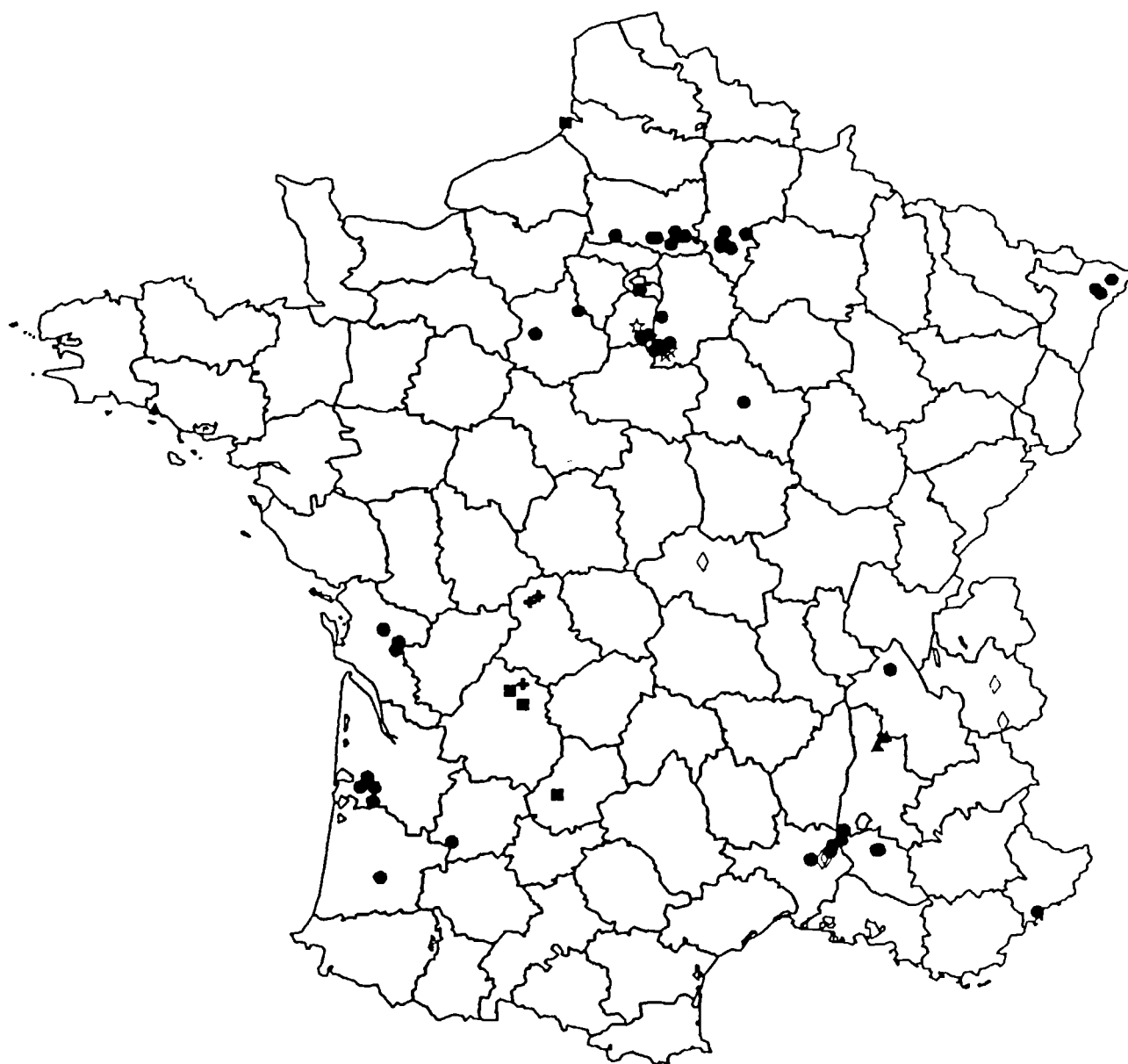
Les grès sont produits dans l'Essonne et la Seine-et-Marne ; les galets en Dordogne, dans le Lot et dans la Somme ; les quartzites dans le Gard, la Savoie et l'Allier. Le quartz (silice ultra-pure) est extrait dans les départements de Haute-Vienne et de Dordogne.

La France possède, notamment dans le Bassin de Paris, avec la Belgique, les plus importantes réserves en sables extra-siliceux de qualité en Europe.

Les ressources nationales, géologiques et exploitables, n'ont pas fait l'objet d'une estimation globale et précise.

Certaines d'entre elles ne sont pas valorisées industriellement faute de débouchés commerciaux dans les domaines de la verrerie et de la fonderie en particulier. Des données parcellaires chiffrées ont été avancées en ce qui concerne les réserves situées dans des régions où les sables siliceux sont actuellement exploités (Grès, 1978) :

- sables de Beauchamp (Sud Picardie) : 100 Mt ;
- sables de Fontainebleau (Seine-et-Marne, Essonne) : > 80 Mt ;
- sables de la Drôme : 10 Mt.



LEGENDE

- | | | | |
|---|--------------------------------------|---|----------------------------|
| ● | Sables siliceux | ■ | Golets siliceux |
| ▲ | Sables siliceux associés aux kaolins | ◇ | Quartzites |
| ☆ | Grès | ◆ | Quartz (silice ultra-pure) |

Fig. 2 - Carte de localisation des principaux gisements français de matériaux siliceux.

REGIONS	DEPARTEMENTS	CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	GRANULOMETRIE	CARACTERISTIQUES CHIMIQUES ET MINERALOGIQUES	AUTRES PARTICULARITES	PRINCIPALES UTILISATIONS		
						FONDERIE	VERRERIE	AUTRES
SUD-EST	DROME	- Sable argileux - Sable anguleux - Granulométrie étalée	0 - 5 mm	- Forte teneur en kaolin - Forte teneur en alumine	- Nécessite un lavage et un tamisage important			Filtration Décapage des pièces métalliques Enduit du bâtiment
	VAUCLUSE		AFA : 50/70	Fe ₂ O ₃ = 300 ppm		Acier	Verre bouteille	
SUD-OUEST	- CHARENTE-MARTIME - GIRONDE - LOT-et-GARONNE	- Sable poreux - Granulométrie étalée et grossière	AFA : 40/65	Fe ₂ O ₃ > 300 ppm	- le noyautage nécessite une quantité importante de résine - s'empoussière très vite	Moulage	Verre d'emballage mi-blanc et coloré	Mortiers industriels
ALSACE	BAS-RHIN	- Sable poreux et gréseux - Hygroscopique		- Forte teneur en CaCO ₃ - Forte teneur en Fe ₂ O ₃	- grand pouvoir absorbant au point de vue résine	Impropre à la fonderie	Verre coloré	
BASSIN	EURE-et-LOIR	- Sable très fin	AFA : 80/140			Alliages cuivreux Alliages légers		Enduits Peintures Mortiers
	ESSONNE	- Sable très fin	AFA : 75/100			Alliages non ferreux Fonte pour pièces fines		Enduits Peintures Mortiers
PARISIEN	SEINE-et-MARNE	- Sable fin - Sable pur	AFA : 65/70 ou 55/70	Fe ₂ O ₃ = 100/150 ppm	- deux qualités de sable : Sable de Nemours et Sable de Bourron-Marlottes	Acier Fonte Alliages non ferreux	Verre extra blanc Flaconnage Parfumerie Optique - Cristal Verre culinaire	
	AISNE	- Grains ronds	AFA : 55/60 70/80	- Contient un peu de matière organique Fe ₂ O ₃ = 150/200 ppm	- Teneur en Fe ₂ O ₃ et Al ₂ O ₃ régulière après traitement	Acier Fonte	Verre d'emballage mi-blanc et coloré Verre imprimé	Abrasif
	OISE	- Grains ronds - Peu de refus à 315 µm - Peu de passant à 80 µm	AFA : 50/55 55/60 60/65	- Fe ₂ O ₃ = 90/170 ppm Très basse teneur en minéraux infusibles	- Teneur en Fe ₂ O ₃ et Al ₂ O ₃ régulière après traitement	Fonte automobile (blocs moteurs culasses) Fonte	Glace Verre à vitre Verre d'emballage blanc et demi-blanc Isolateurs	Silicates Détergents Savonnerie Enduits

Tabl. 2 - Caractéristiques des principaux gisements français de sables siliceux

En région parisienne, en particulier, se posent de graves problèmes fonciers, de grandes exploitations de sables et grès siliceux voyant l'avancement de leurs travaux d'extraction compromis par l'existence de petites parcelles enclavées dans leurs terrains. Afin d'y remédier, l'Etat a appliqué l'article 109 du code minier, instituant une zone spéciale de recherches et d'exploitation de carrières de sables et grès industriels (décret du 10 mai 1966). Cette zone 13, dite "de Nemours", concerne différentes communes de l'arrondissement de Melun dans le département de Seine-et-Marne.

Quelques exemples d'autres formations géologiques constituant des gisements potentiels d'importance notable peuvent être mentionnés :

*** Sables siliceux :**

- Sud des départements de Charente et de Charente-Maritime : sables du Cénomanién inférieur et supérieur, du Coniacien inférieur (exploités dans la vallée du Coran) et du Santonien supérieur. Le volume total des ressources en sables de ces quatre formations marines littorales a été estimé à environ 300 Mm³ (Platel, 1979).
- Landes de Gascogne : "graviers d'Arengosse" (sables assez fins siliceux à ciment kaolinique, épais de 5 à 7 m en moyenne ; indice de finesse AFS = 70) et "sables de Castets" (Dubreuilh et Capdeville, 1983).
- Sud du département des Landes : "sables supérieurs" du système deltaïque landais, fluviatiles, épais, bien classés et presque uniquement quartzueux (Platel, 1990).
- Secteur de la Petite Sauldre (Sologne) : sables alluvionnaires quaternaires, épais d'environ 10 m, dont la teneur en quartz varie de 89 à 98 % (Fleury et Le Berre, 1987).
- Régions de Saumur et de Tiercé (Maine-et-Loire) : sables siliceux blancs représentant d'importants volumes (Clément et Limasset, 1976).
- Parties sud et est de la forêt de Haguenau (Alsace) : sables pliocènes à grain relativement grossier, très riches en silice (Menillet et al., 1970).

*** Quartzites :**

- Massif Armoricaín : quartzites blancs exploités pour produire des granulats, caractérisés par des teneurs en silice supérieures à 95 % et par de faibles teneurs en fer (Grès et al. 1986).
- Vallée des Aldudes (Pyrénées Atlantiques) : quartzites siégéniens présentant d'importants volumes, de bonnes conditions d'exploitabilité et des teneurs en silice supérieures à 97 % (Karnay et Le Pochat, 1986).

Les gisements français de silice ultra-pure (quartz) sont en cours d'épuisement. Deux des trois sites actuellement en exploitation, situés en Dordogne et en Haute-Vienne, cesseront définitivement toute activité à la fin de l'année 1994.

Nous allons à présent passer en revue quelques exemples de gisements français de matériaux siliceux actuellement exploités en précisant pour chacun d'entre eux le contexte géologique, les conditions de formation et les caractéristiques des matériaux.

2.4.2 - Les sables et grès de Fontainebleau

Le Stampien (Oligocène) marque la dernière incursion importante de la mer vers le Sud et l'Est du Bassin Parisien. Il est formé à sa base de marnes à huîtres, surmontés par les sables dits de Fontainebleau dont la puissance maximale peut atteindre 75 m. Ces sables comportent, à leur partie supérieure principalement, les "Grès de Fontainebleau" qui constituent des dalles de plusieurs mètres d'épaisseur, caractérisées par leur allongement général suivant une direction WNW-ESE, localement E-W à l'Est de Paris. A la fin du Stampien, les sables laissés à sec par le retrait de la mer sont remaniés par les vents qui construisent ainsi des dunes aux crêtes parallèles séparées par des chenaux marécageux. Les régions interdunaires sont alors envahies par des eaux douces ou saumâtres qui déposent des limons et des marnes, alors que sur les flancs des dunes, et surtout à leur crête, les sables se consolident par évaporation de l'eau de la nappe, d'où la formation des faciès gréseux.

Les sables de Fontainebleau, d'âge stampien inférieur et moyen, constituent donc une formation marine à l'origine ayant subi un remaniement éolien ultérieur. Elle est considérée comme le meilleur gisement européen de sables siliceux, avec celui de Mol en Belgique, et s'étend de Nemours à Etampes et Dourdan sur près de 50 km, au Sud de Paris, dans les départements de la Seine-et-Marne et de l'Essonne.

Dans toute la Forêt de Fontainebleau, cette formation sableuse apparaît homogène et stérile, atteint 55 à 60 m d'épaisseur et repose en concordance sur le Calcaire de Brie (Denizot, 1970).

Les sables de Fontainebleau sont remarquables par leur pureté et leur granulométrie homogène. D'une façon générale, ils sont blancs, fins (médiane : 0,10 à 0,15 mm), bien classés et très riches en silice (95 à 99 % et plus). Le quartz hyalin est accompagné le plus souvent d'argiles et de minéraux lourds (rutile, tourmaline, zircon, disthène). Localement, les sables peuvent être colorés en jaune-ocre (oxydes de fer) ou en violet (oxydes de manganèse).

Des grésifications apparaissent à la base et surtout au sommet des sables stampiens. Ces grès siliceux, dont l'épaisseur atteint 6 à 8 m, sont caractéristiques de grès-quartzites constitués essentiellement de grains de quartz de dimension homogène à texture en mosaïque, entièrement nourris et très durs, de densité 2,7. Cette transformation, qui apparaît originelle, a pu être imparfaite, laissant subsister une certaine porosité (Denizot, 1970).

2.4.3 - Les sables et grès de Beauchamp

Les sables dits "de Beauchamp", d'âge auversien (Bartonien inférieur/Eocène), 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.

Dans le Vexin oriental, l'Auversien, épais de 20 à 25 m, montre au sommet une table de "Grès de Beauchamp" reposant sur des sables de différente nature (bruns humifères,...). L'ensemble des données sédimentologiques et faunistiques indique un dépôt sableux 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'épalaient des lagunes continentales à sédimentation carbonatée et faune d'eaux dessalées. Dans le Valois occidental, la série complète est composée des Grès de Beauchamp (résultant de la podzolisation) et de sables noirs au sommet, reposant sur des sables

blancs (sables de Fleurines), assez fins, qui portent les traces d'un remaniement éolien (Cavelier, 1967).

Il s'agit donc d'une formation qui a connu des conditions de dépôt très comparables à celles des sables de Fontainebleau. Sa puissance varie de 15 à 45 m et elle s'étend de Senlis à Reims, sur près de 100 km, au Nord de Paris, dans les départements de l'Oise, de l'Aisne et de la Marne.

Les sables de Beauchamp sont blancs, parfois jaunâtres lorsqu'ils ont été contaminés par des infiltrations quaternaires, très siliceux (quartzueux, légèrement argileux et calcaires), bien classés, parfois grossiers mais souvent très fins (médiane : 0,14 mm). Ils peuvent comporter des niveaux humifères, localement grésifiés, exceptionnellement ligniteux, correspondant à des paléosols formés au moment de l'émersion post-auversienne.

2.4.4 - Les formations alluviales à galets de quartz de Saint-Denis-Catus (Lot)

Les formations alluviales de Saint-Denis-Catus témoignent du passage d'un grand fleuve ou d'un oued divaguant, traversant le plateau quercynois et s'écoulant du N-NE en direction du Sud, son "estuaire" se situant au droit de Cahors dans le "golfe" de Cieurac. Parfois, des argiles à illite de l'Oligocène s'intercalent entre des séquences fluviatiles à galets et graviers.

Ces formations alluviales oligocènes, épaisses de 40 m en moyenne, sont composées de :

- galets de quartz, sables grossiers et argiles vertes au sommet ;
- galets de quartz, sables grossiers et galets mous de kaolin à la base.

Elles comblent un couloir d'érosion (paléovallée), traversant la région de Puy-l'Evêque selon un axe NW-SE, entre Lavercantière et Cahors. Des karstifications, antérieures au comblement, taraudent le fond et les flancs de ce couloir et sont responsables des variations brutales d'épaisseur du remplissage "alluvial". La base de ces formations est constituée localement par 70 à 80 m de gros galets (20 cm), de graviers et de sables à stratifications obliques et entrecroisées.

Ce matériel alluvial est composé à 99 % par du quartz enfumé, gris à blanc laiteux, d'origine filonienne ou d'exsudation (Astruc, 1986).

2.4.5 - Le filon de quartz de Saint-Paul-la-Roche (Dordogne)

Dans le département de la Dordogne, près du village de Saint-Paul, au lieu-dit la Roche, une petite carrière est ouverte dans une masse de quartz de couleur blanc laiteux exploitée en raison de sa grande pureté. La roche se distingue des quartz communs rencontrés dans les amas siliceux de remplissage de fractures tardives ou des quartz d'exsudation, et se montre exceptionnelle à divers égards.

Le gisement de forme lenticulaire se situe dans la partie sud des leptynites de l'arc de Saint-Yrieix, à proximité des micaschistes du groupe de la Dronne. Les épontes du quartz ne peuvent être observées car masquées par des éboulis naturels ou par des déblais d'exploitation. La texture

des roches observables à proximité de la carrière exclut l'hypothèse autrefois formulée d'un impact météoritique.

L'exploitation montre que le gisement n'est pas homogène. A l'intérieur de la masse du quartz, qui présente son aspect habituel à cassure conchoïdale, existent des zones particulières où la roche est découpée par trois familles de plans parallèles. Ces réseaux, de densité et de fréquence variables, constituent des plans de fissilité qui tendent à débiter le quartz en polyèdres rhomboédriques. En dehors de ces quartz "clivés", l'exploitation a mis à jour des prismes hexagonaux aux faces bien individualisées.

L'origine du quartz de Saint-Paul-la-Roche semble directement liée à des processus métamorphiques comme l'indiquent son gisement intra-schisteux et la présence de dislocations organisées dues à la cristallisation sous contrainte tectonique (Guillot et al., 1979).

2.4.6 - Autres exemples de gisements français

*** Sables kaoliniques de la Drôme (Eocène)**

Cette formation continentale est composée de sables kaoliniques dont la teneur en kaolin est de l'ordre de 12 %. Elle s'étend sur le versant ouest du Vercors sur près de 20 km, au Sud de la vallée de l'Isère, et s'organise en une succession de "poches" adossées aux calcaires urgoniens très fortement redressés.

Sa puissance est d'environ 50 m et peut atteindre 100 m.

*** Sables du Vaucluse (Albien/Cénomaniens, Crétacé)**

Il s'agit d'une formation marine constituée de sables quartzeux fins qui correspondent à un faciès d'altération du Cénomaniens sablo-gréseux glauconieux ("sables ocreux" et "sables blancs"). Elle a une puissance de l'ordre de 50 m et elle s'étend sur le flanc sud du Mont Ventoux dans la région de Bédoin et de Mormoiron.

*** Sables de Saint-Césaire (Coniacien inférieur, Crétacé)**

Ces sables quartzeux fins de la partie nord-ouest du Bassin Aquitain caractérisent une formation marine et correspondent à des "chenaux" étroits (quelques centaines de mètres de largeur), longs de quelques kilomètres, situés au sein d'une série détritique grossière, plus ou moins carbonatée. A Saint-Césaire (Charente-Maritime), dans la vallée du Coran, leur puissance maximale est de 12 m.

*** Sables des Landes (Quarternaire)**

Cette formation continentale, qui a connu un important remaniement éolien, se compose de sables quartzeux fins dont la pureté est comparable à celle des sables exploités dans la région parisienne. D'une puissance de 25 à 30 m, elle possède une grande extension à l'Ouest de Bordeaux et est exploitée dans la région de Marcheprime (Gironde).

*** Quartzites de la région de Moûtiers (Trias inférieur)**

Ces quartzites blancs, d'une puissance de 200 à 300 m, sont purs, massifs à bien stratifiés et passent à leur base au Permo-Trias. Ils sont exploités en amont de Moûtiers (Savoie), en rive gauche de l'Isère. Cette formation est interprétée comme une série marine de très faible profondeur marquant le début de la grande transgression triasique et remaniant un matériel d'origine éolienne (Debelmas et al., 1989).

*** Quartzites de la région d'Uzès (Cénomanién inférieur)**

Des grès-quartzites blancs (orthoquartzites) à très haute teneur en silice (99 %), parfois ferrugineux, constituant des barres résistantes à l'érosion, sont bien développés sur les flancs sud des synclinaux de la région d'Uzès (Gard). Leur formation est liée à la transgression cénomaniénne. Leur épaisseur est importante (80 à 120 m) dans le bassin de la Capelle et de la Tave, et extrêmement réduite (3 à 10 m) dans les secteurs de Serviers et de Labaume (Damiani et al., 1967).

2.5 - 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.

Ces derniers dépendent bien évidemment des caractéristiques intrinsèques des substances brutes et 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 $\leq 100 \mu\text{m}$ 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 $30 \mu\text{m}$.

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

Les eaux de lavage sont rejetées dans des bassins de décantation où les matières en suspension les plus fines ($< 0,10 \text{ mm}$), 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 $< 80 \mu\text{m}$ (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).
- 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 siliceux peuvent faire l'objet d'un tri manuel ;
- la silice ultra-pure de type quartz, abattue à l'explosif et pouvant être triée manuellement, est épurée 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.

3 - PROPRIETES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

3.1 - PROPRIETES PHYSIQUES

D'une manière générale, la silice est une substance qui présente les propriétés physiques suivantes :

- réfractarité (résistance pyroscopique équivalente à 1500°C au minimum), sa température de fusion étant de l'ordre de 1600°C ;
- inertie chimique vis-à-vis de la plupart des acides ;
- pH neutre ;
- densité voisine de 2,2 ;
- dureté de 7 sur l'échelle de Mohs ;
- pouvoir isolant élevé : $\alpha = 1,5 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ à 20°C ;
- coefficient de dilatation thermique très faible : $\alpha = 0,5 \times 10^{-6}$ de 20° C à 1000°C .

Les cristaux de quartz naturel (silice ultra-pure) sont utilisés dans l'industrie depuis que leurs propriétés piézoélectriques sont connues. Ils présentent également des propriétés optiques intéressantes.

Les données chiffrées relatives aux principales propriétés physiques de quelques matériaux siliceux produits en France sont répertoriées dans le tableau 3.

Le tableau 4 indique par ailleurs les caractéristiques granulométriques moyennes de quelques sables siliceux bruts exploités dans notre pays.

Types de matériaux	D max (μm)	Indice de finesse AFA
Sables de Beauchamp (Picardie)	400-500	50-70
Sables de Fontainebleau	300-400	50-70
Sables du Vaucluse	500	
Sables de Saint-Césaire (Charente-Maritime)	500-600	35-45

Tabl. 4 - Caractéristiques granulométriques moyennes de quelques sables siliceux bruts exploités en France (d'après Prax, 1980).

REFERENCES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Masse volumique réelle (g/cm ³)	2,65	2,65	2,65	2,65	2,60	2,60		2,70	2,65	2,65	2,70	2,65	2,25-2,28
Masse volumique apparente sur sable sec (g/cm ³) nt : non tassé ; t : tassé	1,50	1,06	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,50	nt : 1,20 t : 1,45	nt : 1,54 t : 1,58	1,50	1,10 (< 150µm)
Indice de finesse (AFS ou AFA)	62		70	62			48		48	118			
Equivalent de sable					> 98	> 98							
Humidité (%)	2,8 + 0,3	< 0,05	< 0,1				0,1	< 0,1			< 0,1		< 0,2
Reprise d'eau à 65 % d'humidité relative (%)										0,04			
Point de fusion (°C)				1750	1450	1730		1750	1750	1750	1700		1713
pH		7-8		7	7,5	7,5		7	7	7,5	7,5		7-8
Dureté (Mohs)		7		7	7	7		7	7		7	7	7
Indice de réfraction		1,54-1,55											1,48
Surface spécifique (cm ² /g)		1800-2200		146	190	300			100				
Coefficient d'angulosité des grains				1,10	1,25	1,20			1,10				
Blancheur (1) "Gardner" (2) Leroux		73-78(1)											98° (2)

Références :

- | | |
|---|--|
| 1 - ROLD ; sable extra-siliceux, lavé, "déwateré" ; Rozet Saint-Albin (Aisne) | 8 - BSX 1/2,2 ; sable pour filtration ; Mios (Gironde) |
| 2 - C5 ; farine de quartz provenant d'un sable ; Compiègne (Oise) | 9 - BE01 ; sable siliceux ; Bédoin (Vaucluse) |
| 3 - RX130 LS ; sable extra-siliceux, lavé, séché ; Roncevaux (Seine-et-Marne) | 10 - 70 - 270 ; sable extra-siliceux, lavé, séché, dépoussiéré ; Hostun (Drôme) |
| 4 - NE03 ; sable siliceux ; Nemours (Seine-et-Marne) | 11 - G2 ; sable extra-siliceux, lavé, séché ; Rochefort-Samson (Drôme) |
| 5 - 6FL ; sable siliceux ; Maisse (Essonne) | 12 - Quartz massif filonien (silice ultra-pure) ; St Ouen-sur-Gartempe (Haute-Vienne) |
| 6 - BDF ; sable siliceux ; Gallardon (Eure-et-Loir) | 13 - Cristobalite (teneur : 85-90 %) produite à partir de galets de mer ; Cayeux-sur-Mer (Somme) |
| 7 - MCH FS ; sable siliceux ; Marcheprie (Gironde) | |

Tabl. 3 - Propriétés physiques de quelques matériaux siliceux produits en France

3.2 - PROPRIETES CHIMIQUES

Mise à part la teneur en silice, qui peut atteindre et même dépasser 99,80 % pour les sables, les matériaux siliceux recèlent d'autres éléments qui témoignent de la présence de composants autres que les minéraux de la silice. Ces éléments mineurs ou en traces peuvent avoir une importance prépondérante pour certaines applications. Ordinairement, les minéraux associés au quartz dans les sables siliceux sont les argiles (kaolinite principalement), les feldspaths, les micas, la glauconie, la magnétite, l'ilménite et des minéraux lourds de différente nature. Les compositions chimiques de quelques produits siliceux français, après traitement, sont consignées dans le tableau 5, et les teneurs en éléments en traces du quartz massif filonien (silice ultra-pure : $\text{SiO}_2 > 99,9 \%$) exploité dans le gisement de Saint-Ouen-sur-Gartempe (Haute-Vienne) sont précisées dans le tableau 6.

Fe	Al	Ti	Na	K	Mg	Ca	Mn	Cr	Co	Ni	B
3	105	11	28	7	1,3	1	1	1	3	2	< 0,1

Teneurs élémentaires moyennes en ppm

Tabl. 6 - Teneurs en éléments en traces du quartz de Saint-Ouen-sur-Gartempe (Haute-Vienne).

Références	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SiO ₂	99,35	> 99,3	99,70	> 99,85	98,60	99,00	98,10	98,70	> 99,8	99,19	99,0	98,90	99,03
Fe ₂ O ₃	0,03	< 0,029	0,013	< 0,012	0,05	0,04	0,06	0,04	< 0,018	0,14	0,10	0,06	0,07
Al ₂ O ₃	0,20	< 0,30	0,05	< 0,08	0,80	0,50	1,10	0,63	< 0,12	0,26	0,30	0,30	0,18
CaO	0,03	< 0,023	0,03	< 0,015	0,02	0,02	0,04	0,05	traces	0,14	< 0,15	0,01	0,51
MgO	0,01		0,02				0,02	0,05		0,15		< 0,01	0,11
Na ₂ O	0,03		0,02				0,07	0,20		0,08	< 0,15	< 0,01	0,07
K ₂ O	0,10	< 0,27	0,02	< 0,023	0,50	0,25	0,35		traces	0,07		0,03	0,03
TiO ₂	0,02	< 0,022	0,025	< 0,022	0,06	0,07	0,035	0,02	< 0,018	traces		0,20	
Perte au feu	0,20	≤ 0,10	0,12	≤ 0,1	0,20	0,20	0,20	0,21	≤ 0,15	0,02	0,10		< 0,20

Données en % pondéraux

Références :

- | | |
|--|--|
| 1 - ROLD ; sable extra-siliceux, lavé, "déwateré". Rozet Saint-Albin (Aisne) | 9 - BEO1 ; sable siliceux ; Bédoin (Vaucluse) |
| 2 - C5 ; farine de quartz provenant d'un sable. Compiègne (Oise) | 10 - 70 270 ; sable extra-siliceux, lavé, séché, dépoussiéré ; Hostun (Drôme) |
| 3 - RX 130 LS ; sable extra-siliceux, lavé, séché ; Roncevaux (Seine-et-Marne) | 11 - G2 ; sable extra-siliceux, lavé, séché ; Rochefort-Samson (Drôme) |
| 4 - NE03 ; sable siliceux ; Nemours (Seine-et-Marne) | 12 - Quartzite pour électrometallurgie, composition moyenne ; Meillers (Allier) |
| 5 - 6 FL ; sable siliceux ; Maisse (Essonne) | 13 - Cristobalite (teneur : 85-90 %) produite à partir de galets de mer ; Cayeux-sur-Mer (Somme) |
| 6 - BDF ; sable siliceux ; Gallardon (Eure-et-Loir) | |
| 7 - MCH FS ; sable siliceux ; Marcheprime (Gironde) | |
| 8 - BSX 1/2,2 ; sable pour filtration ; Mios (Gironde) | |

Tabl. 5 - Compositions chimiques de quelques matériaux siliceux produits en France

4 - SECTEURS D'UTILISATION ET SPECIFICATIONS INDUSTRIELLES

4.1 - GENERALITES

La silice trouve de très nombreuses applications dans des industries très variées, les domaines de la verrerie et de la fonderie étant les premiers consommateurs de cette substance au niveau international, et la demande en sables siliceux s'étant accrue récemment dans le domaine de la filtration des eaux (Benbow, 1989). En France, la répartition est la suivante (Syndicat National des Producteurs de Silice pour l'Industrie, communication orale) :

- verrerie : 45 % ;
- fonderie : 35 % ;
- autres : 20 %.

La diversité des fabrications a conduit les utilisateurs de silice à différencier plusieurs qualités de matières premières. Pour les utilisations principales, la teneur en silice doit se situer généralement au-dessus de 97 % et ce sont les impuretés présentes qui restreignent tel ou tel type d'emploi. Les spécifications industrielles des matériaux siliceux diffèrent sensiblement selon les types d'applications, voire selon les utilisateurs, notamment dans l'industrie du verre. Cependant, il existe des normes précises pour certaines utilisations, la fonderie en particulier, qui font référence 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 granulométrie et sa granularité (qui se définit par la courbe ou l'histogramme granulométrique et par l'indice de finesse) ;
- sa composition chimique (teneur en silice et en autres éléments), qui est le reflet de sa minéralogie ;
- la régularité de ses caractéristiques physico-chimiques.

La granulométrie d'un sable peut être corrigée par élimination d'une partie des éléments compris entre deux mailles successives de tamis ou par ajout d'un sable correcteur.

La présence de glauconie (silicate riche en fer), d'oxydes de fer et d'autres minéraux porteurs du fer est à éviter dans la mesure où elle est rédhitoire pour les utilisations en verrerie et en fonderie. Les produits siliceux qui présentent un haut degré de pureté, pour les verres spéciaux ou optiques par exemple, font l'objet de spécifications chimiques et granulométriques exceptionnellement précises (Benbow, 1989).

4.2 - VERRERIE

La silice, essentiellement sous la forme de sables extra-siliceux (très marginalement sous la forme de roches massives concassées de type grès, quartzite ou quartz), constitue la matière première de base servant à la fabrication des différentes catégories de verres : verre plat (glaces, verres à vitres, verres coulés), verre creux ou d'emballage (bouteillerie, flaconnage, pôts, gobeletterie,...), verre technique (lunetterie, optique, ampoules d'éclairage et de télévision, luminaires, verre de silice,...) et fibres de verre, de renforcement ou d'isolation (tissus de verre, laine de verre). Elle entre en moyenne pour environ 70 % dans leur composition (70 à 73 % pour le verre usuel, 55 à 60 % pour le cristal au plomb, 40 à 70 % pour le verre optique). Les autres matériaux minéraux naturels utilisés comme fondants pour cette fabrication sont notamment le feldspath, le calcaire et la dolomie.

Les secteurs de la cristallerie, du verre optique (verres spéciaux, optique de précision) et du verre de silice fondue font appel à des matériaux siliceux (sables extra-siliceux ou quartz) d'un très haut degré de pureté ($\text{SiO}_2 \geq 99,8 \%$).

Les verres les plus couramment produits sont fabriqués par fusion de silice (oxyde de base), de soude (agent fondant) et de calcium -ou de calcium et magnésium- (agent stabilisant pour donner une durabilité chimique), avec ajout éventuel d'autres oxydes procurant des propriétés particulières aux verres.

Dans le domaine de la verrerie, les spécifications portent sur trois paramètres : la composition chimique, la granulométrie et la minéralogie.

La composition chimique est le paramètre le plus contraignant (teneur minimale acceptable en SiO_2 et teneurs maximales tolérées en impuretés) et son importance est primordiale.

La constance de ce paramètre est également à considérer, ce qui vient modérer quelque peu l'importance des valeurs absolues préconisées.

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).

Généralement, les teneurs en Al_2O_3 sont liées à la présence de feldspaths et d'argiles, et les teneurs en Fe_2O_3 témoignent de la présence d'oxydes de fer et de minéraux lourds.

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 (Maubert, 1989). 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 7. 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 :

- Fe_2O_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 , MnO < 10 ppm ;
- Al_2O_3 < 200 ppm.

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

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 %.

Les spécifications américaines relatives à la granulométrie en fonction de quelques types produits sont précisées dans le tableau 8.

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

Tabl. 8 - Spécifications relatives à la granulométrie des matériaux siliceux utilisés en verrerie (d'après Griffiths, 1987).

Au niveau de la minéralogie, il convient de vérifier la présence éventuelle de minéraux infusibles (examen des minéraux lourds). 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 0,0003 % 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 (Griffiths, 1987).

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 ± 0,3	≥ 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 ≤ 0,3 (vert) ≤ 1,0 (ambré, brun)	≤ 0,010	≤ 0,010	≤ 0,010	≤ 0,010 ± 0,005 < 0,1 ± 0,005	≤ 0,010 ≤ 0,02 *	≤ 0,3 ± 0,05 ≤ 0,1 (classe E)
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. 7 - Spécifications relatives à la composition chimique des matériaux siliceux utilisés en verrerie (d'après Griffiths, 1987 et Maubert, 1989)

4.3 - 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, Na_2SiO_3 ,...) 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. 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 1. Les valeurs généralement préconisées varient en fonction de différents paramètres (tabl. 9) : 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 ;

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

Tabl. 9 - Spécifications relatives à l'indice de finesse et à la teneur en argiles des sables siliceux utilisés en fonderie

* 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, GF 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. 9). 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.

4.4 - ELECTROMETALLURGIE

L'industrie électrométallurgique produit, après réduction des minerais au four électrique et fusion à haute température, trois grandes catégories de produits siliceux dont la fabrication nécessite une matière première à haut degré de pureté en silice :

- les ferro-alliages, ou aciers, dont le ferro-silicium ;
- le silicium métal, ou silicium métallurgique ;
- les produits électrofondus pour abrasifs et réfractaires (carbure de silicium notamment).

Le silicium est à la base d'un grand nombre d'agents d'addition en tant qu'élément réducteur, pour l'affinage de l'acier dans les fonderies, pour l'amélioration de la fonte, pour les alliages ferreux, les tôles magnétiques, l'élaboration du magnésium par silico-thermie, etc... La forme la plus courante est le ferro-silicium qui entre dans la fabrication de la quasi totalité des aciers et des fontes.

Dans les aciéries, le silicium est principalement un agent de désoxydation, qui peut jouer le rôle d'agent réducteur. C'est un élément d'alliage pour certains aciers spéciaux. Son utilisation permet une amélioration de la résistance mécanique, à chaud et à la corrosion, et une augmentation de la limite d'élasticité. Il est employé dans certains aciers de construction, les aciers travaillant à haute température et la plupart des aciers inoxydables et réfractaires.

En fonderie, le silicium est, avec le fer et le carbone, un constituant majeur des fontes qui assure plusieurs fonctions. Il se comporte comme le carbone et a ainsi une action sur la coulée, et il agit comme graphitisant, favorisant la décomposition de la cémentite ou la formation de lamelles de graphite.

Le secteur des alliages non ferreux, notamment celui des alliages légers à base d'aluminium, est également un important consommateur de silicium, ce dernier, associé au magnésium, améliorant sensiblement la résistance de l'aluminium.

Dans les alliages de fonderie, le silicium contribue à accroître la fluidité, la "moulabilité" et la résistance à l'usure et à la corrosion. Il est également utilisé dans d'autres types d'alliages non ferreux : alliages cuivre-silicium (construction navale) et alliages de nickel (fonderie).

Le silicium métallurgique est utilisé pour fabriquer différents types de composés :

- les silicones, siliciures, silicates et autres produits intermétalliques (chimie) ;
- le nitrure de silicium, qui sert à l'élaboration des céramiques et réfractaires à haute résistance.

Le carbure de silicium, ou "carborundum", est principalement utilisé :

- comme source de silicium (en remplacement du ferro-silicium) et de carbone dans la fabrication de fontes (agent désoxydant et thermogène) ;
- pour l'élaboration d'abrasifs, meules et revêtements abrasifs, notamment pour le polissage des métaux ferreux ;
- pour la réalisation de composants électriques et de céramiques techniques avancées.

En France, les matériaux siliceux utilisés en électrometallurgie sont les quartzites, les galets de quartz et les grès hypersiliceux. Dans ce domaine, les spécifications industrielles concernent la composition chimique et la granulométrie, et elles varient d'une unité de production à l'autre. Les matériaux les plus nobles (basses teneurs en fer et en alumine notamment), destinés à la fabrication du silicium métal, sont les grès du Bassin Parisien (régions de Fontainebleau et de Nemours) et les galets de quartz du Lot et de Dordogne. Les ferro-alliages de haute pureté sont élaborés à partir des galets de quartz de Dordogne, les autres qualités faisant appel aux quartzites exploités dans l'Allier, le Gard et en Savoie. Pour ce qui est de la composition chimique, les spécifications portent d'une manière générale sur SiO_2 , Al_2O_3 (composant qui pose souvent problème en électrometallurgie), Fe_2O_3 et CaO (tabl. 10 et 11). Certains autres éléments doivent faire l'objet d'un contrôle rigoureux particulier : le titane pour le silicium métal ; l'arsenic, le phosphore et le soufre pour le ferro-silicium ; et le magnésium pour le carbure de silicium (Maubert, 1989).

Le tableau 12 précise les valeurs préconisées au niveau international (Griffiths, 1987). 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.

4.5 - BATIMENT

Dans le domaine du bâtiment, les matériaux siliceux sont utilisés pour la fabrication de différents types de produits : enduits (revêtement 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.

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 constitue un filler extrablanc pour des bétons utilisés dans des ouvrages de prestige.

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.

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.

Types de produits finis	Ferro-silicium	Silicium métal	Carbure de silicium
SiO ₂	> 99	> 99,5	> 99,5
Al ₂ O ₃	< 0,6	< 0,15	< 0,25
Fe ₂ O ₃	< 0,6	< 0,1	< 0,1

Données en % pondéraux

Tabl. 10 - Spécifications relatives à la composition chimique des matériaux siliceux utilisés en électrometallurgie (d'après Maubert, 1989)

Types de produits finis	Ferro-silicium		Silicium métal	
	Quartzites (Allier)	Quartzites (Gard)	Grès hypersiliceux (Bassin Parisien)	Galets de quartz (Lot et Dordogne)
Al ₂ O ₃	≤ 3 500	≤ 3 000	≤ 350	≤ 650
Fe ₂ O ₃	≤ 2 500	≤ 3 500	≤ 300	≤ 650
CaO	≤ 800	≤ 100	≤ 250	≤ 150

Données en ppm

Source : Péchiney Electrometallurgie

Tabl. 11 - Composition chimique et nature des matériaux siliceux utilisés en France en électrometallurgie

Type de produits finis	Ferro-silicium	Silicium métal	Carbure de silicium
SiO ₂	> 98	> 99,8	≥ 99,7
Al ₂ O ₃	≤ 0,4	< 0,1	≤ 0,05
Fe ₂ O ₃	≤ 0,2	< 0,1	≤ 0,05
CaO	< 0,2	≤ 0,005	< 0,01
MgO	< 0,2		
P ₂ O ₅	≤ 0,1	≤ 0,005	
TiO ₂	≤ 0,002*		

Données en % pondéraux

* pour certains produits

Tabl. 12 - Spécifications concernant la composition chimique des matériaux siliceux utilisés en électrometallurgie au niveau international (d'après Griffiths, 1987).

Les sables siliceux utilisés pour la fabrication des bétons hydrauliques doivent présenter les caractéristiques suivantes (norme NFP 18.301) :

- granulométrie comprise entre 0 et 5 mm ;
- passant à 80 µm inférieur à 10 % ;
- module de finesse MF compris entre 1,8 et 3,2 (MF est la somme des refus, exprimés en pourcentage, sur les tamis de 0,16-0,315-0,63-1,25-2,5 mm, divisée par 100) ;
- pourcentage en masse retenu entre deux tamis successifs de la série précédente inférieur à 40 %.

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 %.

4.6 - 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 mer ; quartzites pour les produits réfractaires siliceux.

En céramique, les spécifications fondamentales concernent la composition chimique et la granulométrie : $\text{SiO}_2 > 97,5 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,2 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 0,55 \%$, granulométrie : Bs mesh 200 (Griffiths, 1987).

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, 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) :

- plastics : amélioration de la résistance à la flexion, à la compression et aux chocs thermiques ; et de la stabilité dimensionnelle ;
- 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 (à amiante notamment) : ajustement du rapport Ca/Si des ciments.

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 µm à 200 µm.

* Abrasifs

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 surfaces 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 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 $\text{HCl} \leq 0,3 \%$;
- 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 $\leq 250 \mu\text{m}$. Elle est également employée pour la production de silicates de sodium (sables extra-siliceux très purs fondus en association avec du carbonate de sodium) qui entrent dans la composition de savons et textiles.

* *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 par ailleurs pour le remblayage de galeries de mines, 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").

La silice ultra-pure (quartz) est utilisée en électronique (fabrication de semi-conducteurs et de supports de puces) et les quartz purs piézo-électriques servent à l'élaboration de cristaux de silicium de grandes dimensions destinés à l'industrie spatiale en particulier (lames piézo-électriques).

5 - ECONOMIE ET MARCHE

5.1 - INTRODUCTION

Les sables silico-argileux, destinés exclusivement à la fonderie, et les sables siliceux utilisés pour la verrerie ordinaire sont des matériaux essentiellement d'économie régionale, qui sont employés à proximité immédiate des gisements. Les ressources en substances à hautes teneurs en silice, telles que les sables extra-siliceux pour la verrerie et le quartz filonien ou pegmatitique (silice ultra-pure) notamment, sont très inégalement réparties géographiquement au niveau international, d'où des échanges commerciaux importants entre pays. Les continents asiatique et africain en sont quasiment dépourvus et, en Europe, l'Italie, la Suisse, la Grande-Bretagne et les pays scandinaves ne disposent pas de gisements convenables d'un point de vue qualitatif pour répondre à leurs besoins propres.

5.2 - PRODUCTION MONDIALE

On ne dispose pas de données statistiques précises et globales sur la production mondiale de silice, les chiffres avancés étant le plus souvent parcellaires ou incluant des matériaux de type "granulats".

L'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord constituent les plus importants marchés au niveau international. En Europe, les matériaux siliceux, de types sables notamment, sont produits en Belgique, Allemagne, France, Pays-Bas, Grande-Bretagne, Italie, Espagne, Portugal, Grèce, Autriche, Finlande, Suède, Norvège, Danemark, République Tchèque, Hongrie, Roumanie, Bulgarie, Yougoslavie et dans les états de l'ex-URSS. Les gisements de matériaux de haute qualité sont concentrés dans quatre pays : la Belgique, la France, les Pays-Bas et l'Allemagne, qui entretiennent des échanges commerciaux actifs avec leurs voisins européens qui en sont dépourvus, l'Italie, la Suisse et la Grande Bretagne en particulier.

Le marché des sables siliceux en Europe occidentale est dominé par la Belgique qui est le premier exportateur mondial, en particulier en direction de la France, des Pays-Bas, de l'Allemagne et de l'Italie. Ce dernier pays est le premier importateur de sables siliceux en Europe de l'Ouest. Les importations des pays européens ont principalement pour origines des états de la CEE, une faible part provenant d'Afrique du Sud et des USA.

Les autres pays producteurs de matériaux siliceux sont les USA, le Canada, le Brésil, la Turquie, Israël, l'Arabie Saoudite, le Pakistan, l'Inde, la Malaisie, les Philippines, la Chine, l'Afrique du Sud et l'Australie (Benbow, 1989).

La silice ultra-pure (quartz) est extraite dans un nombre réduit de pays, les plus importants étant Madagascar, le Brésil, la Tasmanie, l'Inde, le Zimbabwe, la Namibie, l'Angola, les USA, la Turquie et la Corée du Sud. Les plus importants gisements mondiaux de qualité, pour les applications en électronique et en optique, sont situés au Brésil (Minas Gerais,...).

5.3 - PRODUCTION FRANCAISE

La France compte parmi les rares pays, avec la Belgique et l'Allemagne, à recéler des gisements de matériaux siliceux de qualité appropriés aux besoins des industries utilisatrices, aux premiers rangs desquelles se trouvent la verrerie, la fonderie et l'électrométallurgie.

A l'instar de plusieurs pays de la CEE, la production de silice en France est aujourd'hui dominée par quelques grands groupes nationaux et multinationaux spécialisés dans ce domaine. Certaines de ces entreprises, en particulier en ce qui concerne la verrerie et l'électrométallurgie, exploitent des gisements de matériaux siliceux pour leur propre consommation (marchés captifs). Les plus importantes sociétés françaises opérant dans le domaine de la silice (extraction et traitement des matériaux) sont adhérentes du Syndicat National des Producteurs de Silice pour l'Industrie (SNPSI) qui est rattaché à la Fédération des Minerais et Métaux. En 1992, ce syndicat rassemblait 19 entreprises qui assuraient près de 90 % de la production française totale de silice.

La production nationale de matériaux siliceux n'est pas connue avec une grande précision aux niveaux quantitatif et qualitatif. En effet, d'une part, certains exploitants de granulats siliceux pour le B.T.P. alimentent des industries telles que la verrerie et la fonderie, et, d'autre part, certains producteurs de silice industrielle destinent une partie de leurs matériaux au domaine du B.T.P..

La production française annuelle de sables et grès siliceux, qui se situait dans la fourchette 5,5-5,8 Mt entre 1983 et 1987, a connu une nette augmentation entre 1988 et 1992, période durant laquelle elle a varié de 6,25 à 6,70 Mt (fig. 3, d'après le SNPSI et le SESSI).

En 1988, celle-ci, qui était de 6.247.000 t, se déclinait ainsi en termes de produits (Matériaux de Construction et Produits de Carrières, novembre 1989) :

- sables bruts argileux : 1,5 % ;
- sables siliceux 0 à 30 AFA : 7,2 % ;
- sables siliceux 30 à 140 AFA : 84,0 % ;
- silice fine (> 140 AFA) : 1,8 % ;
- grès : 5,4 %.

D'après notre enquête, la France a produit au total environ 6.965.000 t de matériaux siliceux en 1992, ainsi répartis (fig. 4) :

- sables, y compris ceux associés au kaolin : 92,5 % ;
- quartzites : 3,3 % ;
- galets : 3,1 % ;
- grès : 0,9 % ;
- quartz (silice ultra-pure) : 0,2 %.

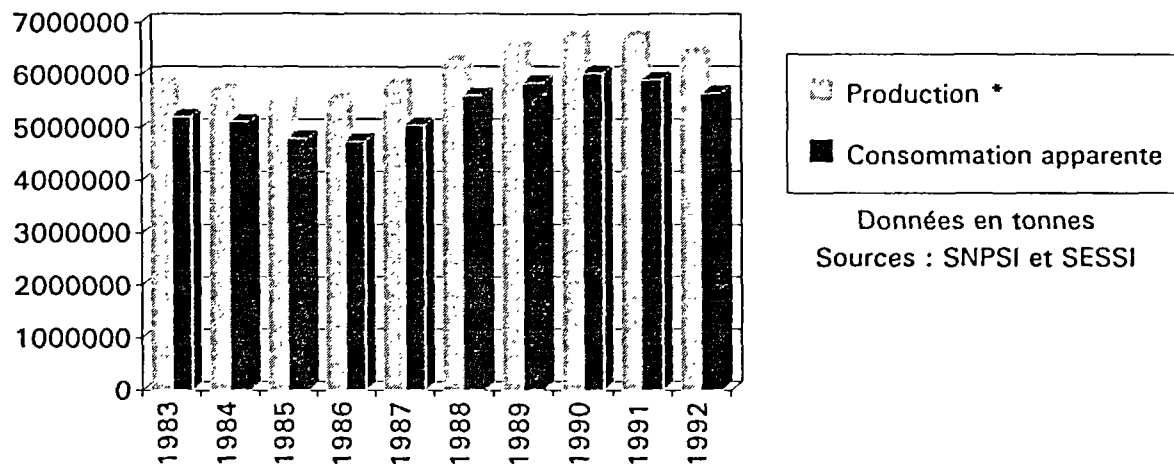


Fig. 3 - Evolution de la production et de la consommation apparente de sables et grès siliceux en France entre 1983 et 1992.

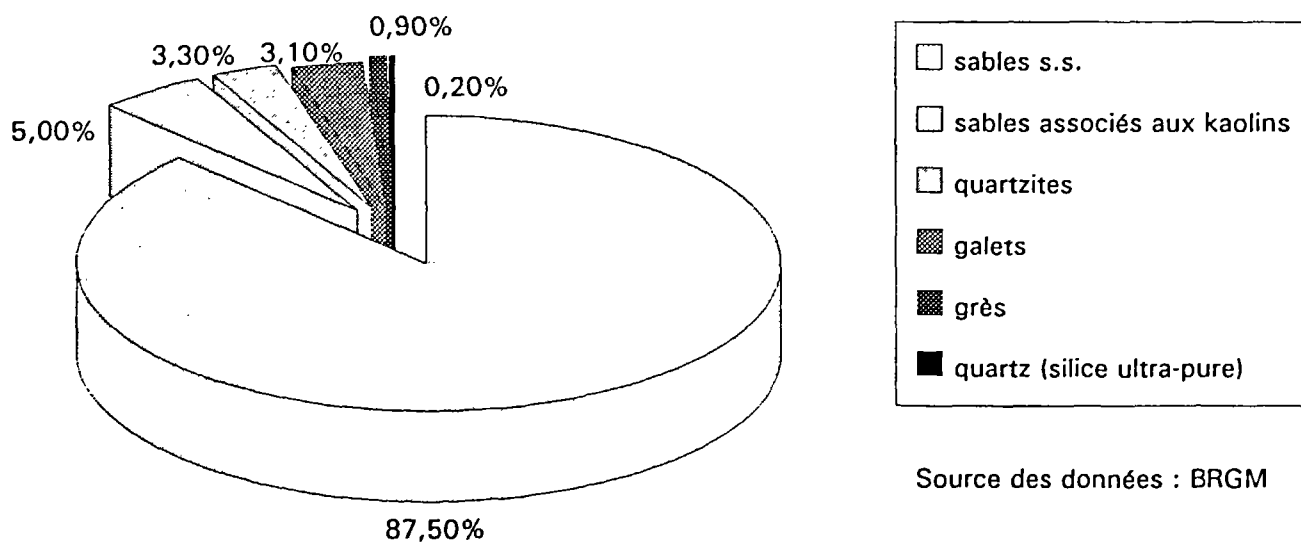


Fig. 4 - Répartition de la production française de silice par types de matériaux en 1992.

Cette même année, la production de sables siliceux a principalement eu pour origine le Bassin Parisien (environ les 2/3 en provenance du centre du bassin et du Sud de la Picardie), les autres régions productrices d'importance étant le Sud-Est, le Sud-Ouest et l'Alsace (fig. 2 et 5). Les principaux départements producteurs de ces substances en 1992 étaient la Seine-et-Marne, l'Oise et l'Aisne, représentant respectivement 21,9 %, 17,6 % et 17,2 % de la production nationale.

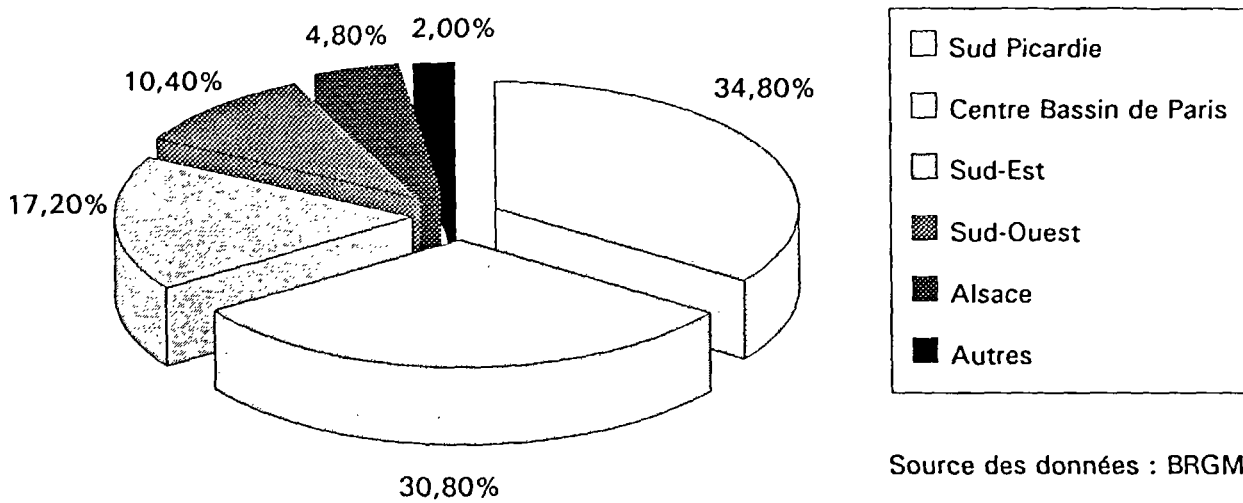


Fig. 5 - Répartition géographique de la production française de sables siliceux en 1992.

5.4 - IMPORTATIONS - EXPORTATIONS - CONSOMMATION FRANÇAISE APPARENTE

Les échanges commerciaux qu'entretient la France dans le domaine de la silice concernent presque exclusivement les matériaux de types sables et les pays européens, notamment ceux de la CEE.

Les importations et les exportations françaises de sables siliceux sont restées relativement stables durant la dernière décennie (fig. 6), les premières variant de 393.000 à 565.000 t/an, et les secondes se situant dans la fourchette 1,1-1,3 Mt/an.

La balance commerciale de notre pays dans ce domaine est en fait excédentaire depuis 1970.

En 1992, les importations françaises de sables siliceux, qui étaient de l'ordre de 404.000 t (tabl. 13), avaient pour principales origines la Belgique (62 %) et le Royaume-Uni (28 %). L'approvisionnement en Belgique de certaines unités de production du Nord de la France, dans les domaines de la verrerie et de la fonderie, est lié à la proximité géographique des gisements, les coûts de transport ayant une forte incidence sur les prix des matériaux.

Par ailleurs, des galets de silex concassés sont importés de Belgique et des Pays-Bas, du quartz de Belgique et d'Allemagne, du quartz de haute pureté pour électrometallurgie d'Espagne (2 à 3 000 t/an) et de la silice ultra-pure (quartz) du Zimbabwe et du Portugal.

Les exportations françaises de sables siliceux s'élevaient à 1.155.000 t en 1992 (tabl. 13), les principaux destinataires étant l'Italie (50 %) et l'Allemagne (36 %).

Les produits siliceux de type cristobalite-tridymite sont acheminés dans les pays scandinaves, en Allemagne et en Grande-Bretagne pour le domaine des charges minérales, et en Grande-Bretagne, en Allemagne, au Pays-Bas, en Irlande et en Italie pour l'industrie céramique. Enfin, la silice ultra-pure (quartz) fait l'objet d'expéditions en Allemagne et en Grande-Bretagne pour le domaine des verres optiques spéciaux (quelques centaines de tonnes par an), et également en Belgique.

Au cours de la dernière décennie, la consommation française apparente (obtenue par addition de la production française et des importations, et soustraction des exportations) de sables et de grès siliceux a suivi une évolution parallèle à la production nationale de ces substances (fig. 3). Si l'on considère l'ensemble des matériaux siliceux, on aboutit à une valeur de l'ordre de 6.216.000 t pour l'année 1992. Dans notre pays, cette consommation se répartit ainsi par industries utilisatrices : verrerie 45 %, fonderie 35 % et autres 20 % (SNPSI, communication orale), ce dernier ensemble correspondant pour moitié aux domaines de l'électrometallurgie (31 %), des bétons cellulaires (13 %) et de la céramique (6 %).

En électrometallurgie, la consommation annuelle de silice, qui était d'environ 380.000 t en 1992, se répartit également entre le secteur des ferroalliages et celui du silicium métal (Péchiney Electrometallurgie, communication orale).

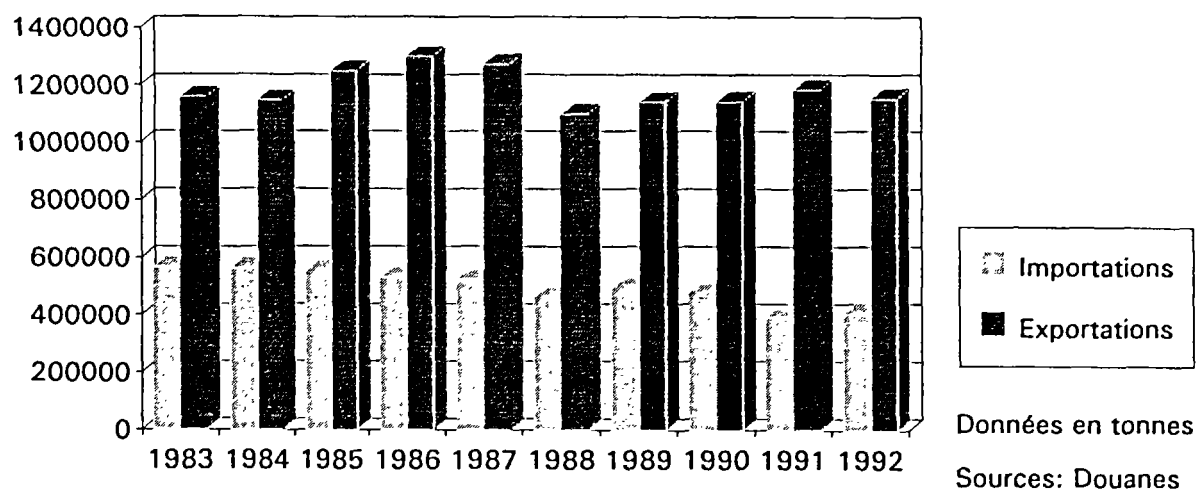


Fig. 6 - Evolution des importations et des exportations françaises de sables siliceux entre 1983 et 1992.

PAYS	IMPORTATIONS	EXPORTATIONS
Belgique	250.036	10.693
Royaume-Uni	111.371	0
Norvège	16.609	0
Pays-Bas	14.794	0
Allemagne	10.065	416.509
Italie	0	579.898
Suisse	0	97.584
Espagne	0	41.594
Autriche	0	5.225
Divers	1.184	3.496
TOTAL	404.059	1.154.999

Données en tonnes Source : Statistiques du Commerce Extérieur

Tabl. 13 - Importations et exportations françaises de sables siliceux en 1992.

La consommation française apparente de sables et grès siliceux a connu une baisse sensible en 1992 comparativement aux deux années précédentes : 5,65 Mt contre 6,03 Mt en 1990 et 5,91 Mt en 1991 (fig. 3).

Dans le domaine de la verrerie, la tendance générale de la consommation de silice est actuellement à la baisse et va se poursuivre. Cette décroissance est liée au recyclage du verre (utilisation de calcin "étranger") dans les secteurs du verre creux et de la fibre pour isolation. En 1992, le cap de 1 Mt de verre recyclé a été dépassé dans notre pays. Globalement, l'année 1992 a connu une progression très faible de l'activité dans l'industrie du verre, la production totale ayant avoisiné 4,9 Mt (+ 1 % par rapport à 1991). Le secteur du verre plat a légèrement augmenté (+ 1 % également), malgré la récession dans les domaines de l'automobile et du bâtiment, du fait du gain de certains marchés à l'exportation, en Allemagne notamment. L'utilisation de la silice en fonderie est en diminution compte tenu de la crise économique traversée par cette industrie et de l'accroissement des pratiques de recyclage interne des sables qu'elle consomme.

La récession est encore plus accusée dans le domaine de l'électrometallurgie qui a connu les effets conjugués d'une dégradation marquée de la conjoncture économique (faible niveau de demande sur ses principaux marchés que sont la sidérurgie et l'automobile) et d'un déséquilibre du marché (excès de l'offre en provenance de certains pays). L'année 1993 aura été marquée par l'arrêt de la production, réalisée à partir de sables siliceux français, du carbure de silicium en France et en Italie. Ce produit fini est aujourd'hui importé de Chine à bas prix.

Le développement de quelques nouvelles applications de la silice d'origine naturelle (charges minérales, filtration...) n'est pas en mesure de venir contrebalancer quantitativement la baisse de la consommation dans les industries sus-mentionnées.

De ce fait, le domaine de la silice pour l'industrie en France, tous emplois confondus, paraît inexorablement orienté à la baisse à court et moyen termes.

Au cours du premier trimestre 1993, on a pu assister à une profonde dégradation du marché de la silice, le problème des ventes de produits à bas prix provenant de Chine venant se greffer à celui de la réduction de consommation (Fédération des Minerais et Métaux, 5/93).

La perte de certains marchés de matériaux siliceux à l'exportation pourrait prochainement venir aggraver plus encore cette situation. En effet, si les producteurs français de silice gardent largement la maîtrise du marché national, il n'en est pas de même chez leurs principaux clients, en Italie notamment, où ils doivent affronter une concurrence de plus en plus importante de la part de pays européens, africains ou plus éloignés encore géographiquement.

5.5 - PRIX

Les prix des matériaux siliceux varient en fonction de différents paramètres, parmi lesquels la qualité et la granulométrie des produits élaborés.

C'est ainsi que le prix d'une silice fine pour charges minérales peut être 4 ou 5 fois supérieur à celui d'un sable silico-argileux pour fonderie. Quelques données chiffrées relatives à des produits siliceux commercialisés en France sont fournies à titre indicatif dans le tableau 14.

ORIGINE	TYPES DE PRODUITS	PRIX	COMMENTAIRES
ZIMBABWE	Quartz (silice ultra-pure) pour optique spéciale	200 \$ US/t	Rendus au Havre
FRANCE	Sables lavés pour verrerie et filtration	100 F/t	Prix de vente moyen
	Quartzites pour électrométallurgie	100-115 F/t	Prix de vente départ usine
	Galets de quartz pour électrométallurgie	100 F/t	Prix départ usine
	Quartz blanc pour B.T.P. haut de gamme (bétons,...), sables et graviers	300 F/t	Prix départ usine, en vrac
	Quartz blanc (silice ultra-pure) pour pâtes céramiques et optique, blocs sélectionnés et traités	600 F/t	Prix départ usine, en vrac

Tabl. 14 - Prix de quelques matériaux siliceux commercialisés en France en 1993.

6 - PRODUITS DE SUBSTITUTION

La silice d'origine naturelle a été et demeure une matière première minérale de base indispensable, pour des raisons techniques et économiques, à d'importants domaines industriels tels que la verrerie, la fonderie et l'électrometallurgie. Elle est sans substituts dans ces derniers s'ils sont considérés globalement. Son emploi est aujourd'hui plus limité en verrerie et en fonderie compte tenu des pratiques de recyclage, et quelques produits de substitution, naturels ou synthétiques, lui sont parfois préférés pour des usages particuliers, en fonderie et en électronique notamment.

Le recyclage du verre est réalisé soit directement par les usines verrières qui réutilisent au niveau interne une partie de leurs déchets (rebuts de production,...), soit indirectement après collecte des emballages auprès des consommateurs. Le verre creux est recyclé sous forme de groisil, de calcin ou de verre pilé qui sont mélangés aux autres matières premières avant le passage aux fours. Cet ajout a un rôle de fondant et se traduit par une économie d'énergie dans la production du verre. Certaines contraintes techniques (coloration des verres, présence de verres de natures différentes et d'éléments étrangers au verre) limitent les pratiques de recyclage en verrerie.

Dans le domaine de la fonderie, des produits de substitution coûteux et spécifiques peuvent être utilisés de façon limitée. Il s'agit des moules métalliques (moulage à la coquille ou à la pression) dont l'emploi est réservé à des productions en grande série, et des sables à base de minéraux réfractaires (chromite, zircon,...) servant à l'élaboration ("moulage au sable") d'aciers et d'alliages à très haut point de fusion.

Les sables siliceux utilisés pour le moulage, dans lesquels sont incorporés des liants argileux, font généralement l'objet d'un recyclage systématique après utilisation. Ils concourent ainsi en grande partie à la fabrication des nouveaux moules, le complément correspondant à des "sables neufs". Les sables siliceux servant pour le noyautage, associés à des résines synthétiques, ne sont généralement pas recyclables.

Pour des applications de type hautes technologies, telles que l'électronique et l'optique de précision, la silice naturelle est de plus en plus concurrencée par le quartz piézo-électrique de synthèse. Celui-ci, d'un coût nettement plus élevé, présente un degré de pureté chimique optimal. Il est produit en autoclave suivant un processus hydrothermal.

7 - REFERENCES 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. et 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.

CAVELIER C. (1967) - Notice explicative, Carte géologique au 1/50 000, Creil. BRGM, 23 p.

CLEMENT J-P. et LIMASSET J-C. (1976) - Substances utiles dans la Région Pays-de-la-Loire. Rapport BRGM 76 SGN 002 BPL, 80 p.

DAMIANI L. et al. (1967) - Notice explicative, Carte géologique au 1/50 000, Uzès. BRGM, 12 p.

DEBELMAS J. et al. (1989) - Notice explicative, Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Moutiers (751). BRGM, 53 p.. Carte géologique par DEBELMAS J. et al. (1989).

DENIZOT G. (1970) - Notice explicative, Carte géologique au 1/50 000, Fontainebleau. BRGM, 20 p.

DUBREUILH J. et CAPDEVILLE J-P. (1983) - Prospection générale des Landes de Gascogne. 1ère année : 1982-1983. Feuille de Soustons à 1/100 000. Rapport BRGM 83 SGN 878 AQI, 19 p. + annexes et carte hors texte.

FLEURY R. et LE BERRE P. (1987) - Cartographie et prospection de la Sologne. Programme 1986. Feuille Aubigny-sur-Nère. Recherche de gisements de roches et minéraux industriels. Rapport BRGM 87 SGN 005 GEO, 36 p. + annexes.

GRES M. (1978) - Minéraux industriels de France. Rapport BRGM 78 SGN 270 MTX, 22 p..

GRES 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 Armoricaïn 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. et LE POCHAT G. (1986). Recherche de gisements de silice en roche dans la vallée des Aldudes (Pyrénées Atlantiques). Rapport BRGM 86 SGN 336 AQI, 21 p. + annexes.

MAUBERT F. (1989) - La silice pour l'industrie. Mémento roches et minéraux industriels, rapport BRGM 89 SGN 150 GEO, 66 p..

MENILLET F. et al. (1970) - Notice explicative, Carte géologique de la France à 1/50 000, Haguenau (198). BRGM, 48 p..

PLATEL J-P. (1979) - Les ressources en sables industriels de la Région Poitou-Charentes. Rapport 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, rapport BRGM 80 SGN 909 MTX, 43 p..

TUTTLE O.F. et BOWEN N.L. (1958) - Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{Na AlSi}_3\text{O}_8\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. Geol. Soc. Amer. Mem., n° 74, 153 p..

