



mémento roches et minéraux industriels

la silice pour l'industrie

F. Maubert

février 1989
89 SGN 150 GEO

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
Département Géologie
Service Roches et Minéraux Industriels
B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - France - Tél.: (33) 38.64.34.34

SOMMAIRE

	Pages
1 - DONNÉES ÉCONOMIQUES	2
1.1 - FRANCE	2
1.1.1 - PRODUCTION	2
1.1.2 - PLACE DE LA SILICE DANS L'INDUSTRIE EXTRACTIVE FRANCAISE	5
1.1.3 - FLUX, IMPORTATIONS-EXPORTATIONS	6
1.1.4 - PERSPECTIVES DU MARCHÉ	8
1.2 - ÉTRANGER	9
2 - GÉOLOGIE	12
2.1 - MINÉRALOGIE DE LA SILICE	12
2.2 - DISTRIBUTION DES GISEMENTS	14
2.3 - RÉPARTITION DES GISEMENTS FRANCAIS DE SILICE EN GRAINS	15
2.3.1 - GISEMENT DU BASSIN PARISIEN	17
2.3.2 - LES GISEMENTS DU SUD-EST	18
2.3.3 - LES GISEMENTS DU SUD-OUEST (BASSIN AQUITAIN)	19
2.3.4 - AUTRES GISEMENTS FRANCAIS	20
2.4 - LES GISEMENTS FRANCAIS DE SILICE EN ROCHE	21
3 - SECTEURS D'UTILISATION	28
3.1 - INDUSTRIE DU VERRE	30
3.1.1 - LA FABRICATION DU VERRE	30
3.2 - INDUSTRIE DE LA FONDERIE	38
3.3 - UTILISATION DE LA SILICE SOUS FORME MÉTALLIQUE	41
3.3.1 - LE SILICIUM EN ACIÉRIE	41
3.3.2 - LE SILICIUM EN FONDERIE	42
3.3.3 - LE SILICIUM DANS LES ALLIAGES NON FERREUX	43
3.3.4 - LES SILICONES	43
3.3.5 - AUTRES APPLICATIONS DU SILICIUM	44
4 - SPÉCIFICATIONS ET CRITÈRES DE SÉLECTION	46
4.1 - SPÉCIFICATIONS	46
4.1.1 - SPÉCIFICATIONS VERRERIE	46
4.1.2 - SPÉCIFICATIONS FONDERIE	50
4.1.3 - SPÉCIFICATIONS POUR LA MÉTALLURGIE	54

	Pages
4.2 - CRITERES DE SELECTION	56
4.2.1 - CRITERES LIES AUX CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX BRUTS ...	56
4.2.2 - CRITERES LIES AUX CONDITIONS DE GISEMENT	57
5 - MODALITES DE PREPARATION ET DE TRAITEMENT	59
6 - PRODUITS DE SUBSTITUTION	62
6.1 - SILICE POUR FONDERIE	62
6.2 - SILICE POUR VERRERIE	62
6.3 - SILICE POUR ELECTRONIQUE	64
BIBLIOGRAPHIE	65

INTRODUCTION

La silice pour l'industrie est un matériau à haute teneur en silicium qui se trouve à l'état naturel sous 2 formes :

- **Silice**

- **la silice en grains** (autrefois appelée sable industriel) issue de l'exploitation de roches meubles d'origine détritique,

- **Silice**

- **la silice en roche** provenant de gisements de matériaux massifs ou consolidés (**quartz, quartzite, grès hyper-siliceux**).

La silice en grains représente plus de 90 % du tonnage total de silice extrait en France. Elle constitue l'essentiel de la matière première du verre, des moules et des noyaux de fonderie.

La silice en roche (10 % de la production) trouve surtout ses applications en électro-metallurgie (silico-alliages, silicium, ferro-silicium, silico-chrome, silicones...).

Une faible part de la silice totale extraite (15 % environ) trouve également des débouchés dans d'autres secteurs industriels (couvertures bitumées, produits de charge, céramiques, isolation, mortiers spéciaux...).

La France est l'un des rares pays européens à disposer d'une gamme étendue de matières premières de haute qualité appropriées aux exigences des industries utilisatrices de silice.

1 - DONNEES ECONOMIQUES

1.1 - FRANCE

1.1.1 - PRODUCTION

En 1985, la production nationale totale de silice pour l'industrie s'est établie autour de 6 millions de tonnes se répartissant de la façon suivante (tabl. 1) :

TABLEAU 1
Statistiques de production 1985 (Source UNICEM)

PRODUITS	PRODUCTION (tonnes)	LIVRAISONS (tonnes)	CHIFFRE D'AFFAIRES (en milliers de F.)
- Silice en grains			
Sables bruts argileux	93 400	61 500	2 665
Sables siliceux 0 à 30 AFA	359 100	362 000	36 730
Sables siliceux 30 à 140 AFA	5 063 100	4 893 400	267 084
Silices fines (> 140 AFA)	89 300	89 200	17 474
- Silice en roche*			
Grés	169 700	158 300	17 613

***les quartz et quartzites pour l'industrie sont exclus des produits de la nomenclature de la silice depuis 1985**

La production française de silice, soutenue par une forte demande intérieure et par l'exportation, a subi une croissance très rapide entre 1950 et 1974 (doublement de la production entre 1950 et 1960, quadruplement de 1950 à 1974).

La chute brutale de la demande en 1975 s'est traduite par une baisse sensible de la production qui s'est ensuite lentement relevée, notamment grâce aux exportations. L'année record de production a été 1980 (plus de 7 millions de t). Depuis, la production nationale semble stabilisée autour de 6 millions de t.

Depuis 1976, la consommation française de silice en grains se maintient autour de 5,2 à 5,3 millions de t. La récession continue de l'utilisation en fonderie est compensée par les consommations croissantes de l'industrie de la verrerie et, dans une moindre mesure, des autres utilisations.

Le chiffre d'affaires global de la silice en 1985 a été de l'ordre de 395 millions de francs, soit environ 88 % du résultat de 1980.

Le prix de la silice départ carrière est très variable selon le produit élaboré. Les sables argileux sont vendus à des prix quatre fois moins élevés que les silices fines.

Le prix moyen de la silice en roche est légèrement plus élevé que la silice en grains.

TABLEAU 2
Prix de la silice départ carrière (1985)
Source UNICEM

PRODUITS	PRIX MOYEN (F)
. Sables bruts argileux	43,33
. Sables siliceux (0-30 AFA)	101,46
. Sables siliceux (30-140 AFA)	54,58
. Silices fines (> 140 AFA)	195,89
. Grès	111,26
. Quartz-Quartzites (1984)	69,94

TABLEAU 3
Evolution de la production française de silice
(valeurs arrondies exprimées en kt)

CATEGORIE DES PRODUITS	1950	1960	1970	1980	1981	1982	1983	1984	1985
Sables bruts argileux	650	814	472	393	307	268	235	141	93
Sables siliceux et extra siliceux	1000	2181	4343	6211	5801	5486	5439	5621	5512
Grès	*	*	*	206	148	145	157	170	176
Quartz - quartzites	*	*	211	299	215	199	242	243	250 $\neq$
Ensemble de la production	1650	2995	5026	7110	6471	6098	6073	6176	6025
Indice base 100 en 1980	23	42	70,7	100	91,9	86,6	85,6	87,1	84,8

* : non connu

$\neq$: estimation

1.1.2 - PLACE DE LA SILICE DANS L'INDUSTRIE EXTRACTIVE FRANCAISE

Environ 45 entreprises produisent de la silice pour l'industrie.

Quatre sociétés assurent à elles-seules près de 90 % de la production française :

- SIFRACO
- SAMIN
- Ets BERVIALLE
- Ets CATTEAU-LANGLOIS.

SIFRACO est lié au groupe international SIBELCO/QUARZWERKE. La SAMIN est une filiale du groupe SAINT-GOBAIN. Cette forme de concentration se retrouve dans la plupart des pays d'Europe de l'Ouest.

La silice représente environ 1 % du tonnage des matériaux de carrière extraits du sous-sol national.

Parmi les 9 000 carrières recensées en 1984 en France, **une vingtaine** seulement d'importance significative produisent de la silice à usage industriel (quartz, quartzite et sable). La surface de terrain exploitée annuellement est de l'ordre de 40 ha/an (sur l'ensemble des 3500 ha exploités par les carrières françaises).

Si les exploitations de silice n'emploient qu'un millier de salariés, les principales industries utilisatrices de silice (verrerie, fonderie, électrométallurgie) représentent un ensemble économique et social très important (plus de 110 000 emplois et près de 36 milliards de francs de chiffre d'affaires).

1.1.3 - FLUX, IMPORTATIONS-EXPORTATIONS

Les sables argileux, dont l'utilisation décline rapidement, sont exclusivement destinés à la fonderie. Dans la mesure du possible, ils sont utilisés à proximité immédiate des gisements.

Les ressources géologiques en sables siliceux et surtout extra-siliceux sont mal réparties en France et en Europe. Ils peuvent donc faire l'objet d'importants échanges entre pays.

TABLEAU 4
Evolution du commerce extérieur dans le domaine de la silice
(valeurs exprimées en kt)

Quartz et quartzite	1970	1979	1980	1981	1982	1983	1984
Import	36	24	83	80	51	158	286
Export	3	2	4	2	3	3	3
Sable industriel	1970	1979	1980	1981	1982	1983	
Import	530	464	540	780	736	697	
Export	632	1550	1475	1359	1147	1147	

Globalement, la balance commerciale de la silice française est excédentaire depuis 1970. Les activités du commerce extérieur liées à ce type de produit n'ont pratiquement pas cessé de se développer au cours de ces dernières années, malgré les difficultés économiques. La France exporte essentiellement des sables siliceux vers l'Italie, le Benelux, la Suisse, la RFA, l'Espagne et jusqu'à Taïwan (cf. tableau 5 et 5.1).

TABLEAU 5.1
Importations et exportations françaises de silice en grains
pour la Verrerie et la Céramique (Valeur en tonnes)

	Importations		Exportations	
Pays :	1980	1981	1980	1981
BELGIQUE -LUXEMBOURG	270 144	313 375	-	-
RFA	2 518	1 345	3 600	3 639
ITALIE	-	-	420 299	317 994
SUISSE	-	-	13 325	10 138
ESPAGNE	-	-	7 120	4 568
CANADA	1 078	nc*	-	nc
TAIWAN	nc	-	nc	598
AUTRES PAYS	493	77	3 933	3 865
CEE	273 155	314 797	427 705	324 999
TOTAL	274 233	314 797	448 277	340 802

nc = non connu

TABLEAU 5.2
Importations et exportations françaises de silice en grains
pour les autres usages (Valeur en tonnes)

	Importations		Exportations	
Pays :	1980	1981	1980	1981
BELGIQUE-LUXEMBOURG	104 255	97 588	-	10 693
PAYS-BAS	7 641	7 170	-	-
RFA	20 018	15 213	346 543	451 319
ITALIE	-	-	440 191	417 456
ROYAUME UNI	132 426	344 158	-	-
NORVEGE	nc	1 245	nc	-
SUISSE	-	-	217 200	137 302
ALGERIE	-	nc	15 278	nc
AUTRES PAYS	997	141	7 888	1 976
CEE	264 468	464 156	792 896	879 647
TOTAL	265 337	465 627	1 027 100	1 018 692

En 1985, la quantité de silice française exportée a été de 1,25 million de tonnes (soit une valeur de 165 millions de F), contre 635 000 tonnes importées (53 millions de francs)..

Les sables importés en France proviennent principalement de Belgique.

Il faut remarquer que les importations de **silice en roche** ont **plus que triplé** entre 1980 et 1984.

1.1.4 - PERSPECTIVES DU MARCHE

Selon le Syndicat National des Producteurs de Silice pour l'Industrie qui regroupe 35 adhérents et correspondant à environ 97% de la production nationale de silice, la demande en silice pour les prochaines années devrait connaître une certaine stabilité.

A court terme, les prévisions d'évolution des marchés français du Bâtiment et de l'Automobile laissent présager une faible évolution de l'activité dans les industries du verre plat et des laines de verre (isolation). Les industries de la bouteille, du flaconnage et des pots devraient connaître une activité normale, peu concurrencée par les bouteilles en plastique et les verres de récupération. Une activité soutenue est attendue dans la fabrication des fibres de verre et des matériaux composites.

Par contre, la diminution d'activité dans le secteur de la fonderie se poursuit, ce qui ne permet pas de prévoir une évolution positive de la demande en sable siliceux.

L'industrie électrométallurgique française occupe une place importante au niveau mondial mais traverse actuellement une période extrêmement difficile. En effet, la France est le 3ème producteur mondial de silicium métallurgique après les USA et la Norvège, et le quatrième pour le ferrosilicium, après les USA, la Norvège et le Japon.

Le principal obstacle au développement de ces industries est le coût énergétique nécessaire à la fabrication, la matière première ne représentant qu'une faible part du coût de revient du produit fini.

1.2 - ETRANGER

Il n'existe pas de statistiques précises sur la consommation de silice dans le monde. La consommation mondiale de minéraux contenant de la silice est estimée à une dizaine de gigatonnes (milliards de tonnes), dont moins de 2 à 3 % sont classés comme matériaux industriels.

L'essentiel des données disponibles concernent les productions et les échanges de silice en grains dans les pays d'Europe de l'Ouest. Outre la France, les principaux pays européens producteurs de silice sont la RFA, la Grande-Bretagne, la Belgique, les Pays-Bas, l'Italie, l'Espagne et le Portugal. Les gisements d'excellente qualité sont essentiellement localisés en Belgique, France, Pays-Bas et RFA. En Europe de l'Ouest, la production de la silice en grains est dominée par 3 compagnies industrielles :

- SCR-SIBELCO SA (Sablières et carrières et compagnies Belge des silices réunies) en Belgique.
- Quartzwerke GmbH en RFA (en partie affiliée à Sibelco),
- British Industrial Sand L & d (BIS) en Grande-Bretagne.

Parmi les pays producteurs de silice d'Europe, seules la Grèce, la Finlande, la Suède et le Danemark restent indépendants de l'influence de Sibelco qui possède des intérêts dans de nombreuses sociétés industrielles.

TABLEAU N° 6
Répartition européenne des importations et exportations

1982	Répartition des importations et exportations	
	Silice en grains	
	Exportation (kt)	Importation (kt)
Belgique	2 152	417
France	1 147	736
Italie	3	1026
RFA	643	583
Pays-Bas	283	642
G.B.	50	62

La **Belgique** est le premier exportateur de sable industriels d'Europe de l'Ouest. La silice belge est principalement exploitée dans deux régions situées à l'Est d'Anvers :

- bassin de Mol,
- région de Maasmechelen.

La Belgique possède avec la France les plus importantes ressources en sables extra-siliceux de qualité en Europe.

L'**Italie** consomme presque intégralement sa production. Ce pays est le plus gros importateur européen de sables industriels.

Les **Pays-Bas** exploitent des sables industriels de la région de Heerlen et utilisent d'importantes quantités de silice en provenance de Belgique et de Norvège.

En **RFA**, la production provient pour l'essentiel de la Rhénanie, de la Westphalie du Nord, et en moindre quantité de Bavière et de Basse-Saxe.

Au **Royaume-Uni**, la production de sables industriels a chuté de 6,7 millions de tonnes en 1973 à 4,1 millions de tonnes en 1983. L'Angleterre en produit près de 90 % et l'Ecosse, le complément. La silice provient surtout des formations glaciaires détritiques du Nord-Ouest de l'Angleterre (Cheshire), du Sud-Est (Surrey) et de l'Est-Anglia (Norfolk). La répartition entre silice pour verrerie et sable pour fonderie est pratiquement équilibrée (41 %environ).

En **Autriche**, le plus grand producteur de silice pour l'industrie appartient au groupe Quartwerke.

L'entreprise est installée à Zelkiny (Basse Autriche) et St-Georgen (Haute-Autriche) où sont exploités des dépôts fluviatiles oligocènes.

En **Finlande**, le marché de la silice est dominé par Lohza Corporation. Les principaux centres d'exploitation se situent à Nilsia, dans la partie orientale de la Finlande, et au Sud du pays à Kermio.

Au **Portugal**, la silice en grain provient principalement des districts de Coimbra et de Santarem.

En **Espagne**, la production annuelle de silice en grains est de l'ordre de 500 000 t, principalement exploitées dans les Asturies et dans la province de Burgos. Les usines de traitement du sable sont généralement implantées dans le Nord du pays, à proximité des centres de consommation (fonderie, verrerie). La principale entreprise espagnole d'exploitation de la silice est Anenois de Arija SA.

En **Suède** et au **Danemark**, les sables industriels sont exploités, soit en carrière, soit par dragage du plateau continental. Le principal exploitant scandinave est Aklsell Mineral AB.

Il existe très peu de données sur l'économie de la silice en Europe de l'Est :

- La **Tchécoslovaquie** exporte de petite quantité de sable industriel ;
- En **Roumanie**, la production de silice en grains provient surtout des formations oligocène des Carpathes orientales ;
- En **Bulgarie**, les sables siliceux sont des sous-produits du traitement du kaolin ;
- La **Yougoslavie** importe de petites quantités de sable de RFA et exploite quelques gisements dans la partie nord-orientale de la Slovénie.

La consommation occidentale de quartz et de silice naturels à haute pureté, destinés essentiellement à l'élaboration du silicium, du ferro-silicium et du carbure de silicium, est évalué entre 4,5 et 5 millions de tonnes.

Il convient de noter que le principal producteur de quartz pour l'industrie de l'électronique est le Brésil, avec 1510 t en 1986 (plus de 2100 t prévues en 1987). Le Brésil couvre 46 % de la demande mondiale de ce minéral d'intérêt stratégique. Les USA, l'Inde, l'Angola et Madagascar sont également d'importants producteurs de quartz naturel ("lascas").

2 - GEOLOGIE

2.1 - MINERALOGIE DE LA SILICE

La silice (SiO_2) se présente sous diverses formes cristallisées ou amorphes.

Dans la nature, la forme cristallisée de la silice la plus commune est le quartz qui est un constituant majeur des roches et appartient au groupe minéralogique des silicates.

L'oxygène et le silicium sont les éléments les plus abondants de la croûte terrestre et le quartz représente environ 12 % de la masse de celle-ci.

Le quartz est présent dans toutes les grandes catégories de roches (ignées, métamorphiques et sédimentaires).

La tridymite et la cristobalite constituent des formes cristallisées plus rares se formant à haute température dans certaines roches volcaniques. Il existe également des formes amorphes ou micro-cristallines, telles que l'opale, la calcédoine et les variétés de silex : jaspes, onyx. La silice peut également avoir une origine organique (diatomite, spongolite, radiolarite) ; elle se présente alors sous forme d'opale.

Les différentes formes cristallines de la silice évoluent avec la température (cf. fig. 1), cette évolution se traduisant à la fois par des changements de formes cristallines et des dilatations ou des retraits plus ou moins brutaux.

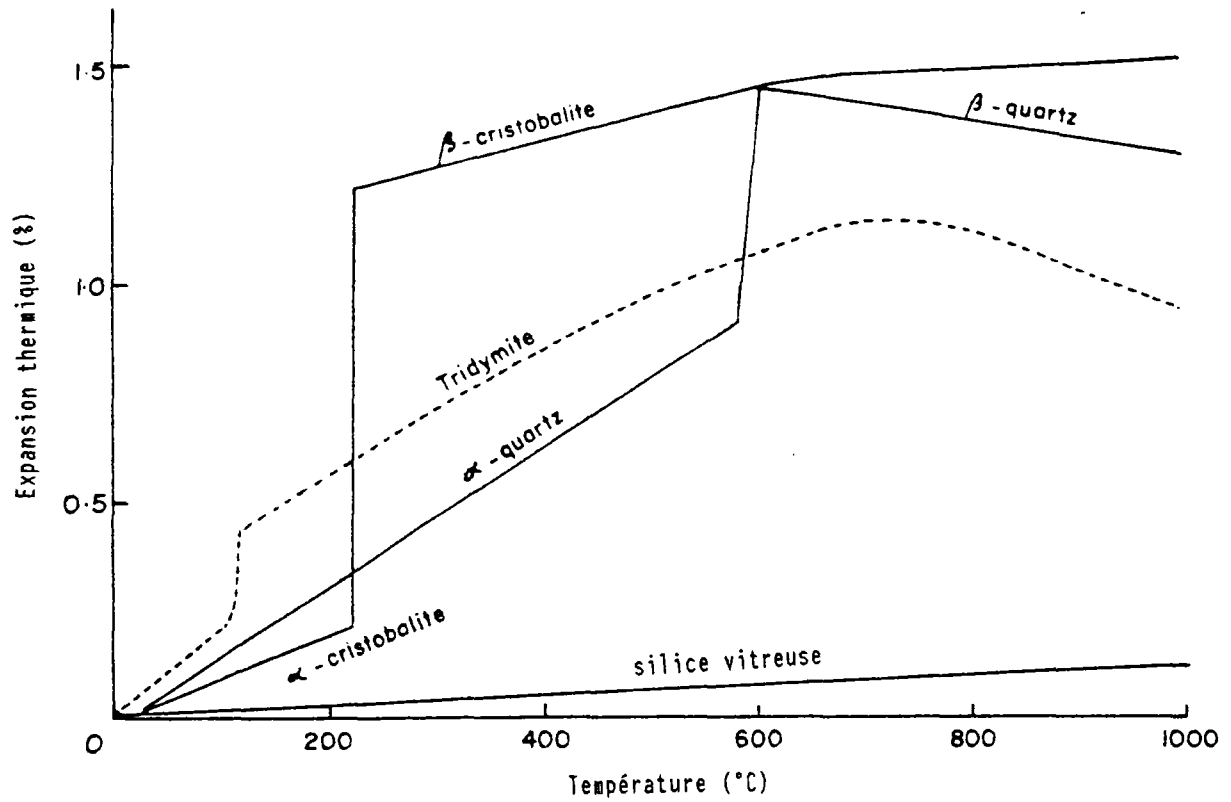
Le quartz présente une bonne résistance physique (dureté 7 dans l'échelle de MOHS) et une excellente résistance chimique (inaltérable à la plupart des acides).

Les gisements de silice en grains (sables siliceux) peuvent dériver de l'érosion de roches ignées, métamorphiques ou de formations arénacées préexistantes. Les sédiments siliceux peuvent être concentrés dans des environnements divers : marin, fluviatile, glaciaire ou éolien.

Les gîtes de silice en roche peuvent avoir une origine profonde (filons de quartz ou de pegmatite), sédimentaire (grès à ciment siliceux) ou métamorphique (quartzites).

FIGURE 1

Propriétés d'expansion thermique des principales formes de silice



La silice est un produit réfractaire se caractérisant par :

- une température de fusion de l'ordre de 1600°C,
- une densité voisine de 2,2,
- un haut pouvoir isolant : $\alpha = 1,5 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ à 20°C,
- un très faible coefficient de dilatation thermique,
 $\alpha \approx 0,5.10^{-6}$ de 20°C à 1000°C.

2.2 - DISTRIBUTION DES GISEMENTS

Les sables argileux, souvent riches en impuretés et essentiellement utilisables pour la fonderie, constituent des roches dont les gisements sont largement répandus dans le monde.

Par contre, la silice pure est inégalement distribuée dans le monde : l'Asie et l'Afrique en sont pratiquement dépourvues (le Japon doit importer la quasi-totalité de ses besoins).

En Europe occidentale, l'Italie, la Suisse, la Grande-Bretagne et les pays scandinaves ne possèdent pas de gisement de haute qualité.

Les rares pays européens qui disposent d'une silice appropriée aux besoins des industries utilisatrices sont la France, la Belgique et la RFA.

Les gisements français de silice en grains fournissent des matériaux dont la teneur en SiO_2 est supérieure à 95 %.

Il s'agit :

- le plus souvent de sédiments détritiques meubles (ou peu consolidés)
 - sables ou grès quartzeux,
 - sables feldspathiques,
- éventuellement de formations meubles de type altérite :
 - arènes,
 - kaolins primaires,
 - arkoses kaolinisées,
 - etc..

En France, les silices en grains les plus pures sont en général des produits de l'altération chimique ou mécanique de roches siliceuses préexistantes qui ne sont ensuite déposés à la faveur de transgressions marines dans les bassins sédimentaires où ils ont pu, en période de climat désertique, faire l'objet de remaniements éoliens bénéfiques à un meilleur classement et à l'élimination des minéraux ferro-magnésiens et alumineux.

A la fin du cycle géologique, ces gisements ont été le plus souvent protégés de l'érosion par un recouvrement sédimentaire protecteur (argiles, marnes...).

Les gisements français de silice en roche sont constitués de matériaux extra-siliceux, soit de type quartz filonien pur, quartz pegmatitique, ou quartzite, situés dans les massifs cristallins anciens, soit de grès très purs d'origine sédimentaire. Ces formes de silice trouvent leurs applications dans l'électrométallurgie et dans la fabrication de certains verres.

Les différentes sortes de silice sont donc complémentaires et non interchangeables industriellement.

Il convient également de signaler qu'une faible partie de la production mondiale de silice pour l'industrie est fournie par des minéraux artificiels (quartz de synthèse pour composants électroniques, cristallisé à partir d'un germe cristallin naturel ou "lascas").

2.3 - REPARTITION DES GISEMENTS FRANCAIS DE SILICE EN GRAINS

L'évolution des spécifications techniques, dans le domaine de la fonderie notamment, a conduit à l'abandon de nombreux gisements de sables silico-alumineux et à leur remplacement par des sables plus purs et des liants naturels (bentonite) ou synthétique (résine).

Aussi, à l'heure actuelle, seuls les gisements fournissant en abondance un matériau homogène présentent un réel intérêt économique (pureté chimique et constance granulométrique principalement).

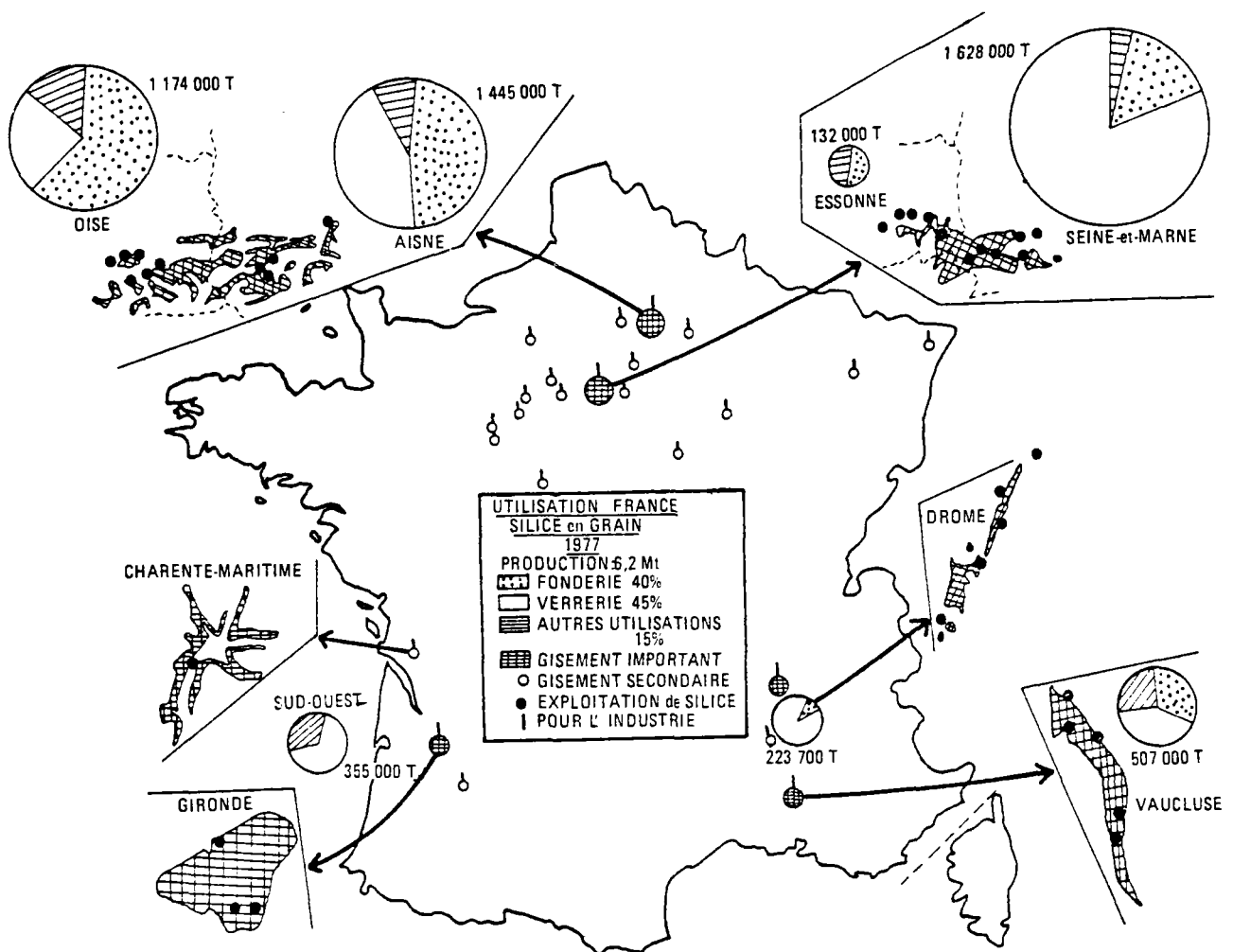
En 1984, une centaine de carrières de roches siliceuses à usage industriel ont été recensées contre plus de 400 vers 1970.

Les gisements français exploitables se situent dans 3 régions principales qui recèlent près de 90 % des ressources nationales en silice (fig. 2) :

- partie centrale et nord-est du Bassin parisien,
- Bassin aquitain,
- bordure du couloir rhodanien.

FIGURE 2

Principaux gisements français de silice pour l'industrie
(Source Syndicat National des Producteurs de Silice pour l'Industrie)



2.3.1 - GISEMENTS DU BASSIN PARISIEN

La plus grande partie des ressources françaises en silice de haute qualité provient des dépôts de sables siliceux du centre du Bassin parisien dont les gisements forment deux croissants, l'un au Nord, l'autre au Sud de la région de Paris.

Le gisement auversien du Nord du bassin (Eocène)

Les sables de Beauchamp (étage Bartonien) s'étendent au Sud de l'Oise et de l'Aisne de la région de Senlis dans l'Oise, jusqu'aux environs de Reims dans la Marne. Le faciès auversien est sujet à des modifications assez importantes d'un gisement à l'autre. Les gîtes exploitables, présentent une qualité de sables extra-siliceux qui convient aux utilisations en verrerie et fonderie. Ils se situent généralement sous un recouvrement important de marnes calcaires et de calcaires marneux pouvant atteindre 20 m d'épaisseur, la masse exploitable étant souvent comprise entre 20 et 30 m.

Le gisement stampien des sables de Fontainebleau (Oligocène)

Ces sables, également tertiaires mais d'âge stampien, présentent le faciès bien connu des sables blancs de la forêt de Fontainebleau. Ils s'étendent au Sud des départements de la Seine-et-Marne, de part et d'autre de la vallée du Loing, et dans l'Essonne. Ils disparaissent en s'enfonçant profondément à l'Ouest et au Sud sous la masse des calcaires constituant la surface structurale de la plaine de Beauce. Suivant la topographie du lieu considéré, la découverte est de l'ordre d'une quinzaine de mètres. La masse exploitable varie de 20 à 30 m d'épaisseur, atteignant localement 55 m. Les remaniements éoliens, subis par ces sables après leur mise en place, sous climat semi-désertique, ont été déterminants dans la qualité des formations que l'on exploite aujourd'hui autour de Nemours. Débarrassés de toute impureté (particules fines entraînées au loin par le vent), ces sables ont été accumulés en dunes entre lesquelles se forment des daïas. La silice mise en solution dans ces daïas a donné naissance, sous l'effet du battement d'une nappe phréatique, à des bancs de grès. L'érosion intervenue a déblayé les sables des dunes, ne laissant subsister (inversion de relief) que les dalles de grès couronnant des sables qui, ainsi protégés, sont d'une pureté et d'une régularité exceptionnelles. Ceux-ci conviennent donc tout particulièrement à la fabrication de verrerie fine, en cristallerie et verrerie de silice pure. De renommée mondiale, ce gisement de Nemours fournit notamment de grandes cristalleries françaises et italiennes. Par contre, leur granulométrie fine limite leur utilisation en fonderie.

Certains niveaux gréseux sont également exploités pour des usages spéciaux (électrometallurgie).

2.3.2 - LES GISEMENTS DU SUD-EST

Le gisement de la Drôme au Nord (Pays de Royans) et celui du Vaucluse au Sud (pied du mont Ventoux) constituent deux bassins distincts.

● Le bassin de la Drôme présente la particularité d'associer généralement, au sein des mêmes carrières, l'exploitation du kaolin et celle du sable. Ces sables de la fin du Secondaire et du début Tertiaire proviennent de la décomposition sur place de roches granitiques (argiles kaoliniques et sables siliceux) et n'ont pas subi de remaniement éolien. La grosseur de leurs grains exclut certaines utilisations, en fonderie notamment ; mais ceux-ci sont en revanche très appréciés dans le domaine des abrasifs. Par ailleurs, la technologie appliquée à la transformation et au raffinage des kaolins a conduit les producteurs à étendre celle-ci aux sables dont ils sélectionnent la granulométrie par cyclonage, leur donnant ainsi des débouchés nouveaux, autres que fonderie ou verrerie (présence d'argile dans les sables).

Les gisements siliceux de la Drôme regroupent 3 grands types de formation :

- Les sables du Royans

D'âge éocène, ils sont situés entre les calcaires secondaires (Urgonien et Sénonien) de la bordure ouest du Vercors et les formations oligocènes (Stampien ou Chattien) du Bas-Dauphiné. Ils se présentent sous deux faciès : sables blancs ou décolorés, et sables rouges.

Les gisements sont situés dans les régions de Saint-Nazaire-en-Royans et Oriol-en-Ragans (sables blancs et rouges) d'une part, Hostun, Beauregard-Baret et Babires (sables kaoliniques) d'autre part, Pont-en-Royans (sables blancs) enfin.

La puissance de ces gisements peut atteindre 100 m.

- Les sables feldspathiques de Douevas-Larnage

Situés dans la région comprise entre Saint-Uze et Larnage, ils constituent une arène kaolinique blanche résultant de l'altération de massif cristallin sous le climat subtropical de l'Eocène. Dans les carrières, les matériaux extraits sont divers : sables feldspathiques, sables kaoliniques, sables siliceux. Ils sont souvent mêlés à d'autre faciès plus graveleux, voire de blocs, qui constituent souvent un handicap pour l'exploitation.

- Les roches siliceuses de Saint-Paul-Trois-Châteaux

Elles correspondent à deux formations distinctes qui couvrent de grandes surfaces : les sables siliceux plus ou moins kaoliniques de l'Eocène et les sables mélangés à des quartzites datés du Crétacé supérieur.

● **Le gisement du Vaucluse**, qui s'étend au pied du versant sud du mont Ventoux, dans la région de Bédoin et de Mormoiron offre des sables siliceux d'âge crétacé (Albien, Cénomanién).

Les sédiments proviennent de l'altération des formations des sables et grès glauconieux du Cénomanién ("sables ocre" et "sables blancs").

La puissance moyenne du gisement est de l'ordre de 50 m mais ces faciès posent des problèmes d'homogénéité.

Les carrières produisent des sables qui conviennent à la fonderie et à la verrerie.

2.3.3 - LES GISEMENTS DU SUD-OUEST (BASSIN AQUITAIN)

Dans le Bassin aquitain, il existe des réserves en sables industriels localisées dans les formations marines du Crétacé supérieur. Les principaux secteurs d'intérêt sont situés dans la partie sud des deux départements charentais :

- le secteur de St-Agnant-Cadeuil,
- le secteur de Tonnay-Charente-Tonnay-Boutonne,
- le secteur de Saintes-Cognac - St-Jean d'Angely,
- le secteur d'Angoulême-Combiers.

Les sables siliceux exploités dans le Sud de la Charente Maritime et dans le Lot-et-Garonne forment des gisements isolés. Les sables de St-Césaire datés du Coniacien inférieur (Crétacé) sont d'origine marine et correspondent à des chenaux de quelques centaines de mètres de large s'étendant sur une longueur de quelques kilomètres seulement. La puissance du gisement exploité à St-Césaire, dans la vallée du Coran n'excède pas 12 m. Ces sables conviennent à certains verres mais leurs applications en fonderie sont limitées.

Les gisements de silice des Landes, d'âge quaternaire et de large extension, ont été mis en place dans des conditions proches de celles des sables du Bassin parisien, présentant un important remaniement éolien. L'épaisseur du gisement est de l'ordre de 25 à 30 m dans la région de Marcheprime (Gironde).

Homométriques et purs, ces sables siliceux, à grains relativement grossiers, (ce qui exclue à l'heure actuelle leur utilisation en fonderie), permettent la fabrication de verre d'emballage mi-blanc et coloré.

La présence d'une nappe phréatique baignant la formation sableuse entraîne une extraction de la silice par drague suçeuse.

2.3.4 - AUTRES GISEMENTS FRANCAIS

A côté des gisements précédemment décrits, certaines formations très localisées restent aujourd'hui exploitées un peu partout en France.

On peut citer pour mémoire les sables silico-alumineux des auréoles secondaires du Bassin parisien (sables du Perche dans l'Eure-et-Loir et la Sarthe, sables de l'Yonne, sables des environs de Montiéramey dans l'Aube, sables de Lorraine et d'Alsace (Meurthe et Moselle, Bas-Rhin).

Dans le tableau 6, figurent les caractéristiques des principaux gisements français de silice en grains, dans les tableaux 7 et 8 les compositions chimiques moyennes de quelques sables, bruts ou lavés, dans le tableau 9 les principaux exploitants français de silice pour l'industrie, et dans le tableau 10 la production de silice par région.

2.4 - LES GISEMENTS FRANCAIS DE SILICE EN ROCHE

La France possède d'importantes ressources en grès, quartz, quartzites et galets mais les gisements n'ont jamais été répertoriés avec précision. Les réserves connues représentent moins de 20 ans d'exploitation. Certains bancs de grès sont exploités sélectivement dans les carrières de silice en grains du Bassin parisien (Stampien). Des quartz et quartzites sont des produits annexes à des productions de granulats ou ils peuvent être sélectionnés lors de l'exploitation de feldspath dans des pegmatites.

Les usines de ferro-silicium sont alimentées en matières premières à partir de bancs de galets alluvionnaires fluviatiles ou sous-marins (Dordogne, Lot, Picardie...).

En dehors du Bassin parisien, les principaux départements français producteurs de silice en roche sont :

- l'Allier,
- l'Aveyron,
- le Calvados,
- le Gard,
- le Lot,
- la Savoie.

Le plus important exploitant français de silice en roche est la Sogerem, filiale du groupe P.U.K..

TABLEAU 6
Caractéristiques des principaux gisements français de Silice en grains
 (Source UNICEM)

REGION	DEPARTEMENT	CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	GRANULOMETRIE	CARACTERISTIQUES CHIMIQUES	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 (ragréage)
	VAUCLUSE		AFA : 50/70	Fe ₂ O ₃ = 300 ppm		Acier	Verre bouteille	
SUD-OUEST	CHARENTE-MARITIME 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	Impropres à la fonderie	Verre coloré	

TABLEAU 6 (suite)

REGION	DEPARTEMENT	CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	GRANULOMETRIE	CARACTERISTIQUES CHIMIQUES	AUTRES PARTICULARITES	PRINCIPALES UTILISATIONS		
						FONDERIE	VERRERIE	AUTRES
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 finés		Enduits, Peintures, Mortiers
PARISIEN	SEINE et MARNE	- Sable fin - Sable pur	AFA : 65/70 ou 55/70	$Fe_2O_3 = 100/150 \text{ ppm}$	- 2 qualités du sable: 1 - Sable de Nemours 2 - Sable de Bourron- Marlotte	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 $Fe_2O_3 = 150/200 \text{ ppm}$	- Teneur en Fe_2O_3 et Al_2O_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	$Fe_2O_3 = 90/170 \text{ ppm}$ - très basse teneur en minéraux infusibles	- Teneur en Fe_2O_3 et Al_2O_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

TABLEAU 7
France - Sables industriels - Compositions chimiques moyennes (sables bruts)
(Valeurs en %)

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	PF
S. de Beauchamps	99,1	0,05	0,46	0,04	0,03	0,07	-	0,03	0,3
S. de Fontainebleau	99,6	0,03	0,46	0,01	0,03	0,09	-	0,009	0,15

TABLEAU 8
France - Sables industriels - Compositions chimiques moyennes
(après traitement = lavage)
(Valeurs en %)

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	PF
S. de Beauchamps	99,5	0,02	0,15	0,1
S. de Fontainebleau	99,7	0,01	0,1	0,05
S. du Vaucluse	99,5	0,025	0,25	0,2
S. de St Césaire	98,5	0,20	0,50	0,3

TABLEAU 9

Principaux exploitants français de silice pour l'industrie

(Source : Annuaire de l'UNICEM 1987)

Sables argileux

dpt	exploitant
11	LITTORAL (Sté Nouvelle du) S.S 38 rue de la Paix, B.P. 12 11210 Port-la-Nouvelle T.68-48-00-08
30	SABLE CHAUX S.S. et U Le Devois-de-l'Estang, Tresques 30330 Connaux T. 66-89-57-32
67	QUARTZ D'ALSACE S.S. et ET. 13, rue de la Sablière, Kaltenhouse 67240 Bischwiller T.88-63-01-01.
75	PENARROYA S.S. Tour-Maine-Montparnasse, 33 av. du Maine, 75751 Paris. Cedex 15 T(1) 45-38-48-48 T
91	FULCHIRON (Sté) S.S. et ET 30, rue de Malabry, B.P. 14, 91720 Maisse T(1). 64-99-46-30
94	BERVIALLE (Ets) S.S, 19, bd Paul-Vaillant-Couturier, 94800 Villejuif T(1) 47-26-09-00 Tx 204852F
94	CATTEAU-LANGLOIS S.S. 21, rue des Pierrelais, 92320 Châtillon-sous-Bagneux T (1) 47-26-70-02
94	SEMANAZ & Cie (Ets) S.S, 11 bis quai du Rancy, 94388 Bonneuil-sur-Marne. Cedex T (1) 43-39-52-00

Sables siliceux et silices fines

dpt	exploitant
06	SILICES ET REFRACTAIRES DE LA MEDITERRANEE S.S. et ET.1114 La Valmasque, Rte d'Antibes. 06410 Biot T.93-65-08-52
11	LITTORAL (Sté Nouvelle du) S.S., 38 rue de la Paix,B.P. 12, 11210 Port-la-Nouvelle T.68-48-00-08
17	SEC (Silices) S.S Saint-Césaire 17770 Brizambourg T.46-91-56-00
26	SIKA (Produits Minéraux Siliceux du Sud-Est) S.S.,ET et U. BP 226/30 Hostun T 75-48-82-11
28	SABLEM S.S. Ymeray B.P. 11, 28320 Gallardon T.
33	SILAQ Corresp. B.P.15, Marcheprime, 33380 Biganos T.56-23-17-78
47	SILICE D'ALBRET (S.A.) d'exploitation des Ets Humbert-Chevallier) S.S 7 bd Jean-Darlan, 47600 Nérac T.53-65-07-10
67	QUARTZ D'ALSACE S.S. et ET 13, rue de la Sablière, Kaltenhouse 67240, Bischwiller T.88-63-01-01

TABLEAU 9 (suite)

- 73 PELLEREY Frères (Ets) Rte du Bourget, 73500 Modane T.79-05-01-67
- 75 SIFRACO-COMPAGNIE FRANCAISE DES SILICES ET SABLES DE NEMOURS S.S,
11 rue de Téhéran. 75008 Paris T(1) 45-62-42-22.
- 75 PENARROYA S.S. Tour-Maine-Montparnasse, 33 avenue du Maine,75751 Paris - Cedex 15
T(1) 45-38-48-48.
- 77 BOURRON S.S., route nationale 7, 77780 Bourron-Marlotte T(1) 64-45-90-19
- 77 GSI (Grès et Sables Industriels) S.S. et Corresp. 4, rue de Foljuil, St-Pierre-les-Nemours,
B.P. 522, 77794 Nemours Cedex T(1) 64-28-19-98
- 91 FULCHIRON (Sté) S.S. et ET 30, rue de Malabry B.P. 14 91720 Maisse T(1) 64-99-46-30
- 92 SPIR (Sté des Produits Industriels du Rhône) S.S. Tour Manhattan. Cedex 21, 92087 Paris-
la-Défense (T(1) 42-85-10-05
- 92 SAMIN (Sté d'Exploitation de Sables et Minéraux) S.S et B 9 square Watteau. B.P. 4. 92403
Courbevoie Cedex T.(1) 43-34-81-40 Tx. SAMIN 613127F (Voir publicité en tête de
chapitre)
- 94 SEMANAZ & Cie (Ets) S.S.) 11bis, quai du Rancy, 94388 Bonneuil-sur-Marne. Cedex T(1)
43-39-52-00.
- 94 BERVIALLE (Ets) S.S. 19 bd Paul-Vaillant-Couturier, 94800 Villejuif T(1) 47-26-09-00.
- 94 CATTEAU-LANGLOIS S.S., 21 rue des Pierrelais, 92320 Châtillon-sous-Bagneux T(1) 47-
26-70-02
- 94 SOCIETE INDUSTRIELLE DE LA COMBLE "SIC" Corresp. 19, bd Paul-Vaillant-
Couturier, 94800 Villejuif T(1) 47-26-09-00.

Silices en roche pour l'industrie

- | dpt | exploitant |
|------------|---|
| 75 | SIFRACO-COMPAGNIE FRANCAISE DES SILICES ET SABLES DE NEMOURS S.S, 11
rue de Téhéran. 75008 - Paris T(1) 45-62-42-22. |
| 75 | SOGEREM S.S. 23, rue Balzac, 75360 Paris Cedex 08 |
| 92 | SPIR (Sté des Produits industriels du Rhône) S.S.) Tour Manhatan, Cedex 21, 92087 Paris-
la-Défense T(1) 42-85-10-05 |
| 94 | CATTEAU-LANGLOIS S.S., 21 rue des Pierrelais - 92320 Châtillon-sous-Bagneux T(1) 47-
26-70-02. |

TABLEAU 10
Productions françaises de silice pour l'industrie en 1984
 (Source : Inventaire national des carrières)
 (Valeurs en tonnes)

Région	Quartz industriel	Quartzite industrie	Sable industriel
Alsace	-	-	368 589
Aquitaine	4 350	-	325 237
Auvergne	-	72 480	-
Bourgogne	--	-	17 149
Bretagne	2624-	-	1 608
Centre	--	-	48 830
Champagne-Ardenne	-	-	17 045
Ile-de-France	-	-	1 689 834
Languedoc-Roussillon	9 337		185 183
Limousin	8 234	-	-
Pays-de-Loire	-	-	17 183
Lorraine	-	-	5 662
Midi-Pyrénées	14 960	-	-
Basse Normandie	-	17 864	5 713
Picardie	-		2 187 038
Provence Côte d'Azur	-	-	503 207
Rhône-Alpes	35 707	24 232	142 799
TOTAL	120 522	114 576	5 222 502

3 - SECTEURS D'UTILISATION

Les applications industrielles des produits riches en silice sont extrêmement variées (cf. tableau 11).

L'Industrie du verre et celle de la fonderie sont les principaux marchés des sables siliceux industriels. Ces deux marchés représentent, en moyenne, depuis 1970, près de 85 % de la consommation française de sables industriels.

Si le marché des sables pour fonderie était dominant, avant 1970 cette tendance s'est inversée à partir de 1977. Les effets de la récession importante de l'industrie de la fonderie ont été compensés par la bonne tenue des industries du verre.

Le marché des applications diverses, resté relativement stable, en valeur relative depuis 1970, a subi une sensible évolution de structure, du fait de restrictions d'emploi des sables siliceux comme abrasifs de sablage et du développement d'applications nouvelles (filtration, charges, farines de silice...).

La répartition entre les grands types d'utilisation de la silice en grains s'établit depuis une quinzaine d'années de la façon suivante :

- verrerie : 45 %,
- fonderie : 40 %,
- divers : 15 %.

La silice en roche trouve l'essentiel de ses débouchés dans l'électrométallurgie (ferro-silicium et silicium métal), l'électronique et la fabrication des silicones.

TABLEAU 11
Principales utilisations de la silice naturelle (y compris les granulats)
Source : Observatoire des matières premières

Bâtiment, Travaux publics, Génie civil - mortiers, ciments, bétons et aggrégats - produits en ciment (tuyaux, blocs, parpaings) - matériaux d'enrochement et de viabilité - empierrement des routes, ballastage, remblais - produits de charge pour macadam et revêtements asphaltés et bitumineux - lits de filtrage des eaux et effluents Industries minières et pétrolières et pétrolières - liants hydrauliques - fracturation - remblayage - broyage, concassage - laveries de charbon	Industries céramiques - poteries et grès - faïences - réfractaires . briques de silice . autres (spinelles, etc...) . réfractaires spéciaux : . carbure de Si . nitrure de Si . borure de Si . tuiles de silice pour aéronautique - émaux - revêtements et scellements fours, isolation - moules et lits de sables Industries verrières - verres - verres de silice - quartz fondu - verres spéciaux - fibres de verre	Industries métallurgiques - sables de fonderie (moules et noyaux) - fondants - ferro-silicium, agent : . de désoxydation . d'alliage . réducteur - silicium métallurgique agent . de désoxydation . d'alliage . réducteur - silicium métallurgique agent . de désoxydation . d'alliage Produits de charge - peintures - papiers - plastiques et caoutchoucs - cosmétiques, médicaments Autres - agriculture (amendements, stockage de grains) - transports (sablage) - filtrage des gaz	Industries chimiques - silice activée - gel de silice - silicates - silicones - catalyseurs, tamis moléculaires Abrasifs - papier de verre - carbure de silicium - produits de polissage Industries électriques et électroniques - semi-conducteurs (silicium) - quartz piézoélectrique - cellules photovoltaïques - fibres optiques
--	--	--	---

3.1 - INDUSTRIE DU VERRE

L'industrie du verre regroupe deux activités très différentes :

- le verre mécanique, industrie à investissements lourds, effectue une production de masse dans les domaines du vitrage, de la fibre, du verre d'emballage, du verre de table et du verre technique.
- le verre "soufflé" ou "à la main", production artisanale tournée vers l'Art et la Création, effectue des productions de prestige ou de précision.

Ces diverses branches ont, ensemble, réalisé en 1987 23 milliards de francs de chiffre d'affaires et elles emploient 42 000 personnes. Le quart en tonnage et le tiers en chiffre d'affaires de leur production sont voués à l'exportation, ce qui entraîne un apport net de devises de plus de 4,5 milliards de francs. La France occupe le 6^{ème} rang des producteurs de verre dans le monde.

3.1.1 - LA FABRICATION DU VERRE

Les matières premières servant à la fabrication du verre sont essentiellement la silice, extraite de carrières de sable situées généralement à proximité des usines, le carbonate de soude, la chaux et la magnésie sous forme de calcaire et de dolomie. L'industrie du verre consomme en moyenne 700 kg de silice par tonne de verre produite. La fabrication du verre comporte cinq phases successives :

- **La préparation du mélange vitrifiable ou "lit de fusion"** dont la composition dépend de la nature du verre désiré. D'une manière générale, un mélange est constitué par :
 - 72 % environ de vitrifiants (surtout du sable siliceux),
 - 14 % environ de fondants (carbonate et sulfate de soude) pour les verres courants, ayant pour rôle de favoriser la fusion,
 - 14 % de stabilisants (carbonate de chaux, alumine, magnésie) destinés à renforcer la résistance à l'eau ou la résistance chimique. Suivant les besoins, on ajoute divers adjuvants (bore, oxydes métalliques, etc.) pour modifier certaines propriétés du verre, le colorer ou le décolorer. A ces matières premières, on additionne généralement, pour faciliter la fusion, des déchets de verre dits "groisil" ou "calcin" dans une proportion variable suivant les productions.

Dans les verreries modernes, le dosage et le mélange des matières premières sont effectuées automatiquement.

La composition du verre usuel, du cristal au plomb et du verre optique est la suivante.

Constituants	Forme la plus fréquente	Verre usuel (% en poids)	Cristal au plomb (% en poids)	Verre d'optique (% en poids)
Silice	sables (+ verre de recyclage éventuellement)	70 à 73 %	55 à 60 %	40 à 70 %
alumine	feldspaths, feldspathoïdes phonolite, laitier	0,2 à 2 %	-	0 à 2 %
oxyde de fer	existe dans le sable	0,02 à 2,5 %	-	-
soude	carbonate et sulfate de soude	13 à 16 %	10 à 12 %	8 à 15 %
chaux	calcaire et dolomie	8 à 13 %	-	3 à 12 %
magnésie	dolomie	0 à 4 %	-	0 à 2 %
oxyde de plomb	minium de plomb	-	24 à 30 %	10 à 65 %
acide borique	borate de soude	-	-	5 à 15 %

Source : Institut du verre, 1981.

- **La fusion** des matières constitutives et leur transformation en verre a lieu dans des fours à bassins ou à pots. Dans un four à bassin, la masse en fusion se déplace progressivement dans 3 zones successives :

- la zone de fusion où les constituants, portés progressivement à une température de l'ordre de 1500°C, fondent et se combinent pour former le verre. Cette masse en fusion contient de nombreuses bulles de gaz ;
- la zone d'affinage où le maintien du bain à haute température assure l'homogénéisation et le dégazage du verre ;
- la zone de braise, dans laquelle on laisse alors le verre se reposer et refroidir jusqu'à une température où le degré de viscosité est compatible avec la mise en forme des objets à obtenir.

- la mise en forme à chaud

Elle dépend du type de produit à obtenir :

- pour le verre creux (bouteilles, flacons, pots...), les paraisons ¹ à 900°C sont appliquées sur les parois d'un moule par l'action d'une presse ou par soufflage,
- pour le verre plat, les 3 principales méthodes utilisées sont :
 - . l'étirage vertical (verre à vitre),
 - . le laminage entre rouleaux horizontaux (verre imprimé, verre martelé, verre cathédrale),
 - . le flottage sur bain d'étain (glace ou "float-glass").
- pour les fibres de verre, 2 principales techniques sont utilisées :
 - . la centrifugation qui produit des fibres courtes à usage d'isolation,
 - . la filière qui produit des fibres longues appelées fibres "textiles".

- la recuisson du verre

Elle est destinée à stabiliser le verre dans l'ensemble de sa masse, par élimination des contraintes internes liées à un refroidissement rapide au cours de la mise en forme. L'opération consiste d'abord à réchauffer les produits en verre jusqu'à une température de 500°C environ, puis à les laisser refroidir très lentement.

- le façonnage des produits

Un grand nombre d'objets en verre sortent du four de recuisson terminés et prêts à l'utilisation (bouteilles par exemple).

Dans d'autres cas, le verre qui sort du four n'est qu'un demi-produit qui devra être façonné ou transformé pour être utilisable.

Le façonnage peut se faire de deux façons :

- à chaud si l'on doit déformer l'objet (verrerie de laboratoire par exemple) ;
- à froid s'il s'agit de modifier son aspect extérieur sans changer sa forme (taille et gravure mécaniques ou gravure à l'acide).

(1) paraison : quantité de verre correspondant au poids de l'objet à fabriquer, fournie par des distributeurs automatiques situés en aval de la zone de braise et au-dessus des moules.

TABLEAU 12
Approvisionnements en matière première et énergie pour
le verre mécanique

	Carbonate de soude	Calcin acheté par l'entreprise	Fuel	Propane et Butane	Gaz naturel	Electricité	Production de verre
UNITE	1 000 t	1 000 t	1 000 t	1 000 kWh	1 000 kWh	1 000 kWh	1 000 (t)
1984	763	507	506	40 379	6 124 122	1 793 683	4 224
1985	727	561	464	16 268	6 610 361	1 982 689	4 116
1986	705	583	423	17 896	5 639 054	1 985 061	4 065
1987	736	652	439	19 925	5 628 769	2 079 870	4 247

TABLEAU 13

Principaux types de verre	Produit (utilisations)
Verre plat	● Glace, verre à vitres, verre coulé, moulages (automobiles, bâtiment).
Fibre de verre	● Fibre d'isolation (bâtiment - appareillage ménager). ● Fibre de renforcement (bâtiment, ameublement, - électronique automobile, sports, loisirs).
Verre d'emballage	● Bouteillerie (emballage alimentaire). ● Flaconnage (industrie pharmaceutique - parfumerie). ● Gobeletterie (usages domestiques). ● Pâte industrielle. ● Emballage alimentaire et industriel).
Verre technique	● Verrerie de laboratoire. ● Isolateur. ● Lunetterie. ● Optique. ● Luminaire.
Verre de silice	● Brûleurs de lampes à vapeur de mercure, à iode et à iodures métalliques. ● Composants électroniques. ● Fil de silice tissable (industries aéronautiques et spatiales). ● Colonnes capillaires pour la chromatographie en phase gazeuse (laboratoire et industries).

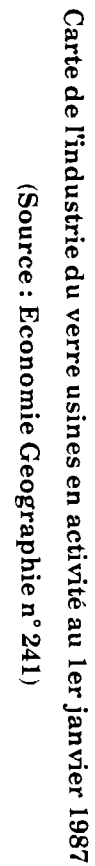


FIGURE 3

TABLEAU 14
Evolution d'ensemble de la production française de verre, en tonnes
(Transformateurs non compris)

Année	Verre plat	Fibres	Verre creux		Verre technique	Ensemble verre mécanique seul
			Mécanique	Semi-Auto/Main		
1977	606 263	191 102	2 841 942	30 960	99 964	3 690 695 *(3 770 231)
1978	538 318	210 767	2 854 732	28 502	96 751	3 651 835 *(3 729 070)
1979	675 666	216 481	2 883 127		83 084	3 858 568
1980	752 340	219 140	3 093 539		86 258	4 151 277
1981	713 337	195 651	2 974 987		78 938	3 962 913
1982	723 919	174 478	3 019 832		77 290	3 995 519
1983	783 252	163 777	3 190 927		77 014	4 214 970
1984	774 076	167 678	3 198 972		83 567	4 224 293
1985	722 671	147 497	3 165 303		80 624	4 116 095
1986	684 239	142 244	3 165 079		73 759	4 065 321
1987	703 316	148 105	3 323 973		72 192	4 247 586

*(y compris verre à la main et mixte)

TABLEAU 15
Ventilation par groupes de la production française de verre
(année 1987)

Produits	Tonnes
Verre plat et fibres	
Glaces et Verres à vitres (y compris Dalles)	677 921
Verres coulés	25 395
Moulages	0
Total verre plat proprement dit	(703 316)
Total fibres de verre	148 105
TOTAL	(851 421)
Verre creux mécanique	
Bouteilles et Bonbonnes	(2 479 604)
Flacons et Pots industriels	(437 506)
Gobeletterie	375 386
Bocaux	31 477
TOTAL	(3 323 973)
Verre technique	(72 192)
TOTAL Verreries mécaniques	(4 247 586)

() Chiffre partiel

Source : Fédération des Chambres Syndicales de l'Industrie du Verre.

3.2 - INDUSTRIE DE LA FONDERIE

L'industrie de la fonderie en France occupe une place importante dans l'économie nationale.

Les pièces de fonderie sont essentiellement en fonte, acier, aluminium ou en alliages divers, avec cependant une prépondérance de la fonte qui représente à elle seule 60 % de la production totale.

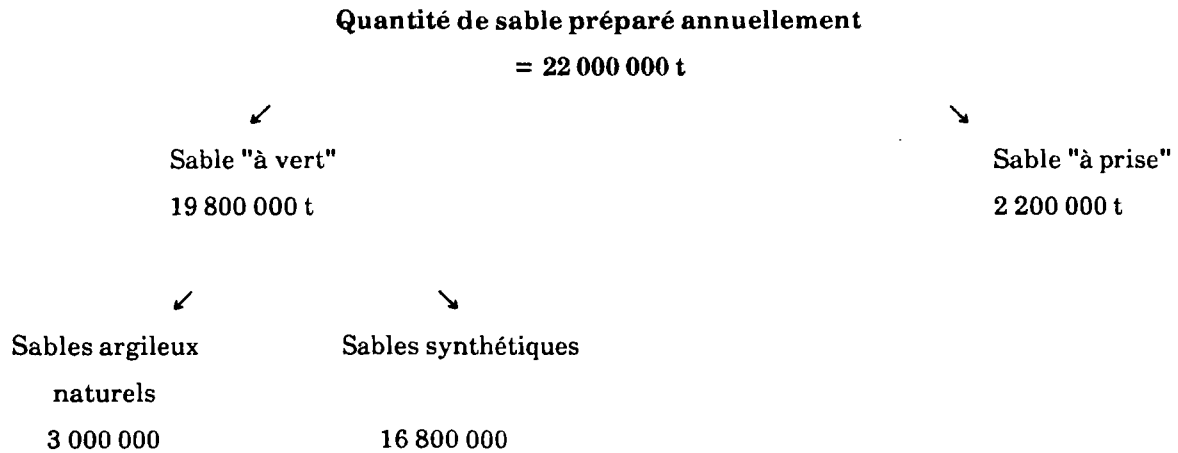
La technique de base utilisée dans l'industrie de la fonderie consiste à faire fondre un métal ou un alliage de métaux, puis à le couler dans une empreinte, le **moule**, pour obtenir une pièce de forme bien déterminée. Le premier travail du fondeur consiste à mettre au point le **moule**, généralement en sable, parfois en métal, et le **noyau** qui matérialise l'évidement de la pièce, si elle est creuse.

La plupart des pièces (environ 80 % de la production) sont coulées dans des moules dits "au sable" c'est-à-dire un volume constitué de sable, de liant, de produits d'addition divers. Les fondeurs distinguent deux grandes catégories de "sables" :

- sable "à vert" : il s'agit de sables argileux naturels, ou de sables dits synthétiques (sable siliceux ou extra-siliceux + liant argileux),
- sable "à prise" dont le liant par réaction chimique conduit à un durcissement rapide du moule. Ces liants sont à base de résine (furanique, phénolique...), de silicate (Na_2SiO_3 , ciment etc..).

Cette dernière catégorie de sable qui recouvre des domaines d'emploi bien précis (pièces très lourdes, certains noyaux) a remplacé des procédés plus anciens (étuvage) mais ne représente pas vraiment un substitut du moulage "à vert", en raison notamment du prix plus élevé du sable "à prise". Par ailleurs certains procédés modernes présentent de sérieux inconvénients de pollution.

La méthode du sable "à vert" reste donc largement prépondérante.



En moyenne, on considère que le poids de pièces coulées et le poids de sable de moulage préparé sont dans un rapport de 10.

La notion de sable préparé est fondamentale, elle diffère sensiblement de la notion de consommation de matières. En effet, un sable est régénéré périodiquement après chaque utilisation, grâce à des ajouts (sable neuf, bentonite, produits d'addition) qui permettront de maintenir ses qualités.

Les sables de moulage, dans lesquels sont incorporés des liants argileux, font généralement l'objet d'un recyclage systématique après utilisation, ce qui permet d'en réintégrer une grande partie dans la fabrication de nouveaux moules, l'appoint étant fait avec ce que l'on appelle du **"sable neuf"**.

La teneur moyenne en argile d'un sable de moulage est de l'ordre de 5 à 8 %.

Le matériau sableux constitue l'ossature du moule. Selon la qualité et la nature de la pièce à obtenir, différents types de sables seront utilisés :

- les sables siliceux sont les plus couramment utilisés, après lavage et séchage. La dilatation brutale de la silice peut provoquer des défauts sur les pièces (gales...) ; aussi pour obtenir des pièces de qualité et de grande précision, d'autres variétés de sable sont utilisés ;
- les sables au zircon, grâce à la très faible dilatation des grains et leur température de fusion élevée, sont réservés au coulage de pièces de qualité ;
- les sables de chromite sont également utilisés pour couler des pièces de haute précision en raison de leur très faible dilatation,

- les sables d'olivine, par leur dilatation très progressive, permettent également de fabriquer des moules aptes à couler des pièces exemptes de défauts. Ils sont toutefois assez peu utilisés.

Les sables à noyaux ont des compositions très différentes selon les types de production.

Exemple de formule d'un sable à noyau :

- sable siliceux : 80 %
- sable argileux : 4 %
- bentonite : 3 %
- silicate : 8 %
- noir de carbone : 3 %
- eau : 2 %

Sauf cas particulier, les sables "à noyau" ne peuvent être récupérés et régénérés, un sable neuf doit être réalisé à chaque coulée.

Le procédé de moulage au sable met en oeuvre entre 7 t et 22 t de sables (neuf + recyclé) par tonne de produit moulé.

Compte tenu de l'importance de la part du sable recyclé dans la composition du moule, on admet que la consommation moyenne de **sable neuf** par tonne de produit moulé est la suivante (tableau 14) :

TABLEAU 14
Consommation de sable neuf par tonne de métal coulée

Pour 1 000 kg	Fonte	Acier	Aluminium
Sable siliceux	1 000 kg dont moulage 600 kg noyautage 400 kg	2 000 kg dont moulage 1400 kg noyautage 600 kg	3 000 kg dont moulage 2000 kg noyautage 1000 kg
Bentonite	36 kg	42 kg	60 kg

3.3 - UTILISATION DE LA SILICE SOUS FORME METALLIQUE

Les industries métallurgiques utilisent 3 grandes variétés de produits siliceux nécessitant une matière première à haute pureté de silice :

- les ferro-silicium,
- le silicium métal ou silicium métallurgique,
- les carbures de silicium.

Le silicium est contenu dans un grand nombre d'agents d'addition comme élément réducteur, pour l'affinage de l'acier dans les fonderies, pour améliorer la fonte, pour les alliages ferreux, les tôles magnétiques, l'élaboration du magnésium par silico-thermie, etc.. La forme d'addition la plus courante est le ferro-silicium. Il entre dans l'élaboration de pratiquement tous les aciers et fontes. La sidérurgie utilise toute une variété d'agents désoxydants ou inoculants contenant de fortes teneurs en silicium. Les plus répandues sont le silico-calcium (Ca, Si), les Ca-Mn-Si et le Ca-Ba-Si.

Le silicium de qualité métallurgique ($\text{SiO}_2 > 97,5 \%$) est un élément d'addition pour les alliages non ferreux (notamment d'aluminium) les superalliages et certains aciers spéciaux. Il est également utilisé comme matière première dans la fabrication des silicones.

Le silicium de qualité électronique, dérivé de la fabrication des silicones, est le matériau de base de la fabrication de semi-conducteurs et de piles photovoltaïques.

Le carbure de silicium est utilisé comme ferro-alliage, abrasif et base d'élaboration de réfractaires.

3.3.1 - LE SILICIUM EN ACIERIE

La consommation de silicium, essentiellement sous forme de ferro-silicium, peut varier entre 0,4 et 2,5 kg/t d'acier.

Le silicium a plusieurs rôles distincts en acierie :

- c'est principalement un agent de désoxydation,
- il peut jouer un rôle d'agent réducteur,
- c'est un élément d'alliage pour certains aciers spéciaux.

Les principaux effets du silicium sont dus à l'amélioration de la résistance mécanique et l'augmentation de la limite d'élasticité par un effet de durcissement de solution solide de la ferrite. Il améliore d'autre part la résistance à chaud et à la corrosion.

- Le silicium diminue la solubilité du carbone dans le fer doux, améliore la perméabilité magnétique, la résistivité électrique et diminue les pertes par hysteresis.

Le silicium est un élément d'alliage pour les aciers à soupapes et les aciers à haute limite d'élasticité pour ressorts.

- Les propriétés du silicium sont aussi utilisées dans certains aciers de construction, les aciers travaillant à haute température et la plupart des aciers inoxydables et réfractaires.

3.3.2 - LE SILICIUM EN FONDERIE

Le silicium joue un rôle important en fonderie. Au départ, la fonte contient déjà de 0,7 à 1 % de silicium, mais il est en général nécessaire d'en rajouter de 0,6 à 1,5 %.

A côté du fer et du carbone, le silicium est un constituant majeur des fontes dans lesquelles il joue plusieurs rôles :

le silicium se comporte comme un ajout de carbone (1 % Si équivaut à 0,33 % C) et a ainsi une action sur la coulée,

- Il agit comme graphitisant, favorisant la décomposition de la cémentite ou la formation de lamelles de graphite. Il s'agit donc dans le même sens qu'une solidification ralentie, ce qui est important dans la coulée de pièces de faible épaisseur. Le graphite a une action lubrifiante, il diminue l'usure et améliore "l'usinabilité".

3.3.3 - LE SILICIUM DANS LES ALLIAGES NON FERREUX

Après les fontes et l'acier, le principal secteur de consommation de silicium est celui des alliages non ferreux, notamment des alliages légers à base d'aluminium.

Le silicium et le magnésium accroissent sensiblement la résistance de l'aluminium ; de ce fait le silicium est présent dans presque tous les alliages d'aluminium, à des teneurs allant de 0,4 à 1 % Si. Le silicium permet d'améliorer les caractéristiques des alliages subissant un traitement thermique. Certains alliages peuvent contenir jusqu'à 13 % Si pour des applications à haute température.

Pour les alliages de fonderie, le silicium joue un rôle important : il améliore la fluidité et la "moulabilité", ainsi que la résistance à l'usure et à la corrosion.

Les propriétés du silicium sont utilisées dans d'autres alliages non ferreux :

- les alliages cuivre-silicium (silicobronzes) sont utilisés pour leurs propriétés mécaniques, leur bonne soudabilité et leur résistance à la corrosion. Ils trouvent de nombreuses applications dans la construction navale : pièces de structure, boulonnerie;
- les alliages de nickel, notamment pour la fonderie, peuvent contenir de 1,5 à 6 % Si et sont utilisés dans les industries chimiques et alimentaires. Les alliages nickel-cuivre (0,5 à 4,5 % Si) sont utilisés dans l'appareillage électrique ainsi que l'équipement chimique. Les alliages nickel-silicium (10 % Si) sont très durs et résistent aux acides, notamment l'acide sulfurique chaud.

3.3.4 - LES SILICONES

Les silicones représentent un secteur de développement rapide de la consommation de silicium. Le silicium est utilisé pour produire des composés organo-siliciques d'une très grande variété de formes physiques et d'applications. Les silicones se présentent sous la forme d'huiles plus ou moins visqueuses, de graisses, de pâtes, d'émulsions, de résines, de gommes, d'élastomères d'emplois très divers. Ce sont des polymères thermodurcissables réagissant à chaud et à froid.

Les principales applications des silicones sont l'élaboration de produits lubrifiants, antiadhérents, hydrofugeants, antimoissants, adhésifs, etc.. Ils trouvent des applications parachimiques dans plus de deux cents secteurs différents. Les huiles siliconées servent surtout pour faire des agents de démoulage, des additifs antiadhérents et lubrifiants (fluorosilicones) et

antimoussants (industries chimiques et alimentaires). Les résines siliconées servent pour élaborer des additifs hydrofugeants et réaliser l'isolation de l'appareillage électrique. Les élastomères siliconés permettent d'élaborer des joints d'étanchéité et des élastomères vulcanisant à froid. Les propriétés de stabilité thermique, de neutralité chimique, d'insolubilité, de bonnes caractéristiques mécaniques (flexibilité et élasticité) des silicones sont mises à profit pour réaliser des adjuvants chimiques et des prothèses artificielles.

Notons enfin qu'un co-produit de distillation fractionnée des silicones est le silico-chloroforme, matière de base de l'élaboration de silicium polycristallin électronique.

3.3.5 - AUTRES APPLICATIONS DU SILICIUM

Les qualités de ferro-silicium à faible titre en silicium (environ 15 % Si), en raison de leur forte densité et leurs propriétés magnétiques sont utilisées pour constituer des liqueurs denses pour le traitement des minerais.

Dans les procédés silicothermiques, le ferro-silicium à 70 % est utilisé comme réducteur dans les fabrications du magnésium et du nickel.

Le silico-calcium ou CaSi est principalement utilisé en aciérie pour améliorer la désoxydation et contrôler la teneur en soufre par la formation de composés stables CaO et CaS. Le Ca-Si ou Ca-Si-Ba permet d'améliorer la fluidité de l'acier avant la coulée continue, d'augmenter sa résilience et de réduire son anisotropie directionnelle. Le Ca-Si est utilisé en fonderie avec le Ca-Si-Ba et le Ca-Si-Mn pour améliorer la fluidité et la propreté des fontes. On utilise parfois du Ca-Si pour fabriquer des explosifs.

Le carbure de silicium ou "carborundum" est essentiellement utilisé :

- comme additif de silicium en remplacement du ferro-silicium mais aussi comme ajout de carbone dans la fabrication de fontes, notamment au four électrique où il agit comme désoxydant et agent thermogène. Il est utilisé sous forme de briquettes dans le cubilot et, en dehors des propriétés désoxydantes et thermogènes, il améliore la germination des nodules des fontes G.S. (graphite sphéroïdal),
- pour la fabrication d'abrasifs, meules et revêtements abrasifs, notamment pour le polissage des métaux ferreux. On utilise aussi du carbure de silicium de moindre qualité (98 - 99 % SiC) pour le sciage des pierres de construction, notamment en Europe,

- d'autres usages incluent la réalisation de composants électriques et récemment de céramiques avancées à hautes caractéristiques résistant à l'abrasion, à la corrosion et aux hautes températures : réacteurs nucléaires, joints mécaniques, turbines, composants de pompes, valves, etc..

Le silicium métallurgique est utilisé par l'industrie chimique pour fabriquer des siliciures et autres composés intermétalliques.

Le nitrure de silicium (Si_3N_4), obtenu à partir de silicium métallurgique, permet de fabriquer des céramiques et réfractaires à haute résistance aux chocs thermiques et ayant de bonnes propriétés mécaniques. Les principales applications sont pour l'habillage de thermocouples et la réalisation de creusets. Le nitrure de silicium pourrait avoir des applications importantes pour la fabrication de céramiques avancées pour les aubes et vannes de turbines, les rotors de turbo-compresseurs et les composants de moteurs d'automobiles.

4 - SPECIFICATIONS ET CRITERES DE SELECTION

4.1 - SPECIFICATIONS

Les spécifications des sables industriels diffèrent sensiblement suivant leurs applications, voire suivant leurs utilisateurs, comme on peut le constater dans l'industrie du verre.

Il existe par contre, pour les applications "fonderie", et dans la plupart des pays, des spécifications précises, faisant référence à des essais normalisés.

4.1.1 - SPECIFICATIONS VERRERIE

Elles concernent essentiellement la granulométrie et la composition chimique des sables, cette dernière, variant suivant le type de verre.

- Granulométrie

Les classes granulaires utilisées sont, dans tous les cas, **peu étalées** et relativement comparables. La plupart des spécifications (cf. tableau 15) impliquent en effet :

. **d° minimal** $\approx$ 100 à 150 μm

. **D° maximal** $\approx$ 400 à 600 μm

La granulométrie des sables doit par ailleurs être continue et présenter une bonne régularité (coefficient de variation du passant à $D_{50} < 15 \%$).

- Chimisme

Les principales spécifications sont regroupées dans le tableau 16.

D'autre part, et selon la plupart des spécifications d'origine U.S., les **minéraux lourds réfractaires*** d'un diamètre $> 250 \mu\text{m}$ ne doivent pas dépasser la **teneur limite de 0,0003 %** de la masse.

Certaines spécifications imposent en outre des teneurs limites en TiO_2 (proscrit dans les verres boro-silicatés), ainsi qu'en **alcalins**, Na_2O et K_2O ($< 0,1 \%$).

Dans le cas des **verres optiques**, on ne tolère pas plus de 1 ppm de **cuivre**, de **cobalt** ou de **nickel**, et 3 ppm de **vanadium**.

*Sillimanite, Cyanite, Andalousite, Zircon, Spinelles, Corindon, Chromite, Kaolin.

TABLEAU 15

Sables industriels - Verrerie - Spécifications relatives à la granulométrie

Mesh (U.S. Std Series)	Passants en % aux tamis de														
	270	200	140	120	100	70	50	40	35	30	25	20	14	12	6
Série A.F.A. (Fonderie) →	x	x	x		x	x	x	x		x		x		x	x
Ouverture →	53 µm	75 µm	106 µm	125 µm	150 µm	212 µm	300 µm	425 µm	500 µm	0,6 mm	0,71 mm	0,85 mm	1,4 mm	1,7 mm	3,35 mm
Norme B.S. (G.B.)					< 10			> 90		> 98		100			
Pilkington BOS (G.B.)				< 5					> 95		> 99		100		
S.I.V. (Italie)		< 0,2			< 1			> 99		> 99,9		100			
A.K.W (R.F.A.)			0,0							100					
Normes U.S.					< 15					> 99		100			
Pennsylvania Glass (U.S.A.)			0,0					> 95				100			
B.S.N. (P.G.) (France)					< 10			> 90		≠ 100					
Granularité moyenne ⇒			(100 à 150 µm) d ^a minimal				⇒				(400 à 600 µm) D ^a maximal				

TABLEAU 16

Sables industriels - Verrerie - Spécifications relatives à la composition chimique

Teneurs- limites et tolé- rances variation	Type 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)
Silice - SiO_2 (min.)		98,8 $\pm 0,2$	97,0 $\pm 0,3$	99,6 $\pm 0,1$	99,6 $\pm 0,1$	99,6 $\pm 0,1$	99,0 $\pm 0,2$	99,7	(maxi) 94,5 $\pm 0,5$
Alumine - Al_2O_3 (maxi)		0,6 + 0,1	0,6 + 0,1	0,2 $\pm 0,1$	0,2 $\pm 0,1$	0,2 $\pm 0,1$	0,5 $\pm 0,15$	0,2	3,0 $\pm 0,5$
Fer total - Fe_2O_3 (maxi)		0,03 $\pm 0,003$	0,25 $\pm 0,03$	0,010	0,010	0,010	0,010 $\pm 0,005$	0,010	0,3 $\pm 0,05$
Chrome total - Cr_2O_3 (maxi)		0,0005	-	0,0002	0,0002	0,0002	-	0,00015	-
Alcalins - $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (maxi)		/	/	/	/	/	/	/	2,5 $\pm 0,3$
Perte au feu - P.F. (maxi)		0,20 $\pm 0,02$	0,5 $\pm 0,1$	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,5

4.1.2 - SPECIFICATIONS FONDERIE

Les **sables de moulage naturels** (sables argileux ou silico-argileux), dont l'emploi décline rapidement, doivent contenir un pourcentage d'argile important, variable suivant les applications :

TABLEAU 17
Sables industriels - Fonderie - Sables de moulage "naturels"
Pourcentage de liant argileux préconisé, suivant applications

Métal coulé	Genre de pièces	Argile % (S. "naturels")
Acier	Grosses et moyennes > 15 mm ép.	> 8
	Petites < 15 mm ép.	< 15
Fonte grise	Grosses, épaisseur supérieure à 30 mm	15 - 20
	Moyennes, épaisseur 15 à 30 mm	12 - 18
	Petites, épaisseur 0 à 15 mm	12 - 18
Alliages cuivreux	Grosses, épaisseur supérieure à 30 mm	15 - 20
	Moyennes, épaisseur 15 à 30 mm	12 - 18
	Petites, épaisseur 0 à 15 mm	12 - 18
Alliages légers	Grosses > 30 mm ép.	15 - 20
	Moyennes et petites < 30 mm ép.	10 - 20

Ils ne font pas, à proprement parler en tant que tels, l'objet de spécifications, mais leurs caractéristiques granulométriques (argile exceptée), et en particulier leurs indices de finesse, sont identiques, suivant les applications, à celles des autres sables.

On distingue parmi ces autres sables :

- les **"sables siliceux"**, qui contiennent en principe de l'ordre de 95 % de SiO_2 (+ impuretés diverses de l'ordre de 1 % chacune, voire 2 % pour Al_2O_3), ne peuvent être utilisés que pour la préparation des mélanges à base de liants minéraux (bentonite, ciment, Na_2SiO_3 ...).
- les **"sables extra-siliceux"**, qui contiennent en principe de l'ordre de 98 % de SiO_2 (+ impuretés diverses environ 0,2 % chacune, voire 0,8 % pour Al_2O_3) et dont l'emploi est devenu important, sont indispensables pour la préparation des mélanges à base de liants organiques et divers.

TABLEAU 18

Teneur en éléments de dimensions inférieures à 20 µm ("argile")	Liants pouvant être utilisés
< 0,3 %	Tous liants, notamment les résines synthétiques, les agglomérants autositcatifs
de 0,3 à 1 %	Silicate de soude, certains agglomérants autositcatifs, huiles siccatives, liants à base de céréales
de 1 à 2 %	Huiles siccatives, liants à base de céréales

Ces sables font l'objet de spécifications détaillées, à l'instar des spécifications suivantes (CTIF - France - 1979 - sp B 67 - C 010) qui concernent essentiellement leurs caractéristiques granulométriques et physico-chimiques :

- Granulométrie

a) Répartition granulométrique (granularité)

Elle doit tendre vers l'allure d'une courbe de Gauss répondant aux spécifications suivantes :

- au moins 97 % de la masse des grains est retenue sur au plus cinq tamis successifs de la série AFA ($d_{\min}$ 53 µm - $D_{\max}$ 3,35 mm)*
- la teneur en éléments de dimensions inférieures à 20 µm ne doit pas excéder :

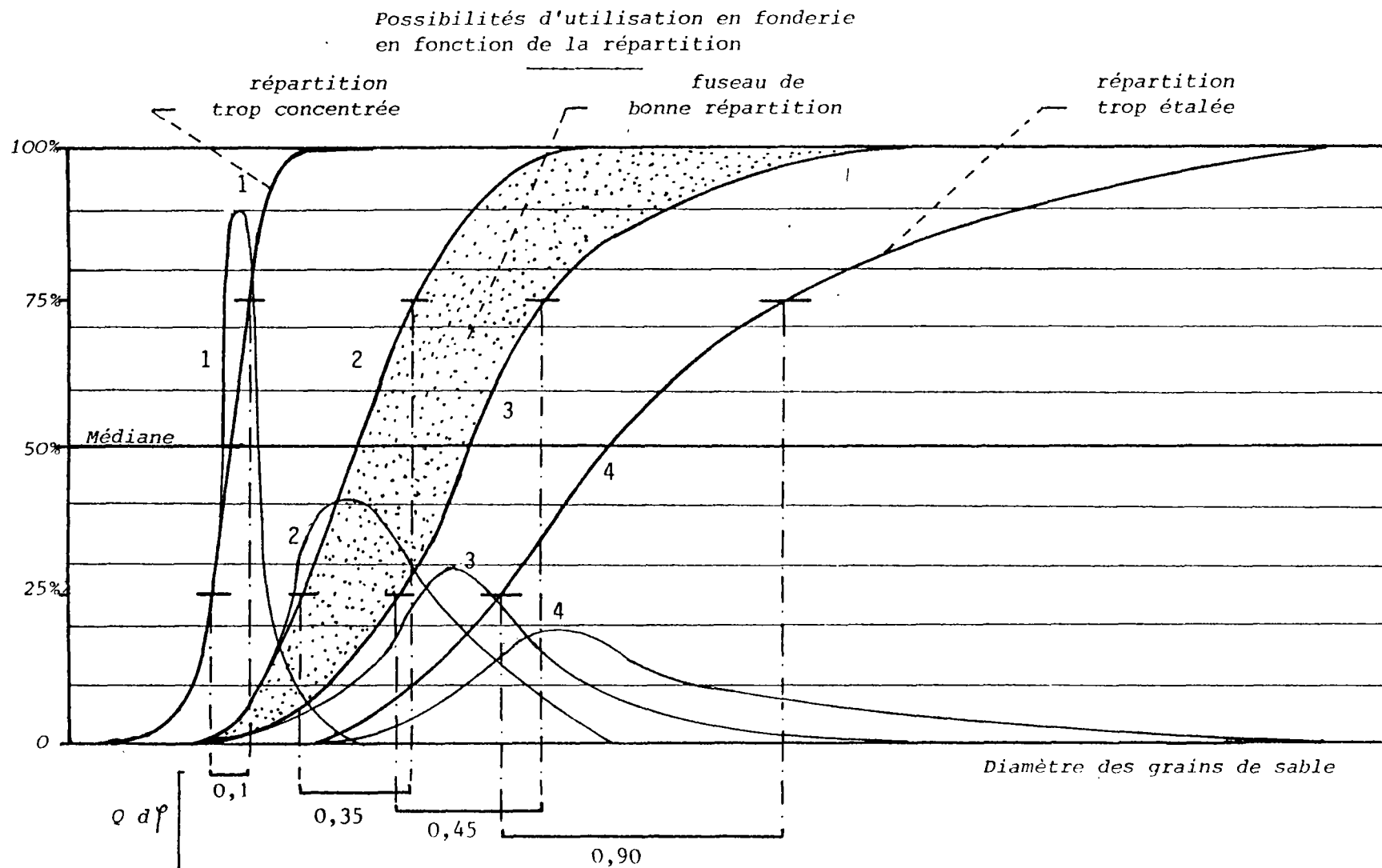
. pour un sable "siliceux"	: 4 % maximum
. pour un sable "extra-siliceux"	: 0,3 à 0,8 %

(suivant accord avec fondeurs).

* Série de tamis AFA (Mesh) = 270 - 200 - 140 - 100 - 70 - 50 - 40 - 30 - 20 - 12 - 6 (11 tamis au total).

FIGURE 4

Exemples de répartition de sables bruts
(Courbes de Gauss et courbes cumulatives correspondantes)



b) Indice de finesse

L'indice de finesse est un nombre conventionnel, qui caractérise la **granularité** d'un sable de fonderie. Il se calcule à l'issue de l'analyse granulométrique, à partir des valeurs de refus sur les tamis. Le nombre obtenu pour l'indice de finesse représente le numéro du tamis fictif (Mesh ou série AFA ou ASTM) qui laisse passer un "sable moyen" équivalent au sable analysé.

Les **indices de finesse** suivants sont généralement **préconisés**, selon les emplois.

TABLEAU 19
Sables industriels - Fonderie
Indices de finesse AFA préconisés, suivants applications

Métal coulé	Genre de pièces	Indice de finesse AFA	
		Moulage	Noyaux
Acier	Grosses et moyennes > 15 mm ép.	Inf. à 50	40 à 50
	Petites < 15 mm ép.	50 à 70	
Fonte grise	Grosses, épaisseur supérieure à 30 mm	40 à 70	50 à 70
	Moyennes épaisseur 15 à 30 mm	70 à 100	
	Petites épaisseur 0 à 15 mm	100 à 140	
Alliages cuivreux	Grosses épaisseur supérieure à 30 mm	90 à 110	60 à 80
	Moyennes épaisseur 15 à 30 mm	100 à 120	
	Petites épaisseur 0 à 15 mm	120 à 140	
Alliages légers	Grosses > 30 mm ép.	100 à 120	(100 à 140)
	Moyennes et petites < 30 mm ép.	120 à 140	

A cet égard, les **spécifications** portent sur la **tolérance de variation à la livraison** :

. Indice de finesse (spécifié à la commande) ± 5 .

- Teneur en carbonates

Exprimées en CO_2 dégagé, les teneurs limites spécifiées sont les suivantes :

- . sables "siliceux" : 0,4 % maxi
- . sables "extra-siliceux" : 0,1 % maxi.

- Consommation d'acide

Cette spécification, facultative, s'applique généralement dans le cas des sables utilisés avec des liants nécessitant des catalyseurs de prise acides (résines cf. annexe III). La **valeur-limite** est fixée à : 4 ml/50 g - maxi.

4.1.3 - SPECIFICATIONS POUR LA METALLURGIE

Pour les industries métallurgiques, on utilise généralement des grès ou du quartz concassé en morceaux exempt de fines, des galets de rivière ou de mer ou certains sables de silice à haute pureté. Les caractéristiques principales du produit à obtenir sont les suivantes :

. pour le silicium métal :

$\text{SiO}_2 > 99,5 \%$

$\text{Al}_2\text{O}_3 < 0,15 \%$

$\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,1 \%$

. granulométrie comprise entre 20 et 150 mm

+ contrôle rigoureux de CaO et TiO_2

. pour le carbure de silicium :

$\text{SiO}_2 > 99,5 \%$

$\text{Al}_2\text{O}_3 < 0,25 \%$

$\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,1 \%$

granulométrie comprise entre 0,1 et 0,7 mm + contrôle rigoureux de CaO et MgO .

. pour le ferro-silicium, les spécifications sont un peu moins contraignantes.

$\text{SiO}_2 > 99 \%$

$\text{Al}_2\text{O}_3 < 0,6 \%$

$\text{F}_2\text{O}_3 < 0,6 \%$

+ contrôle rigoureux de As, P et S.

TABLEAU 20
Caractéristiques chimiques de la silice industrielle
pour l'électrometallurgie

CATEGORIES DE SILICE ET UTILISATION	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	P (ppm)	Fondants (%)
Catégorie I										(1)
Si-métal ferro-silicium	99	0,15	0,10	0,02	0,30	0,05	0,01	0,01		0,54
Catégorie II (bas-titane) tôles de transformation	99	0,20	-	0,005	0,30	0,15	0,01	0,01	100	(2) 0,525
Catégorie III (bas-alumine) ferro-silicium Si pour alliage	97	0,50	0,15	0,02	0,30	0,05	0,01	0,01		(1) 0,89
Catégorie III bis (bas-phosphore) silico-chrome	97	1,50	0,20	0,02	0,30	0,05	0,01	0,01	100 ou 50	(1) 1,89

(1) Al₂O₃ + TiO₂ + MgO + CaO + Na₂O + K₂O

(2) Al₂O₃ + TiO₂ + MgO + Na₂O + K₂O

4.2 - CRITERES DE SELECTION

Les principaux critères techniques de sélection à prendre en compte dans le cadre de la mise en valeur de ressources en sables industriels concernent :

- les caractéristiques des "matériaux bruts", d'une part,
- les conditions de gisement, d'autre part.

On ne pourra cependant les faire intervenir à bon escient que dans la mesure où l'on aura une **connaissance approfondie du marché, des techniques d'exploitation et d'élaboration, et de leurs coûts**, ainsi que **des frets**. La sélection effective n'est donc réalisable qu'au terme d'une approche globale intégrant, en outre, les **contraintes d'environnement**.

4.2.1 - CRITERES LIES AUX CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX BRUTS

Ils résultent principalement de la comparaison des caractéristiques des matériaux bruts, ou de celles que l'on peut obtenir à partir de ceux-ci, **dans des conditions économiques**, après traitement adéquat, avec les spécifications imposées, suivant les applications.

- a) la **composition chimique** est le critère de sélection prédominant pour les applications "**Verrerie**".

On notera cependant, à cet égard, que deux sables bruts de composition chimique identique et "**hors normes**", peuvent :

- l'un donner après traitement (lavage, cyclonage, traitement magnétique haute intensité) d'excellents produits marchands (= cas où Al_2O_3 et Fe_2O_3 sont liés à une pollution argileuse - cas où Fe_2O_3 est lié à des minéraux lourds magnétiques...);
- l'autre se révéler inapte à être valorisé dans des conditions économiques (= cas où Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O ou Na_2O sont liés à des feldspaths ou minéraux similaires...).

- b) la **granulométrie**, ainsi que la **granularité**, sont les critères de sélection prédominants pour les applications en **fonderie** et **verrerie**, les systèmes actuels de criblage et de classification permettent cependant d'assouplir largement cette contrainte.

Toute **procédure de pré-sélection** d'un matériau brut (= meuble) en vue d'applications du type "**sables industriels**" implique normalement de procéder à une **identification sérieuse**, en deux temps, de chaque échantillon, à l'**état brut** et **après lavage** énergétique (= attrition - élimination fractions < 80 ou 100 μ) et comportant :

- analyse granulométrique et paramètres annexes,
- analyse chimique multi-éléments (SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 - CaO - $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$),
- étude pétrographique à la loupe binoculaire*.

Cette approche étant destinée à évaluer l'intérêt *a priori* et les limites potentielles du traitement des matériaux.

4.2.2 - CRITERES LIES AUX CONDITIONS DE GISEMENT

Les deux principaux critères de sélection sont représentés par :

- le **taux de recouvrement** : les valeurs admises sont généralement faibles et très comparables à celles que l'on observe dans le domaine des granulats ou des matières premières pour chaux et ciment. Elles correspondent actuellement aux **taux limites** suivants : (m/m) :
 - . découverte meuble : 1/2,5 à 1/3
 - . découverte massive : 1/4 à 1/5
- la **réserve exploitable** : dont le potentiel doit être ≥ 20 -30 ans ;
- les autres critères de sélection sont liés à la **recherche d'une homogénéité maximale des caractéristiques granulométriques et chimiques** au niveau du gisement (latéralement et verticalement).

*Etude pétrographique :

- **quartz** : évaluation du taux de grains "pollués", "**ronds mats**" ou "**criqués**" et de grains **microfissurés**, cataclasés, **non** ou peu **valorisables** (Fe_2O_3 difficilement, voire non éliminable...dans les verres et éclatant à la chaleur en fonderie).
- **minéraux lourds** : identification et comptage des minéraux réfractaires, oxydes de fer divers...

A cet égard, le développement, accusé, de certains phénomènes peut conduire à rejeter un gisement potentiel, par exemple :

- variations de faciès latérales et verticales
- blocs ($> 1 \text{ m}^3$) épars dans le matériau (grès,...)
- niveaux indurés continus ou discontinus, plus ou moins épais (grès,...)
- bancs d'argile intercalaire, de lignite... continus ou discontinus, plus ou moins épais.

Par ailleurs, et sauf cas exceptionnel, les conditions hydrogéologiques du site ne sont pas à prendre en compte, directement, comme critère de sélection principal.

5 - MODALITES DE PREPARATION ET DE TRAITEMENT

L'augmentation des exigences des utilisateurs (pureté, régularité) conjuguée à la raréfaction, voire dans certains cas à l'absence de ressources utilisables à l'état brut, ont contribué à développer très rapidement la part des produits traités sur le marché, y compris pour les applications fonderie. Selon les caractéristiques du sable dans le gisement et la qualité de production, un certain nombre d'outils de traitement peuvent être utilisés :

TABLEAU 21
MATERIEL DE TRAITEMENT DES SABLES SILICEUX

Opération	Matériel utilisé	But
Criblage	- Crible dynamique (superposition de tamis) - trommel ou crible statique :	· élimination des blocs de sable plus ou moins cimentés, argile et impuretés > 10 mm - Evacuer des grains > 500 µm
Attrition	- cellules d'attrition	Débarrasser les grains de quartz de leurs impuretés (enveloppes argileuses), par friction.
Lavage	- classificateur à vis - voie hydraulique - hydrocyclone	Supprimer des particules fines < 80 µm par décantation différentielle et entraînement dynamique par surverse. (Sur certains sables, cet outil peut éliminer les impuretés dans les proportions suivantes : 25 % Al_2O_3, 35 % Fe_2O_3, 50 % TiO_2, 50 % matières organiques) Supprimer des particules fines < 60 µm
Séchage ou essorage	- four - procédé propre à certaines entreprises	Séchage complet Stabiliser l'hygrométrie à 2,50 %
Refroidissement	- cyclone à air	Ramener le sable à une température proche de 25° C.
Broyage	- broyeur à boulets - broyeur à galets	Obtenir des grains < 80 µm
Malaxage	- malaxeur	Homogénéisation
Flottation	- cellule de flottation en milieu neutre aux acides gras	Diminuer la teneur en oxyde de fer et alumine
Séparation magnétique	- séparateur magnétique haute intensité	Eliminer certains minéraux lourds contenant du fer (mica noir, amphibole, pyroxène, zircon, rutile) et des grains de quartz partiellement pollués par des oxydes de fer

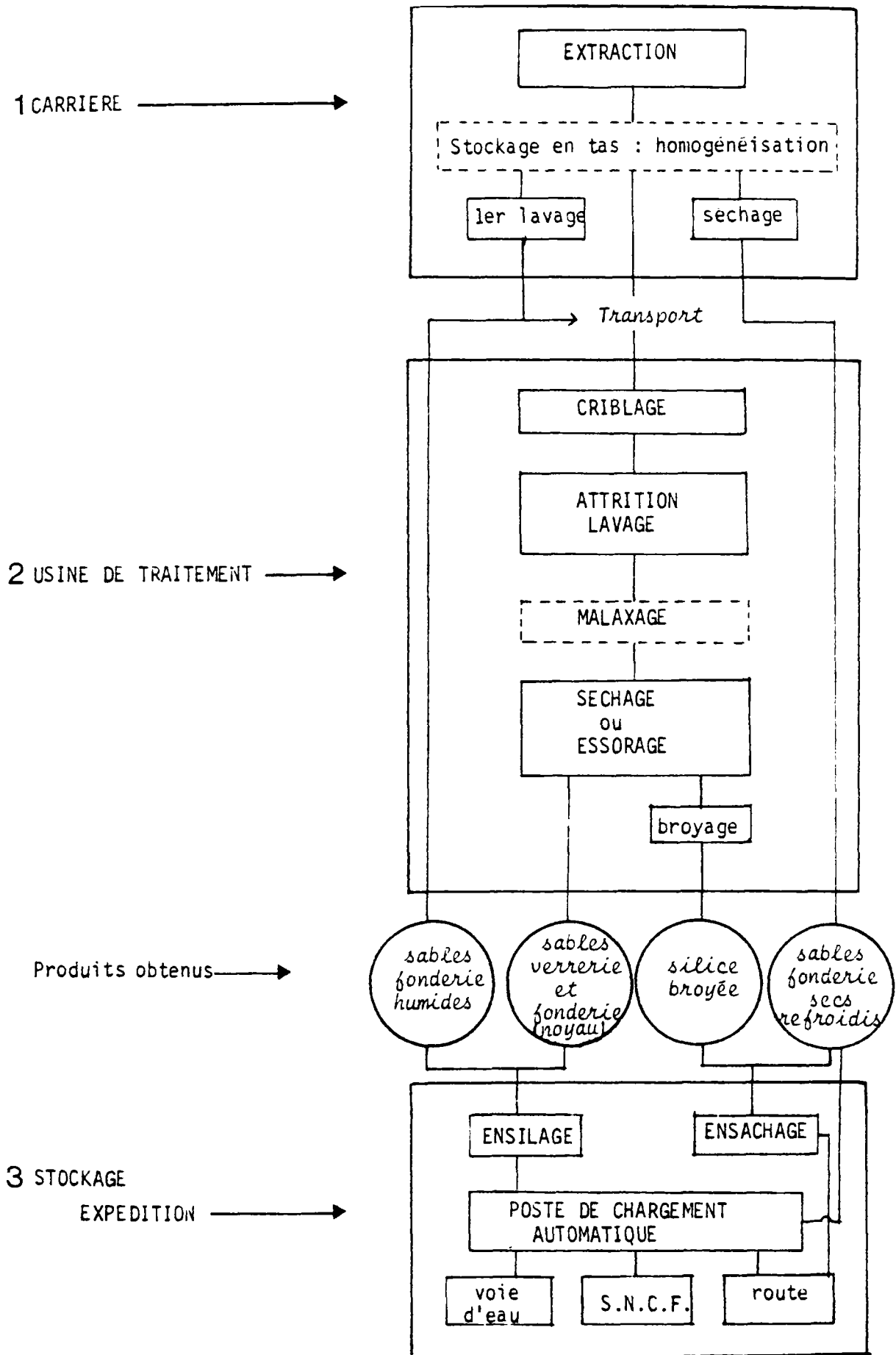
Après tous ces traitements, les pertes sont en général évaluées seulement à 2 %.

Dans les **cas courants**, notamment pour les sables de fonderie, le traitement (voie humide) est limité à un **simple lavage*** des matériaux, suivi d'un essorage et d'un séchage.

* Associé, dans certains cas, à une séparation de matériaux en deux ou plusieurs fractions (criblage et/ou classification).

FIGURE 5

Schéma type de fonctionnement d'une unité de production de sables industriels
(Source SNPSI))



6 - PRODUITS DE SUBSTITUTION

La silice en grain ou en roche constitue un matériau relativement fréquent dans la nature et en général bon marché à exploiter. Il n'existe donc pas actuellement de raison technique ou économique pour remplacer la silice naturelle.

6.1 - SILICE POUR FONDERIE

- Les substitutions possibles pour les applications fonderie sont spécifiques et très limitées :

- . moulage à la coquille (moule métallique permanent) : outillage coûteux excluant les productions en petite série ;
- . moulage à la pression (moule métallique) = idem ;
- . sables de chromite, de zircon et d'olivine utilisés pour le "moulage au sable" d'aciers ou d'alliages à très haut point de fusion et pour lesquels les sables siliceux ne conviennent pas, ou conviennent mal (cf. § 3.2). Ces sables sont donc complémentaires aux sables siliceux et non interchangeables. Ces produits valent de 20 à 50 fois le prix à la tonne des sables siliceux.

6.2 - SILICE POUR VERRERIE

Les seuls produits susceptibles de remplacer partiellement les sables naturels pour verrerie sont les produits verriers de récupération.

Le verre est recyclé, soit directement par les usines verrières qui réutilisent une partie de leurs déchets (rebuts de production...), soit indirectement par une collecte des emballages perdus auprès des consommateurs.

Les verres creux (bouteilles, flacons, bocaux) peuvent être recyclés pour le même type de production ; le groisil, le calcin, ou le verre pilé est ajouté au mélange de matières premières introduit dans les fours des verreries.

L'emploi de cet adjuvant permet par ailleurs d'économiser une part de l'énergie nécessaire à la fabrication du verre, le groisil jouant en outre un rôle de fondant..

L'économie énergétique est comprise entre 0,8 TEP et 1,1 TEP par tonne de verre produite. Elle varie avec le type d'emballage récupéré. La production d'une tonne de verre à partir du calcin recyclé nécessite environ 855 thermies dont 57 thermies de mobilisation (ramassage, tri, etc...).

TABLEAU 22
Consommation énergétique pour la production d'emballages en verre
(Source : Agence Nationale pour la Récupération et
élimination des Déchets)

Emballage	Quantité de produit commercialisé pour 1 bouteille fabriquée	Par litre de produit vendu	
		Energie consommée (équivalent pétrole)	Poids des déchets produits
1 litre consigné	36 litres	30 g	18 g
1 bouteille en verre perdu	0,75 litre	220 g	590 g
1 canette de 25 cl de bière	0,25 litre	243 g	600 g
pour mémoire 1 maxi-bouteille en PVC	1,5 litre	72 g	31 g

L'économie d'énergie entraînée par l'usage du calcin provient de deux causes :

- le verre fond à une température moins élevée que la composition de matières premières naturelles,
- l'énergie nécessaire à la production des matières premières (le carbonate de soude en particulier) est économisée au prorata de la quantité utilisée.

L'économie serait de 33 % pour un verre fondu uniquement à partir du calcin. La qualité d'une bouteille fabriquée à partir du calcin est équivalente à celle produite par les matières premières naturelles toutefois, la récupération du verre ménager pose un certain nombre de contraintes techniques à prendre en compte pour la fabrication de verre recyclé :

- la couleur des verres : un tri par couleur facilite le recyclage car un mélange de verres de différentes couleurs ne peut être utilisé que pour la fabrication de verre de couleur verte ;
- la présence de verres de natures différentes (verre à vitre) n'est pas toujours souhaitable ;

- les éléments étrangers au verre qui ne peuvent être tolérés que dans de très faibles proportions : si les étiquettes en papier se volatilisent lors de la fusion, les capsules métalliques sont tout-à-fait indésirables.

En France, en 1986, les usines verrières ont absorbé 621 000 t de calcin dont 477 000 t de calcin ménager pour produire 1,7 million de tonnes de bouteilles.

L'industrie du recyclage a représenté 180 millions de chiffre d'affaires en 1984. Employant 300 personnes, elle a permis une économie de 180 000 TEP soit 300 millions de francs durant cette période.

6.3 - SILICE POUR ELECTRONIQUE

Le seul domaine technique ou scientifique où la silice naturelle ne constitue pas l'essentiel de la matière première de **produits ultra-siliceux** est l'électronique qui utilise majoritairement des quartz piézo-électriques de **synthèse**.

La production mondiale de quartz artificiel est estimée à 2 000 t/an (à l'exclusion des pays de l'Est).

La production et l'utilisation de ces minéraux sont concentrées dans 3 zones géographiques :

- les USA,
- le Sud Est asiatique (Japon, Corée, Singapour, Taïwan, Hong Kong,
- l'Europe (G-B, Belgique, RFA, France).

Le quartz artificiel est produit en autoclave, suivant un processus hydrothermal.

BIBLIOGRAPHIE

ANRED, - La récupération des bouteilles en verre et PVC.

Chambre syndicale des verreries mécaniques de France, 1984 - Le verre, emballage et recyclage.

CTIF - Centre technique des Industries de la Fonderie -

- "Les sables de carrières utilisables en fonderie" : Publication réf. Ge 179 - mars 1975.
- "Spécification technique relative aux sables siliceux" : Publication réf. Ge 314 - janvier 1979.
- "Recueil des méthodes de contrôle courant des sables de fonderie" : Publication réf. Ge 60 - 1971.

Economie géographique, 1987 - L'industrie du verre n°241, janvier 1987.

Fédération des chambres syndicales de l'Industrie du verre - Rapports annuels d'activité.

GRIFFITHS J., 1987 - Silica, is the choice crystal clear ? Industrial Minerals, avril 1987.

HIGHLEY D.E et al., 1975 - Silica - Mineral Ressources Consultative Committee.

Industrial Minerals, 1984 - Silica Sand - Competition in a tight market. I.M. février 1984.

Institut du Verre, 1981 - La fabrication du verre - Prover édit.

LEGER C., 1981 - L'industrie de verre et son approvisionnement en silice. Annales des mines, mars-avril, 1981.

MALATRAIT A.M., 1981 - Inventaire des ressources en sables industriels de la région Rhône-Alpes. Rapport du BRGM 81 SGN 200 RHA.

Ministère de l'économie et des finances 1985 - Statistiques du commerce extérieur de la France.

Ministère de l'industrie des P et T et du tourisme 1985 - Annuaire de statistiques industrielles.

Observatoire des matières premières, 1985 - Approvisionnement français et consommation de silicium. Rapport n° 40.

PRAX A., 1980 - Memento substances utiles (Matériaux de carrière) - Sables siliceux industriels (applications verrerie et fonderie). Rapport du BRGM 80 SGN 909 MTX.

ROZES B., 1982 - Détermination de coefficients techniques et ratios de consommation dans le domaine des matériaux de carrière. Rapport du BRGM 82 SGN 2 GMX.

SMITH M., 1984 - Quartz crystal - currently sparkling. Industrial Minerals. Août 1984.

UNICEM - Statistiques annuelles, carrières et matériaux.

Syndicat des exploitants de sables industriels de France, 1975 - Les sables industriels, matières de base irremplaçables pour les industries du verre.

Syndicat national des producteurs de silice pour l'industrie, 1986 - La silice : une richesse méconnue du sous-sol national. Industrie minérale Mines et carrières, février 1986.

Communications orales de MM. GOGER (Syndicat National des producteurs de silice pour l'industrie et ROCHIER (Centre technique des industries de la Fonderie).