



Ministère de l'Industrie,
de la Poste et des
Télécommunications

Mémento roches et minéraux industriels

Diatomite

Ph. Rocher

décembre 1995

R 38758



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

95 - G - 185

BRGM
SERVICE MINIER NATIONAL
Département Procédés et Analyse

BP 6009 - 45060 ORLEANS Cedex 02 - France - Tél.: (33) 38 64 34 34

Mots clés : Diatomite, Définitions, Géologie et gisements, Propriétés physiques et chimiques, Secteurs d'utilisation et spécifications industrielles, Economie et marché, Produits de substitution.

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

Rocher Ph. (1995) - Mémento roches et minéraux industriels - Diatomite. Rap. BRGM R 38758, 62 p., 6 fig., 12 tabl.

© BRGM, 1996 : ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

RESUME

La diatomite est une roche sédimentaire siliceuse biogénique, constituée entièrement ou essentiellement de squelettes, ou frustules, de diatomées fossilisés. Les diatomées sont des plantes unicellulaires aquatiques, apparentées aux algues brunes, qui se sont développées, principalement depuis le Crétacé terminal, dans des eaux douces, saumâtres et salées.

On reconnaît deux grands types de gisements : les gisements marins, formés notamment dans les zones de "upwelling", et les gisements continentaux, essentiellement lacustres et situés dans des contextes volcaniques. La plupart des gisements d'intérêt économique sont d'âge miocène et d'origine lacustre.

Les matériaux diatomitiques bruts font l'objet de différentes phases de traitement en usine, comprenant concassage, séchage et broyage, sélection et calcination (avec ou sans agent fondant). Les principales propriétés des produits diatomitiques (inertie chimique ; faible densité apparente ; porosité, surface spécifique et capacité d'absorption des liquides élevées, pouzzolanité, ...) sont liées à leurs caractéristiques fondamentales : composition chimique et structure.

Ils sont principalement utilisés comme adjuvants pour la filtration de liquides divers, notamment alimentaires (bière, vin, glucose, ...), également en tant que charges, absorbants et produits isolants et réfractaires.

La production mondiale, qui est de l'ordre de 1,8 Mt/an, est nettement dominée par les Etats-Unis, suivis par la France, le Japon, les pays de l'ex-URSS, la Chine et le Danemark.

La production française est assurée par deux sociétés, CECA et CELITE FRANCE, dont les gisements et les usines sont situés dans les départements de l'Ardèche et du Cantal. En 1994, celle-ci s'élevait à près de 230 000 t de matériaux bruts, soit environ 86 500 t de produits finis, et près de 70 % des ventes étaient réalisées à l'exportation.

Cette même année, les exportations françaises étaient de 56 000 t et les importations de 27 200 t, ce qui situait la consommation apparente de notre pays aux alentours de 52 700 t.

L'avenir de l'utilisation de la diatomite paraît assuré à court terme dans le secteur de la filtration, mais pourrait être menacé à plus longue échéance par des techniques ne faisant pas appel aux adjuvants (filtration tangentielle et membranaire, ultrafiltration).

Cette étude a été réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM, financées par le ministère de l'Industrie, de la Poste et des Télécommunications.

TABLE DES MATIERES

1. DEFINITIONS	9
2. GEOLOGIE ET GISEMENTS.....	11
2.1. Conditions de genèse et types de gisements	11
2.2. Méthodes de prospection des gisements et de caractérisation des matériaux.....	14
2.2.1. Reconnaissance préliminaire : sélection de zones cibles	14
2.2.2. Etude de gisement.....	16
2.3. Critères d'exploitabilité des gisements et de sélection des matériaux	17
2.4. Gisements français	18
2.4.1. Généralités	18
2.4.2. Le gisement de la Montagne d'Andance (Ardèche).....	19
2.4.3. Le gisement de Virargues/Foufouilloux (Cantal)	21
2.5. Modes d'exploitation des gisements et de traitement des matériaux	22
3. PROPRIETES PHYSIQUES ET CHIMIQUES.....	27
4. SECTEURS D'UTILISATION ET SPECIFICATIONS INDUSTRIELLES	31
4.1. Généralités.....	31
4.2. Filtration	33
4.3. Charges.....	37
4.4. Absorbants.....	41
4.5. Produits isolants et réfractaires	41
4.6. Autres secteurs d'utilisation	42
5. ECONOMIE ET MARCHE	43
5.1. Généralités.....	43
5.2. Production mondiale	45

5.3. Production française	52
5.4. Exportations - Importations - Consommation française apparente.....	52
5.5. Prix	54
6. PRODUITS DE SUBSTITUTION.....	57
7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	61

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 - Coupe géologique interprétative de la Montagne d'Andance (*in* Mein *et al.*, 1983).
- Fig. 2 - Schéma type de traitement des matériaux diatomitiques (*in* Industrial Minerals, 1987).
- Fig. 3 - Diatomite d'origine espagnole composée de frustules de diatomées de type *Stephanodiscus* (microscope électronique à balayage, cliché BRGM).
- Fig. 4 - Détail d'un frustule de diatomée dans une diatomite du Massif central français (microscope électronique à balayage, cliché BRGM).
- Fig. 5 - Evolution de la production mondiale de diatomite entre 1960 et 1993 (d'après European Minerals Yearbook, 1995).
- Fig. 6 - Principaux pays producteurs de diatomite.

LISTE DES TABLEAUX

- Tabl. 1 - Caractéristiques générales des adjuvants de filtration diatomitiques.
- Tabl. 2 - Composition chimique de quelques diatomites exploitées dans le monde.
- Tabl. 3 - Propriétés physiques et chimiques de quelques produits diatomitiques utilisés en France.
- Tabl. 4 - Répartition de la production américaine et de la consommation américaine et mondiale de diatomite par secteur d'utilisation.
- Tabl. 5 - Principales productions nationales de diatomite.
- Tabl. 6 - Principaux gisements de diatomite exploités dans le monde.
- Tabl. 7 - Exportations et importations françaises de diatomite naturelle et calcinée en 1994.
- Tabl. 8 - Prix des produits diatomitiques aux USA en 1993 (d'après Harben, 1995).
- Tabl. 9 - Prix des produits diatomitiques en provenance ou à destination de l'Union Européenne en 1993 (d'après European Minerals Yearbook, 1995).
- Tabl. 10 - Prix des agents filtrants américains importés en Grande-Bretagne en 1995.
- Tabl. 11 - Prix de quelques produits diatomitiques élaborés et vendus en France en 1995.
- Tabl. 12 - Caractéristiques comparées des principaux adjuvants de filtration (d'après Harben, 1995).

1. DEFINITIONS

La diatomite est une roche sédimentaire siliceuse biogénique, de couleur claire, légère et poreuse, meuble ou consolidée, constituée entièrement ou essentiellement de squelettes de diatomées fossilisés.

Les termes "terre à diatomées" et "kieselguhr" sont synonymes de diatomite. "Diatomite argileuse" et "argile à diatomées" désignent des roches moins riches en diatomées. "Moler" (ou "terre de moler") est un nom accepté internationalement pour qualifier une diatomite argileuse d'origine danoise, pouvant contenir jusqu'à 30 % d'argiles smectitiques.

Les termes "farine fossile", "silice fossile", "terre d'infusoires", "poudre à polir", "tripolite", "poudre de tripoli", "farine de montagne", "ceyssatite" (de Ceyssat, Puy-de-Dôme) et "randannite" (de Randanne, Puy-de-Dôme), anciennement employés pour désigner des roches diatomitiques, sont à présent obsolètes.

Le terme "diatomite" a parfois été improprement utilisé pour qualifier toute formation sédimentaire siliceuse. Or, il convient de distinguer la diatomite, d'origine végétale, des roches suivantes :

- spongolite, d'origine animale, composée de spicules d'éponges ;
- radiolarite, d'origine animale, constituée de tests de radiolaires ;
- tripoli, roche siliceuse résiduelle composée de quartz très finement cristallisé, résultant du lessivage de calcaires siliceux ou de cherts calcaires.

La diatomite est constituée majoritairement de silice amorphe hydratée, de type opaque, et contient par ailleurs de la matière organique, des cristaux et des éléments clastiques en proportions variables.

Les diatomées (du grec *dia*, à travers, et *tomos*, section) sont des plantes unicellulaires aquatiques, marines ou lacustres, souvent coloniales, planctoniques (formes flottantes) ou benthiques (formes fixées sur les substrats immergés), apparentées aux algues brunes (Bacillariophycées). A ce jour, plus de 12 000 espèces différentes de diatomées ont été identifiées et leurs associations reflètent fidèlement les caractéristiques physico-chimiques du biotope (profondeur, température, transparence des eaux, salinité, pH,...).

Elles sont connues depuis de Jurassique (60 Ma) et existent encore, bien qu'en nombre très réduit, étant notamment utilisées pour déterminer la qualité des eaux.

Une diatomée vivante et adulte, se compose :

- d'une membrane externe, nommée coleoderme (ou thalle) ;
- d'une carapace siliceuse, ou frustule, constituée de deux valves emboîtées l'une dans l'autre ;
- d'une cellule membraneuse occupant l'intérieur de la carapace.

Les diatomées sont subdivisées en deux groupes morphologiques principaux : les formes penniques, à symétrie axiale, et les formes centriques, à symétrie radiale.

Après leur mort, seuls subsistent les squelettes siliceux qui, par accumulation, donnent naissance à la diatomite. Ces frustules sont finement ornés (pores et excroissances), d'où une structure complexe, et leur taille varie de 0,75 à 1 000 μm (10 à 150 μm dans la majorité des cas).

Le présent document traite de la diatomite s.l., c'est-à-dire des matériaux composés majoritairement de frustules de diatomées.

2. GEOLOGIE ET GISEMENTS

2.1. CONDITIONS DE GENESE ET TYPES DE GISEMENTS

Bien que les diatomées ne soient pas spécifiques d'une période géologique donnée, elles sont devenues abondantes au Crétacé terminal et leur développement a été le plus important au Tertiaire et au Quaternaire. La plupart des gisements d'intérêt économique sont d'âge tertiaire, notamment miocène, et d'origine lacustre.

Les conditions environnementales favorables à la prolifération et à la croissance de diatomées, plus ou moins dépendantes les unes des autres, sont globalement les suivantes (Kadey, 1975 ; Jeambrun, 1977 ; Breese, 1994) :

- vaste bassin peu profond (profondeur ≤ 35 m) et degré d'éclairement des eaux suffisant pour permettre la photosynthèse ;
- milieu de sédimentation calme (apport minimal de matériaux détritiques) et à basse température (zones d'altitude, périodes glaciaires, ...) ;
- abondance de silice soluble (nécessaire à la constitution d'une partie de l'organisme de la diatomée : le frustule) et de substances nutritives (phosphates et nitrates principalement, bore, cuivre, cobalt et fer également) ;
- absence de substances toxiques ou inhibitrices de croissance (sels solubles par exemple).

Les diatomées vivent dans des eaux douces, saumâtres et salées, mais peu d'espèces prospèrent dans tous ces environnements à la fois. Après leur mort, les frustules siliceux s'accumulent dans les bassins de sédimentation à des rythmes variables, pouvant atteindre plusieurs millimètres à 2,5 cm/an quand l'apport de silice est important et continu.

En plus des conditions favorables à un développement optimal des diatomées, qui viennent d'être évoquées, d'autres facteurs sont nécessaires à la formation des gisements de diatomite. Ils concernent la formation des réservoirs d'eau, l'atteinte d'un degré de pureté maximal du dépôt, la capacité volumétrique et la conservation du gisement (Jeambrun, 1977 ; Champreux et Serieyssol, 1986 ; Breese, 1994).

Les réservoirs d'eau, à l'abri des perturbations fluviales, peuvent se former :

- dans des bassins et zones subsidentes, les conditions les plus favorables étant rencontrées dans la partie centrale de ces structures (à l'écart des apports détritiques latéraux) ;
- en relation avec des phénomènes glaciaires : lacs résultant de l'obstruction de vallées par des produits d'érosion glaciaire (moraines) et du surcreusement des fonds de vallées du fait de la présence de verrous qui ralentissent ou stoppent la progression du glacier ;
- dans les zones volcaniques, les manifestations éruptives pouvant entraîner la formation de barrages de vallées, de cratères et de dépressions volcano-tectoniques (calderas notamment).

Pour qu'un dépôt atteigne un degré de pureté maximal, il convient que le milieu de sédimentation soit épargné de contaminations et de pollutions de différentes natures et origines :

- chimiques : la présence de calcium et de magnésium sous forme colloïdale dans l'eau, liée à la nature des formations encaissantes, conduit, sous climat chaud et en milieu agité, à la formation de carbonates. Il convient donc de rechercher des paléozones calmes développées sous de basses températures ;
- détritiques, ce qui revient à privilégier :
 - . les réservoirs d'eau de grandes dimensions (qui comportent des parties à l'abri des apports terrigènes) et dont les bassins versants sont les moins accidentés ou les plus réduits,
 - . les périodes paléo-climatiques froides, caractérisées par une végétation rare ou de type forêt nordique, et par une altération pédologique limitée ;
- aériennes, qui correspondent aux projections volcaniques, d'où l'intérêt de rechercher des dépôts situés spatialement hors de leur portée, ou développés au cours de périodes de calme éruptif.

La capacité volumétrique d'un gisement dépend :

- des dimensions et de la forme du réservoir : l'accumulation des diatomées est d'autant plus importante que le réservoir est de grande taille, et que sa profondeur est grande comparativement à sa superficie ;
- des conditions environnementales et de sédimentation, qui doivent rester stables pendant une période de l'ordre de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'années.

La diatomite étant une roche tendre, un gisement ne sera préservé que s'il est :

- protégé contre l'érosion : contextes géomorphologique (zone sommitale) et hydrogéologique (zone maintenue à l'écart du réseau de drainage) favorables, présence d'une couverture de formations géologiques plus résistantes (coulées de lave) ou épaisses (moraines) ;
- épargné des processus géologiques susceptibles d'affecter les caractéristiques initiales du dépôt (modifications diagénétiques, remaniement, altération chimique, métamorphisme).

Il apparaît donc que, malgré le fait que les diatomées soient des organismes couramment rencontrés, dans différents contextes géologiques, et que les indices de diatomite soient communs, les gisements de diatomite présentant une réelle importance économique, aux niveaux qualitatif et quantitatif, sont rares. On n'en dénombre qu'une vingtaine dans le monde susceptible de fournir des produits finis dits "nobles".

On distingue habituellement deux grands types de gisements de diatomite : les gisements marins et les gisements continentaux (lacustres principalement).

Les dépôts marins de diatomite se rencontrent dans des bassins épicontinentaux, de faible profondeur, et au grand large comme en témoignent les boues à diatomées rencontrées actuellement dans les eaux froides de la ceinture péri-antarctique et de la bordure du Pacifique nord.

Elles sont également présentes dans certains courants froids (courant du Labrador) et à leurs zones de remontée ("upwelling" dans le golfe de Californie). On a pu dénombrer jusqu'à un million de diatomées par millilitre d'eau dans de tels contextes (Breese, 1994). En domaine marin, les manifestations volcaniques jouent un rôle important au niveau du chimisme des eaux dans lesquelles se développent les diatomées.

Le meilleur exemple de gisement marin de diatomite est fourni par celui de Lompoc, en Californie, d'âge mio-pliocène, qui est le plus important gisement actuellement exploité dans le monde (dépôt épais de 300 m). Il correspond à une zone d'"upwelling" fossile dans laquelle l'accumulation de frustules a été favorisée par la présence de grands bassins tectoniques.

Les dépôts marins de diatomite d'âge tertiaire se rencontrent communément le long des côtes de l'océan Pacifique où ils sont associés à des cendres volcaniques, des argiles et des sédiments détritiques interstratifiés.

Ils sont significativement épais (Breese, 1994) :

- en Californie : Santa Barbara et Kern Counties ;
- au Mexique : Baja (âge miocène) ;
- au Pérou : bordure côtière (âge miocène) ;
- au Japon : partie septentrionale (âge miocène).

Des roches et sédiments diatomitiques d'origine marine sont également présents (Breese, 1994) :

- au Danemark : île de Fuur (moler d'âge paléocène-éocène) ;
- en Pologne : sédiments oligo-miocènes ;
- en Algérie (âge miocène) ;
- aux Etats-Unis : Maryland et Virginie (âge miocène)
- et dans des formations tertiaires en Espagne, en Corée du Sud, au Chili, en Nouvelle-Zélande et en Indonésie (Java).

En domaine continental, les dépôts de diatomite présentent une variabilité plus grande que dans les environnements marins pour ce qui est du pH, de la salinité, de la température et de l'abondance des substances nutritives. Bien que moins vastes, d'une manière générale, que les dépôts marins, ils peuvent néanmoins atteindre des épaisseurs de plusieurs dizaines de mètres.

Ces dépôts continentaux se rencontrent dans (Breese, 1994) :

- des bassins sédimentaires subsidents associés à des chaînes de montagnes (Nevada/USA) ;
- des vallées barrées par des formations volcaniques (Terrebonne, Oregon/USA) ;
- des dépressions de types caldera (Trout Creek Mountains, Oregon/USA) ;
- des cratères d'origine hydro-magmatique, ou maars (France) ;
- des environnements de marais ou d'étangs peu profonds : zones non volcaniques, marécageuses, de basse altitude, d'âge holocène à récent (Etats-Unis, Brésil, Australie, Philippines) ;
- des environnements glaciaires non liés au volcanisme : la silice provient des roches cristallines finement divisées par l'érosion et les dépôts de diatomite (Allemagne, Danemark) sont généralement moins purs que ceux des contextes volcaniques.

En domaine continental, les environnements volcaniques apparaissent de loin comme les plus favorables à la formation de gisements de diatomite d'intérêt économique, pour les raisons suivantes (Jeambrun, 1977 ; Champreux et Euvrard, 1993 ; Breese, 1994) :

- l'activité volcanique est génératrice de dépressions : lacs de barrage et de cratère, calderas ;
- la silice en solution est abondante dans ces milieux fermés, du fait de l'importante altérabilité des roches volcaniques (pyroclastites vitreuses notamment) et des apports par les émanations fumerolliennes et les sources minérales associées ;
- les sels minéraux dissous, apportés par les sources minérales, sont plus facilement assimilés par les diatomées que ceux présents dans les formations du substratum ;
- les eaux y sont calmes et les bassins versants souvent très réduits (apports détritiques faibles).

La plupart des principaux gisements continentaux dans le monde, dont l'ensemble des gisements français (cf. § 2.4.), sont associés au volcanisme.

En 1993, les réserves mondiales de diatomite ont été estimées à 800 Mt, ainsi réparties (European Minerals Yearbook, 1995) :

- Union Européenne : 410 Mt
- Amérique : 350 Mt (dont 250 Mt aux USA)
- Asie : 20 Mt
- Afrique : 10 Mt
- Océanie : 10 Mt.

Une autre estimation (d'après l'US Bureau of Mines, *in* Breese, 1994) faisait état de 2×10^9 t.

2.2. METHODES DE PROSPECTION DES GISEMENTS ET DE CARACTERISATION DES MATERIAUX

Toute exploration des gisements de diatomite doit s'appuyer en amont sur les critères d'ordre géologique qui viennent d'être exposés.

2.2.1. Reconnaissance préliminaire : sélection de zones cibles

Cette première étape peut intégrer (Kadey, 1975 ; Jeambrun, 1977) :

- une synthèse bibliographique sur la géologie, et notamment la chronostratigraphie (formations tertiaires, néogènes en particulier, et quaternaires) et la paléoclimatologie (périodes froides) ;
- une étude géomorphologique (dont examen de photographies aériennes) et paléogéographique, afin d'identifier les "pièges sédimentaires" éventuels (bassins dans les zones marines de "upwelling", lacs dans les contextes volcaniques,...) ;

- le repérage sur le terrain des niveaux les plus clairs et les plus tendres, et des variations de la végétation (qui peut être spécifique à l'aplomb d'un dépôt de diatomite) ;
- des méthodes telles que la gravimétrie (contrastes de densité) et l'imagerie en proche infrarouge (relevés aériens des caractéristiques thermiques).

Les phases préliminaires de prospection sont différentes selon qu'elles s'adressent à des gisements visibles ou non (Berton et Le Berre, 1983) :

- gisement affleurant ou subaffleurant :

- . recherche des zones d'affleurement ;
- . échantillonnage : rainures perpendiculaires aux couches (par tranches de 1-2 m ; trous à la tarière, à la pelle mécanique, puits éventuellement (maille des ouvrages : 0,5 à 1 km initialement, 200 à 400 m ultérieurement) ;
- . tests sur le matériau :
 - couleur, brillance,
 - masse volumique apparente, porosité, absorption d'eau,
 - examen au microscope,
 - calcimétrie, analyse minéralogique,
 - analyse chimique : SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO et éventuellement TiO_2 , P_2O_5 , Na_2O , K_2O et perte au feu,
 - broyage, densité de la poudre en vrac ;

- gisement masqué : la prospection n'est entreprise que si les conditions sont favorables : présence d'indices connus (autre gisement à proximité, résultats de sondages,...), caractéristiques morphologiques d'un gisement potentiel ;

- . forages carottés (diamètres ≥ 10 cm pour permettre un carottage satisfaisant -représentativité des échantillons, absence de pollution- et une récupération suffisante d'échantillons pour les tests),
- . si les résultats des tests sur les carottes sont positifs : forages destructifs avec diagraphie (dans le trou de forage pour tester le niveau de diatomite et la séquence qui l'environne : diagraphie neutron notamment pour déceler la porosité de la diatomite), en complément des forages carottés, pour s'assurer de la continuité de la formation de diatomite,
- . observations et tests sur le matériau (comme dans le cas d'un gisement visible).

L'analyse chimique (par fluorescence X) et l'analyse minéralogique (par diffractométrie des rayons X) renseignent sur le degré de pureté du dépôt de diatomite, et donc sur l'abondance relative des impuretés. Les impuretés les plus couramment rencontrées sont la matière organique, les argiles, le quartz, les carbonates, le mica, les feldspaths et les cendres volcaniques. En complément de ces méthodes et de l'examen par microscopie optique, il peut s'avérer intéressant d'avoir recours à la microscopie électronique à balayage pour déterminer la taille, la forme et la structure des frustules de diatomées, dans la mesure où ces caractéristiques conditionnent largement l'aptitude des matériaux pour des applications spécifiques.

A ce stade de la prospection, d'autres méthodes d'investigation peuvent être mises en oeuvre :

- l'examen des échantillons sur le terrain, à l'aide d'un microscope portable, peut apporter des informations importantes sur la nature des constituants des dépôts (Kadey, 1975) ;

- l'étude des associations et des variations dans la population de diatomées peut contribuer à l'identification de niveaux particuliers au sein d'un même gisement, et ainsi être un outil utile de cartographie et de repérage stratigraphique (notamment dans les formations largement recouvertes ou structuralement complexes) conduisant à circonscrire les parties du gisement qui présentent un intérêt économique (Breese, 1994) ;
- les méthodes géophysiques de sondages électriques et de sismique réfraction, qui permettent de déterminer la structure géologique et la configuration interne des réservoirs et le prolongement de la stratification sous les zones sans affleurements, et de distinguer les unités stratigraphiques d'après leur degré de consolidation, peuvent être utilisées avec les données de surface pour guider la sélection des cibles prioritaires et des emplacements de forages (Jeambrun, 1977 ; Breese, 1994).

L'échantillonnage préliminaire selon une maille large a pour but, d'une part, de déterminer la qualité moyenne des matériaux, ses variations dans le gisement et d'un niveau à l'autre, et les quantités potentielles, et, d'autre part, d'identifier les zones où doivent être menées en priorité des investigations (Breese, 1994).

Des techniques spécialisées d'échantillonnage peuvent être employées dans des cas particuliers : boues et vases présentes au fond des lacs et dans les zones marécageuses échantillonnées par pompage, dragage ou à l'aide d'une tarière à cuillère.

Les spécifications critiques des produits finis recherchés, compte tenu des besoins du marché, sont des éléments à intégrer dans les phases d'échantillonnage pour permettre d'orienter ces dernières en connaissant les variations de la qualité des matériaux. Les essais et analyses qualitatifs appropriés doivent être sélectionnés pour juger des résultats en fonction des standards industriels et des produits commerciaux concurrents. Comme la qualité des matériaux peut varier d'une couche à l'autre dans un gisement, et au sein d'une même couche, les mailles et les méthodes d'échantillonnage doivent être choisies pour optimiser la connaissance des variations de qualité et pour éviter les erreurs d'interprétation relatives à la représentativité des échantillons.

2.2.2. Etude de gisement

Si les résultats des phases préliminaires de prospection sont encourageants, la reconnaissance systématique du gisement de diatomite, par forages, puits ou tranchées selon sa configuration, est réalisée.

La maille d'échantillonnage choisie en phase finale de prospection dépend de la continuité des couches et des variations de qualité observées. Pour permettre de préciser le schéma d'exploitation, un espacement des prélèvements de 50 m ou moins, jusqu'à 100 m, est généralement adopté (Breese, 1994).

Les tests et analyses à réaliser sont identiques à ceux préconisés lors des phases préliminaires de prospection, auxquels s'ajoutent (Berton et Le Berre, 1983) :

- granularité après broyage (simulation du traitement en usine) ;
- résistivité, pH ;
- analyse des éléments en trace (dont métaux lourds et composés toxiques) ;
- essais d'abrasivité ;
- essais de filtration (vitesse de filtration, limpidité des filtrats).

Les mesures de la surface spécifique et des teneurs en éléments solubles (solubilité du fer et du calcium dans l'acide par exemple) viennent souvent s'ajouter à cette liste.

Si les résultats des tests et analyses concluent à une qualité commerciale, et si les conditions d'extraction sont satisfaisantes, de nouveaux échantillons de matériaux bruts sont prélevés pour déterminer les conditions industrielles de production à l'échelle d'une usine (Breese, 1994).

2.3. CRITERES D'EXPLOITABILITE DES GISEMENTS ET DE SELECTION DES MATERIAUX

L'évaluation économique des gisements nécessite d'intégrer les aspects relatifs à la géologie et à la faisabilité au niveau de l'extraction et du traitement des matériaux, dont leur aptitude à fournir les produits finis désirés.

Au cours des différentes études, les éléments fondamentaux d'un programme d'évaluation sont les suivants (Breese, 1994) :

- identification des couches productrices et détermination de leur exploitabilité : nombre, épaisseur, extension géographique, tonnage potentiel, degré de sélectivité à l'extraction ;
- détermination des moyens de production nécessaires : équipements, installation de traitement des matériaux ;
- étude de marché ;
- aspects logistiques : proximité des utilisateurs, moyens de transport, énergie, main-d'oeuvre.

Les matériaux diatomitiques bruts contenant naturellement une forte teneur en eau (jusqu'à 65 % environ), il convient de limiter au maximum leur transport, ce qui implique que le gisement :

- soit proche d'une installation de traitement existante (50 km environ) ;
- ou soit suffisamment important pour justifier la construction d'une usine sur le site d'extraction.

On admet habituellement que la taille minimale d'un gisement exploitable isolé est de l'ordre de 1 à 3 Mt de matériau brut, ou, en d'autres termes, qu'elle doit permettre d'assurer l'approvisionnement d'une usine pendant une période d'au moins 20 ans (Berton et Le Berre, 1983 ; Champreux et Euvrard, 1993).

On recherchera de préférence les gisements exploitables à ciel ouvert dont les caractéristiques sont les suivantes (Berton et Le Berre, 1983) :

- épaisseur minimale de la couche exploitable : de l'ordre de 2 m ;
- rapport épaisseur de la découverte/épaisseur du niveau exploitable inférieur ou égal à 2 si le recouvrement est meuble, et inférieur à 1 s'il est constitué de roches compactes.

Une évaluation préliminaire de la qualité du matériau peut être réalisée à partir des observations de terrain :

- couleur et brillance, propriétés importantes pour certaines applications (charges nécessitant une grande blancheur) ;

- densité apparente : traduit l'abondance relative des impuretés (sables, argiles,...) qui, si elles sont en quantité excessive, peuvent parfois affecter les propriétés de produits finis (pH, solubilité, densité, abrasivité) et ainsi compromettre certaines utilisations ;
- degré de consolidation, paramètre important dans la mesure où le broyage d'une diatomite trop consolidée peut entraîner la dégradation de la structure des frustules de diatomées ;
- nature et caractéristiques des diatomées (une taille trop réduite et une forme trop simple peuvent interdire des applications en filtration), déterminées par un examen en microscopie optique (microscope portable).

Les critères importants indicateurs de la qualité des matériaux bruts, déterminés au laboratoire, sont les suivants :

- teneur en SiO_2 élevée, variant habituellement de 70 à 90 % ;
- teneur en Fe_2O_3 inférieure à 1,3 % pour les usages dits "nobles" (filtration et charges) ;
- taux d'humidité le plus bas possible (peut varier de 65 à 20 %) afin de faciliter le traitement et d'en réduire les coûts ;
- teneurs minimales en résidus organiques, sels solubles et carbonates.

Les autres paramètres à déterminer ont été énumérés au paragraphe 2.2.

Enfin, il est à retenir que la classification des diatomites en haute et basse qualités est basée sur leur aptitude à fournir des produits adaptés à une application donnée, et pas seulement sur leur degré de pureté. A titre d'exemple, une diatomite impure peut se révéler inutilisable comme agent de filtration et par contre constituer un produit absorbant de haute qualité (Breese, 1994).

2.4. GISEMENTS FRANÇAIS

2.4.1. Généralités

Les gisements français de diatomite sont de type continental lacustre et sont situés dans des contextes volcaniques.

Deux gisements sont actuellement exploités :

- le gisement de la Montagne d'Andance, dans le département de l'Ardèche, qui approvisionne l'usine de la société CECA S.A., implantée à Saint-Bauzile ;
- le gisement de Virargues/Foufouilloux, dans le département du Cantal, qui alimente à la fois l'usine de la société CECA S.A. à Riom-ès-Montagnes et celle de la société CELITE FRANCE basée à Murat.

Le gisement de La Bade/Collandres (âge miocène moyen), situé dans la partie septentrionale du massif volcanique du Cantal, dans la vallée de la Véronne, au sud de Riom-ès-Montagnes, a été fermé en 1994 pour cause d'épuisement des réserves. Exploité par des galeries souterraines, il fournissait une diatomite extrêmement pure (une seule espèce de diatomée présente :

Cyclotella), de très haute qualité pour le secteur de la filtration, élaborée dans l'usine CECA de Riom-ès-Montagnes.

Une phase de prospection de nouveaux gisements de diatomite est actuellement en cours en France.

2.4.2. Le gisement de la Montagne d'Andance (Ardèche)

Le gisement de diatomite de la Montagne d'Andance, dit "de Saint-Bauzile" (du nom de la commune proche sur laquelle est installée l'usine de traitement) est situé à 20 km au nord-nord-ouest de Montélimar. La Montagne d'Andance constitue un petit massif bien individualisé reposant sur des marnes crétacées, séparée par l'érosion de la digitation nord-est du massif volcanique du Coiron.

Le lac à diatomées s'est installé dans un cratère d'explosion hydromagmatique, ou maar, qui s'est ouvert au Miocène supérieur dans les formations marno-calcaires du Valanginien. L'érosion a entaillé, sur près de 200 m d'épaisseur, la partie supérieure du remplissage cratérique (dont la profondeur totale reste inconnue), produisant un phénomène d'inversion de relief. Les rivages de l'ancien lac ont totalement disparu et il est impossible de définir le diamètre initial de la structure, qui devait être de l'ordre de 2 km au minimum (Champreux et Euvrard, 1993).

La coupe géologique de la Montagne d'Andance, depuis la base jusqu'au sommet, peut être synthétisée de la façon suivante (Iskandar, 1988 ; Champreux et Euvrard, 1993 ; fig. 1) :

- niveau lacustre à diatomées, impur et impropre à une utilisation industrielle (épaisseur visible : 2-3 m) ;
- matériaux volcaniques d'origine intracratérique probable (épaisseur : 80 m environ) : basaltes, hyaloclastites et pillow-lavas (mise en place sous-aquatique), pépérites à ciment diatomitique ; cette activité volcanique cesse et un nouveau lac s'installe ;
- diatomites (à rognons de basalte à la base), épaisses d'une soixantaine de mètres au centre de la structure, traduisant une intense sédimentation diatomitique (pendant une période de l'ordre de 100 000 ans), et intrusions basaltiques (sills) qui témoignent de manifestations volcaniques intracratériques au cours ou immédiatement à la suite de l'épisode lacustre (mise en place dans la masse des diatomites, consolidées ou en voie de l'être) ; ces diatomites ont un âge compris entre 8 et 8,5 Ma ;
- brèches pyroclastiques renfermant de nombreux fragments de calcaires jurassiques et de marnes valanginiennes arrachés au substratum sédimentaire (épaisseur : 10 m) ;
- coulées basaltiques sommitales, probablement issues du massif volcanique du Coiron, représentant la phase terminale du remplissage lacustre (épaisseur > 50 m localement).

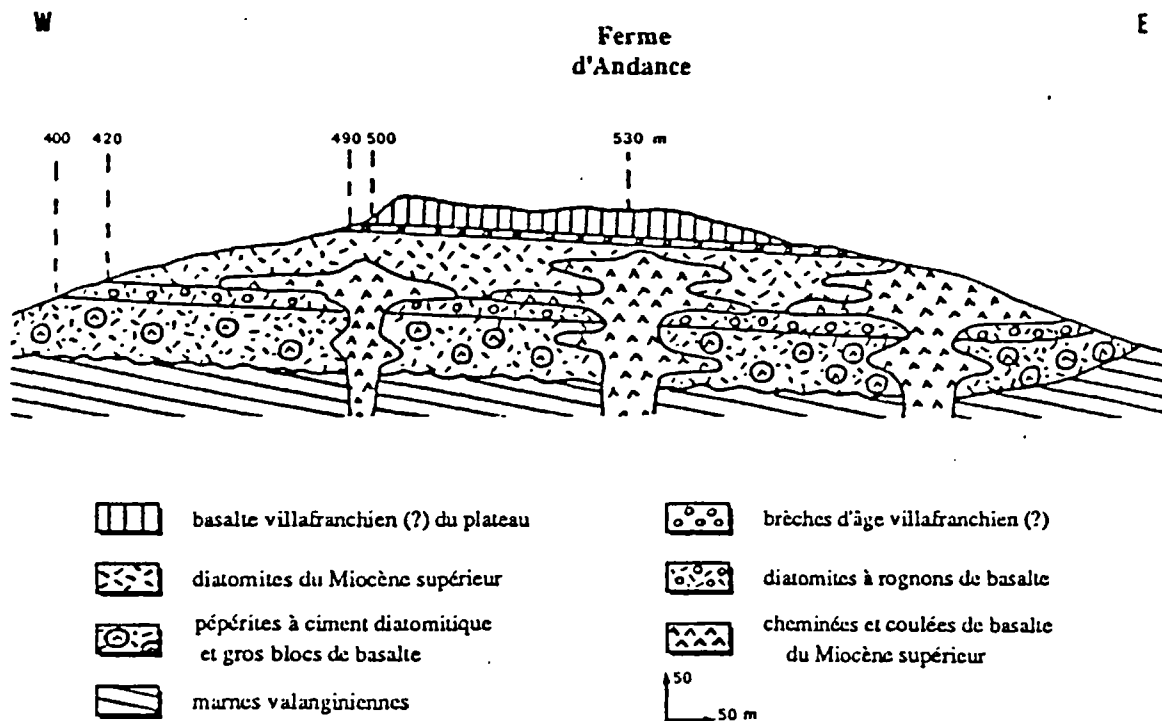


Fig. 1 - Coupe géologique interprétative de la Montagne d'Andance (*in* Mein *et al.*, 1983).

Le gisement de la Montagne d'Andance se distingue des autres dépôts de diatomite de la région, connus sur le versant oriental du massif du Coiron, par la pureté des matériaux. Le flanc ouest a été exploité en galeries jusqu'en 1959.

L'exploitation actuelle, sur le flanc est, dans une carrière à ciel ouvert, concerne l'ensemble des niveaux de diatomite (alternances de couches de diatomées benthiques et pélagiques), à l'exception des niveaux de base plus carbonatés et argileux. Cette exploitation est sélective dans la mesure où deux faciès nettement distincts sont superposés : la partie supérieure du gisement est caractérisée par une diatomite blanche, plus ou moins polluée en surface par des oxydes de fer, alors que la partie inférieure correspond à une diatomite plus pure, de couleur verte.

Le volume total de la formation lacustre a été évalué à environ 10 Mm³ (Champreux et Euvrard, 1993).

2.4.3. Le gisement de Virargues/Foufouilloux (Cantal)

Le gisement de diatomite de Virargues/Foufouilloux, dit "de Murat" (du nom de la ville proche où est implantée une usine de traitement), ou "de Sainte-Reine" ou "d'Auxillac" (du nom des anciens sites d'extraction), est localisé dans la partie centrale du massif volcanique du Cantal, en bordure de la planèze de Chalinargues, à environ 3 km au nord-est de Murat.

D'un point de vue chronostratigraphique, les dépôts de diatomite correspondent aux terrains volcano-sédimentaires qui sont compris entre les laves inférieures miocènes et les basaltes supracantaliens (basaltes des plateaux).

Le mur du gisement, connu seulement par sondage, correspond à une brèche volcanique hétérogène qui pourrait représenter une brèche de diatrème. Il est en effet assez vraisemblable, mais nullement prouvé, que le lac dans lequel ont proliféré les diatomées s'est installé dans le cratère d'un maar (Goër de Herve (de) et Tempier, 1988). Le gisement est de forme elliptique (0,8 x 1,3 km). Le dépôt de diatomite contient une faible quantité d'argiles (kaolinite, illite, montmorillonite), une riche flore foliaire et pollinique, et, près de sa base, s'intercalent deux bancs d'alluvions fluviatiles à galets phonolitiques et trachyandésitiques, et, à différents niveaux, des lits minces de projections basaltiques directes. Les travaux d'exploitation ont par ailleurs rencontré trois intrusions basaltiques (dont l'une datée à 5,4 Ma) qui ont perturbé la base du gisement et thermométamorphisé les diatomites (Goër de Herve (de) et Tempier, 1988).

La formation diatomitique, qui n'est visible qu'à la faveur des exploitations où son épaisseur moyenne est de 20 m (épaisseur très variable car le dépôt a été morcelé par l'érosion, mais n'excédant nulle part 30 m), est contemporaine des premières éruptions planéziennes de la région, ce qui situe son âge vers la limite Miocène-Pliocène (5 à 6 Ma).

Le gisement a été protégé de l'érosion par une couverture (qui doit être dégagée pour permettre l'extraction de la diatomite) composée de dépôts alluviaux ou périglaciaires, et surtout d'une puissante accumulation de moraine de fond qui atteint 25 m d'épaisseur (Goër de Herve (de) et Tempier, 1988).

Cette dernière a, lors de sa mise en place, érodé les dépôts, comme en atteste la présence en son sein de grands "copeaux" de diatomite arrachés au substratum.

Le rapport épaisseur de la découverte/épaisseur du niveau exploitable varie de 1 à 1,5 dans le gisement.

La formation diatomitique est constituée de quatre principaux faciès se distinguant par leurs florules (alternances de couches de diatomées benthiques, penniques et de diatomées pélagiques, centriques : *Melosira*, *Synedra*, *Cyclotella*) et leurs propriétés technologiques (Champreux et Serieyssol, 1986). Ces variations dans la composition de la population de diatomées traduisent des changements des conditions environnementales dans le temps. De ce fait, l'exploitation est sélective, réalisée dans des carrières à ciel ouvert.

Les réserves exploitables ont été estimées à 4,4 Mm³.

2.5. MODES D'EXPLOITATION DES GISEMENTS ET DE TRAITEMENT DES MATERIAUX

La diatomite étant une roche tendre, l'abattage à l'explosif n'est pas nécessaire. On peut cependant y avoir recours pour dégager la couverture du gisement, quand celle-ci est constituée de roches indurées (coulées de lave par exemple).

L'extraction est réalisée le plus souvent dans des carrières à ciel ouvert, en gradins, à l'aide de moyens mécanisés traditionnels (bulldozers, chargeuses, scrapers, camions), et peut être sélective (parfois avec tri manuel dans les petites exploitations), quand les formations diatomitiques sont hétérogènes, pour tenir compte des caractéristiques particulières des différents niveaux (types de diatomées, impuretés...) composant le gisement.

Cependant, d'autres méthodes d'exploitation sont parfois employées :

- par des galeries souterraines, quand la couverture du gisement, trop épaisse et/ou trop indurée, ne peut être dégagée. C'est le cas par exemple en Algérie (Sig), au Chili (Arica) et en Chine (Jilin) ;
- dans les lacs : par endiguement et drainage, ou par dragage de leurs fonds à partir de barges (lac Myvatn en Islande). Dans ce dernier cas, les boues à diatomées sont pompées et acheminées directement par un pipe vers les installations de traitement où elles sont, dans un premier temps, épurées (hydrocyclones), décantées puis essorées (Breese, 1994).

Après extraction, compte tenu des caractéristiques intrinsèques des dépôts et des propriétés des produits finis recherchés, les matériaux bruts peuvent faire l'objet :

- d'un stockage par qualités types, à l'air libre ou sur des aires couvertes, afin de favoriser un séchage naturel et réduire ainsi de façon significative (plusieurs dizaines de %) le taux d'humidité des diatomites brutes, qui varie habituellement de 20 à 60 % ;
- d'un mélange de différentes qualités issues d'un ou de plusieurs gisements ;
- d'une préhomogénéisation des stocks.

Le traitement des matériaux bruts qui s'ensuit (fig. 2), réalisé dans une usine, comprend les principales phases suivantes (Kadey, 1975 ; Pettifer, 1982 ; Industrial Minerals, 1987 ; Breese, 1994) :

- élimination des plus gros blocs de roches massives (laves par exemple), en partie par tri manuel ;
- concassage primaire ménagé (concasseurs à cylindres dentés) pour préserver la structure des frustules de diatomées et éviter le broyage des impuretés ;
- séchage à 300-400°C, voire jusqu'à 800°C (fours rotatifs, séchoirs rotatifs), et broyage (broyeurs à marteaux) simultanés (sécheurs-broyeurs à broches) pour réduire le taux d'humidité (de 60 à 4-5 % par exemple) et éliminer une partie (40 à 50 %) de la matière organique, et obtenir des éléments de taille < 13 mm ; cette opération peut être réalisée en deux phases successives ;
- sélection par émottage, épuration et calibrage (séparateurs magnétiques, sélecteurs dynamiques : cyclones à air, filtres à manche) pour éliminer les impuretés les plus denses et les plus grossières (qui peuvent être reprises dans un circuit secondaire d'épuration), expulser l'eau restée absorbée et procéder à des coupures granulométriques des produits pulvérulents.

A ce stade du traitement sont ainsi élaborés des produits qualifiés de "naturels" (séchés, broyés et épurés) qui sont utilisés pour différentes applications : filtration (très faible perméabilité et vitesse de filtration extrêmement basse) pour les fractions grossières, charges pour les particules fines, et autres applications. Le résidu issu du circuit secondaire d'épuration, correspondant aux particules les plus grossières, composé des impuretés et, majoritairement, de diatomite naturelle, peut également être valorisé pour certaines applications sous l'appellation de "coproduit de fabrication".

- traitements thermiques : calcination avec (activation) ou sans ajout d'agents fondants (opérations détaillées ci-après), suivie d'un refroidissement (refroidisseurs cylindriques à eau) ;
- émottage, broyage et sélection granulométrique (séparateurs et cyclones à air, tamis vibrants, filtres à manche) pour séparer les particules les plus fines (qui entraîneraient des problèmes de colmatage pour les applications en filtration), ayant un diamètre moyen de 10 à 15 μm , qui seront utilisées comme charges, les fractions les plus grossières étant destinées à la filtration (diamètre moyen de 30 μm pour les moins perméables, de 50 à 80 μm pour les plus perméables). A ce stade du traitement sont donc élaborés les produits dits "calcinés" et "activés" ;
- ensachage, palettisation, expédition : développement des transferts de produits en vrac par voie pneumatique (à l'usine et chez l'utilisateur), en liaison avec les transports par conteneurs, camions et wagons-citernes.

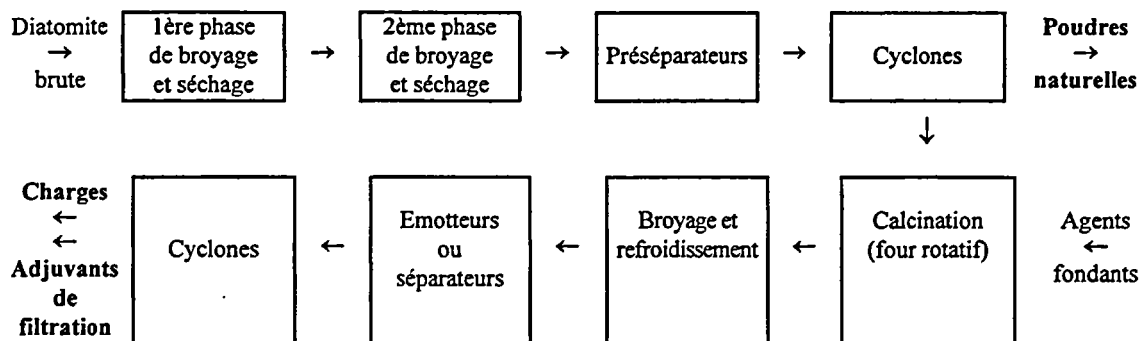


Fig. 2 - Schéma type de traitement des matériaux diatomitiques (*in* Industrial Minerals, 1987).

Afin de modifier les propriétés fondamentales de la diatomite (notamment la granulométrie et la perméabilité) pour satisfaire aux exigences des utilisateurs d'adjuvants de filtration, les produits naturels peuvent faire l'objet de traitements thermiques qui sont de deux types.

La **calcination simple** est réalisée dans un four rotatif de 30 à 35 m de longueur, à une température variant de 800 à 1 300°C (température moyenne de l'ordre de 1 050°C). D'un point de vue technologique, ce traitement thermique correspond à un frittage, c'est-à-dire à un début de fusion, et a pour conséquences :

- d'éliminer la matière organique ;
- d'agglomérer les particules et d'augmenter ainsi leur diamètre, la taille des pores et la perméabilité ;
- de transformer l'état de surface des frustules (qui deviennent lisses) et de diminuer ainsi leur surface spécifique (de 10-30 m²/g à 0,5-5 m²/g) ;
- d'augmenter la densité réelle (de 2,0 à 2,3), le pH, la dureté (de 4,5-5,0 à 5,0-6,0 sur l'échelle de Mohs), l'indice de réfraction (de 1,40 à 1,49) et la brillance (de 59-75 % à 85-95 %) ;
- de déshydrater la silice amorphe et d'initier la transformation de l'opale en cristobalite ;
- de faire varier la couleur du produit qui, de gris, devient rose, voire blanc cassé ou beige, du fait de l'oxydation du fer.

La **calcination en présence d'un fondant**, également appelée **activation**, est réalisée à une température moyenne de l'ordre de 1 000°C. L'agent fondant (carbonate de sodium ou chlorure de sodium) est ajouté en amont du four rotatif (mélange avec la diatomite dans des conditions dynamiques, au cours du transport, ou dans des silos), à raison de 2 à 10 % de la masse.

Ce traitement thermique accentue encore plus les modifications apportées par la calcination simple :

- début de vitrification (abaissement de la température de fusion) : agglomération des particules plus importante, d'où une augmentation de la granulométrie et de la perméabilité ; incorporation des oxydes de fer dans une phase vitreuse silicatée, d'où l'obtention de produits blancs ;

- formation de silice cristalline aux dépens de la silice amorphe : teneur en cristobalite pouvant varier de quelques % à 40 ou 60 % ;
- transformation des impuretés minérales (carbonates, sulfates, sulfures, ...) en composés insolubles (oxydes).

Ces différentes phases de traitement permettent d'orienter la production en fonction des besoins du marché de la filtration. En effet, l'adaptation de paramètres tels que le type de matière première, la température de calcination, la quantité de fondant et sa composition, le temps de résidence dans le four (variant habituellement de 30 à 45 min), les coupures granulométriques, permet de contrôler les propriétés (granulométrie, perméabilité, vitesse de filtration,...) des produits finis recherchés.

D'une manière générale, les agents filtrants à faible vitesse de filtration (perméabilité généralement inférieure à 0,3 darcy) sont obtenus par calcination simple, et ceux à vitesse de filtration élevée (perméabilité généralement comprise entre 0,3 et 15 darcy) par activation.

Chaque usine dispose d'un laboratoire de contrôle de la qualité des produits dits "nobles" élaborés. Les paramètres suivants sont périodiquement mesurés (un échantillon par palette par exemple) :

- perméabilité et densité humide du gâteau de filtration, voire odeur, pour les adjuvants de filtration ;
- granulométrie (refus sur tamis) et blancheur pour les charges.

Compte tenu des exigences sanitaires, le taux de silice libre cristalline est souvent déterminé en routine.

Le schéma type des opérations nécessaires à l'élaboration des produits finis, qui vient d'être présenté, correspond à un traitement des matériaux par voie sèche, selon une circulation pneumatique.

On peut dans certains cas avoir recours à une épuration des matériaux par voie humide, qui comprend les principales phases suivantes :

- broyage et attrition ;
- classification par tamisage (élimination de la matière organique et des autres impuretés les plus grossières), sédimentation et centrifugation (séparation des particules argileuses les plus fines, inférieures à 2-3 μm) ;
- flottation éventuellement ;
- séparation magnétique à haut gradient, filtration.

Par ailleurs, certaines applications spécifiques requièrent des traitements particuliers, combinés avec la calcination et l'activation (Kadey, 1975) :

- traitement acide des produits naturels (broyés, séchés et épurés) pour la production d'adjuvants de filtration destinés à des usages spéciaux ;

- traitement spécial de surface (aux silanes et aux silicones) pour désactiver la surface des supports utilisés en chromatographie.

Les produits diatomitiques commercialisés sont de quatre types :

- diatomite naturelle (séchée, broyée et épurée) ;
- diatomite calcinée, dite "rose" ;
- diatomite calcinée en présence d'un fondant, ou activée, dite "blanche" ;
- coproduit de fabrication (mélange de diatomite naturelle et d'impuretés).

3. PROPRIETES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

L'intérêt que présentent les produits diatomitiques pour différentes applications est lié à deux caractéristiques intrinsèques et fondamentales : la **composition chimique** et la **structure physique**, et aux autres propriétés qui en découlent (inertie chimique, réfractarité, porosité, densité, capacité d'absorption, surface spécifique,...). Comme cela a été précédemment évoqué (§ 2.5.), ces différentes propriétés peuvent être ajustées au cours des phases de traitement (tabl. 1).

Type de produit	Refus à 150 mesh (%)	Diamètre moyen des pores (µm)	Perméabilité (darcy)	Humidité (%)	pH
Naturel	1-2	1,5-2,5	0,057-0,062	1-3	7,0-8,0
Calciné	2-7	2,5-5,0	0,068-0,53	0,5-1,0	7,0
Activé	6-40	7-22	1,2-30	0,1	10,0

Tabl. 1 - Caractéristiques générales des adjuvants de filtration diatomitiques.

Les diatomites exploitées industriellement présentent à l'état brut des teneurs en silice comprises entre 85 et 94 %, les autres éléments significativement exprimés (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO et MgO principalement) traduisant la présence d'impuretés, notamment d'argiles et de carbonates (tabl. 2).

La diatomite étant essentiellement constituée de silice (amorphe et hydratée dans le produit naturel), elle possède une bonne **inertie chimique**. Après traitement, elle est insoluble dans les solutions acides (à l'exception de l'acide fluorhydrique) ou légèrement alcalines. Par contre, en milieu très alcalin, la diatomite a un **effet pouzzolanique**, c'est-à-dire a la capacité, à température ambiante et en présence d'eau, de fixer la chaux pour donner des composés stables possédant les propriétés hydrauliques du ciment. Elle est modérément réfractaire (point de ramollissement situé entre 1 400 et 1 600°C).

La diatomite présente une **structure physique** complexe, finement divisée du fait de la juxtaposition des frustules de diatomées qui sont de très petite dimension (10 à 150 µm le plus souvent) et de forme variée et irrégulière (fig. 3 et 4). Cette structure varie en fonction des espèces et des types de diatomées, ce qui peut avoir une incidence sur les propriétés : les formes en aiguilles permettent généralement une filtration plus lente, mais efficace en terme de pouvoir clarifiant.

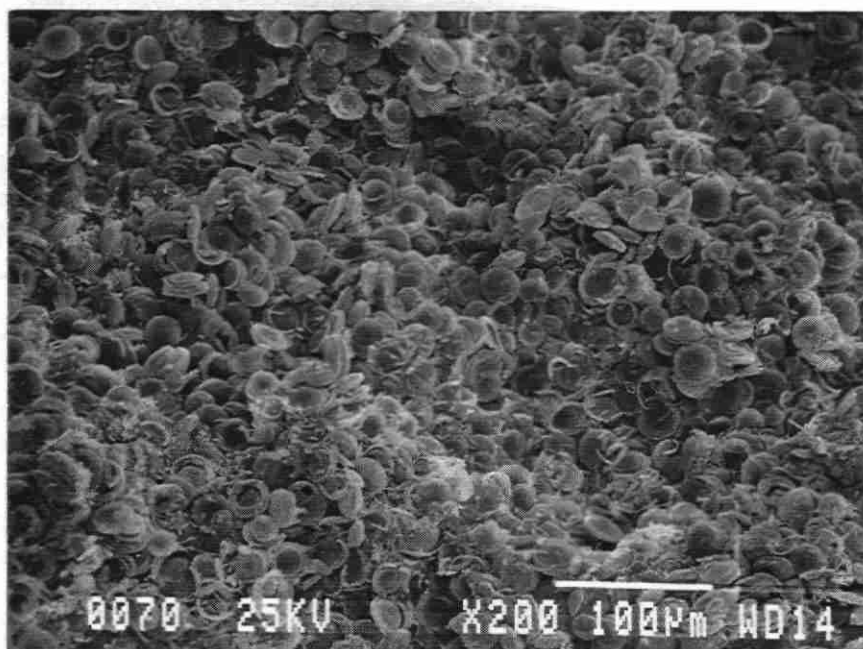


Fig. 3 - Diatomite d'origine espagnole composée de frustules de diatomées de type *Stephanodiscus* (microscope électronique à balayage, cliché BRGM).

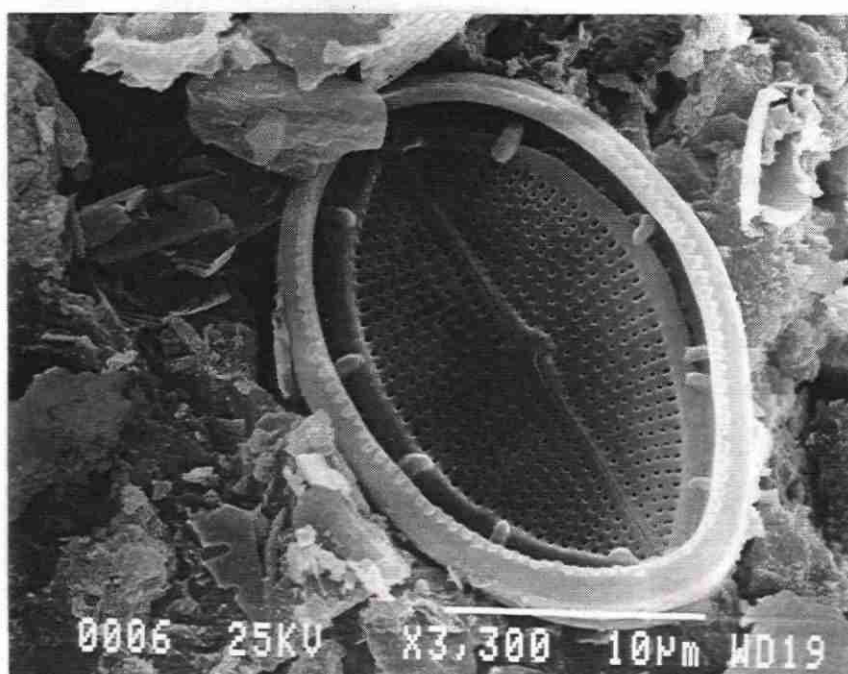


Fig. 4 - Détail d'un frustule de diatomée dans une diatomite du Massif central français (microscope électronique à balayage, cliché BRGM).

Gisements	Chine ⁽¹⁾ (Jilin)	Danemark ⁽¹⁾ (moler)	Espagne ⁽²⁾ (Albacete)	Etats-Unis ⁽²⁾ (Californie/Lompoc)	France (Cantal)	Mexique ⁽²⁾ (Jalisco)
SiO ₂	90,07	67,80	88,60	89,70	91,60	91,20
Al ₂ O ₃	1,98	10,30	0,62	3,72	1,50	3,20
Fe ₂ O ₃	0,67	6,85	0,20	1,09	2,20	0,70
TiO ₂	0,09	1,21	0,05	0,10	-	0,16
P ₂ O ₅	0,06	0,21	-	0,10	-	0,05
CaO	0,39	1,35	3,00	0,30	0,20	0,19
MgO	0,28	1,64	0,81	0,55	0,30	0,42
Na ₂ O	0,22	0,46	0,50	0,31	-	0,13
K ₂ O	0,35	1,47	0,39	0,41	-	0,24
Perte au feu	6,30	7,91	5,20	3,70	3,40	3,60
Total	100,41	99,20	99,37	99,98	99,20	99,89

Résultats d'analyses de matériaux bruts séchés à l'étuve, exprimés en % pondéraux.

Sources : (1) Breese, 1994 ; (2) Kadey, 1983.

Tabl. 2 - Composition chimique de quelques diatomites exploitées dans le monde.

Globalement, cette structure confère aux produits diatomitiques les propriétés suivantes :

- densité apparente faible (liée au nombre de frustules par unité de volume) : généralement comprise entre 0,08 et 0,50 à l'état sec (0,13 pour les poudres non tassées, et 0,45 pour les blocs), et de 1,3 pour les matériaux bruts de carrière contenant 60 % d'eau, la densité réelle étant sensiblement celle de l'opale (2,1) ;
- porosité élevée (volume des pores -espaces inter- et interstices intrafrustules- de l'ordre de 85-95 %), le contact entre les éléments constitutifs (frustules) se faisant principalement en des points isolés de leur surface, d'où des propriétés isolantes (faible conductivité thermique : 0,07 à 0,2 kcal/m-h-°C) ;
- grande surface spécifique, pouvant varier de 3 à 38 m²/g selon les types de produits ;
- forte capacité d'absorption des liquides : jusqu'à 3 à 4,5 fois son propre poids (par exemple 100 à 300 cm³ d'huile/100 mg) ;
- dureté (échelle de Mohs) : 4,5 à 6,0 en particules et 1,5 en masse, d'où un pouvoir faiblement abrasif.

Les propriétés physiques et chimiques de quelques produits diatomitiques utilisés, et en partie fabriqués, en France sont consignées dans le tableau 3.

Les produits de type "moler", constitués d'un mélange de diatomées et d'argiles smectitiques (jusqu'à 30 %), présentent à l'état naturel des propriétés particulières qui sont valorisées industriellement, notamment pour la fabrication de briques réfractaires et isolantes et de granules absorbants. Les argiles jouent le rôle de liants, et la structure et l'assemblage des frustules de diatomées induisent une porosité.

PRODUIT	NOM	FILTERCEL E	CLARCEL CBL	HYFLO SUPERCEL	CLARCEL DIC/S	545	CLARCEL DIT/3R	KO 143 AT	POROSIL D
	TYPE	CALCINE		ACTIVE				NATUREL	ACTIVE
UTILISATIONS		Adjuvants de filtration pour la clarification de boissons (vins, bière, spiritueux,...), d'eaux, de produits chimiques et pharmaceutiques,...						Charges	Supports (engrais, pesticides), isolation thermique,...
Perméabilité (darcy)		0,03	0,049-0,101	1,3	2,6-3,8	3,2	10,5-18,0		
Couleur		rose	beige-rosé	blanche	blanche (blancheur ≥ 78)	blanche	blanche (blancheur ≥ 75)	grise	
Densité apparente (g/l)		165		185		193		240	
Densité humide par centrifugation (g/l)		327		280		304			
Densité EBC (g/l)		417		334		365			
Densité du gâteau			≤ 0,380		≤ 0,380		≤ 0,360		0,400
Densité non tassée									
pH (suspension à 10 %)		6,1	7,0	9,6	9,0-10,5	10,0	10,0	6,5	
Résistivité (kilohms)		30		15		31			
Indice de réflexion de la lumière		51		78		80			
Refus à 45 µm (*)		13,5	≤ 10 (1)					13,0	
Refus à 80 µm (*)					≤ 22		≤ 70		85
Refus à 106 µm (*)		5,1		5,0		12,0		3,0	
Refus à 600 µm (*)		traces	0,1 (2)	0,1		1,3			
10 % < à (µm)		5,3		7,7		12,9			
50 % < à (µm)		18,1		26,9		37,4			
90 % < à (µm)		48,9		75,8		90,0			
Absorption d'huile (*)								170	80
Absorption de NH ₄ NO ₃ (*)								250	
Humidité (*)			0,5		≤ 1	0,1	≤ 0,5	6,0 max.	0,5
Perte au feu (*)		0,3	0,5		≤ 1	0,1	≤ 0,5	5,0	0,5
SiO ₂ (*)		92,80		89,50	92,0	89,6		84,0	82,0
Al ₂ O ₃ (*)		3,19		2,40	2,6	4,0		5,8	5,0
Fe ₂ O ₃ (*)		1,73		2,98	1,3	1,3		2,7	4,5
TiO ₂ (*)		0,51		0,36	0,2	0,2			1,5
CaO (*)		0,47		1,07	0,6	0,5			1,5
MgO (*)		0,27		0,48	0,2	0,6		1,4	
Na ₂ O (*)		0,22		2,40	2,8				4,5
K ₂ O (*)		0,14		0,02	0,3	3,3		0,7	
Fer soluble dans la bière (ppm)		62		160		40			
Calcium soluble dans la bière (ppm)		200		300		250			
Solubilité dans l'acide (*)		0,3		0,6					

* unité : % pondéral - (1) : 50 µm - (2) : 500 µm.

Tabl. 3 - Propriétés physiques et chimiques de quelques produits diatomitiques utilisés en France.

4. SECTEURS D'UTILISATION ET SPECIFICATIONS INDUSTRIELLES

4.1. GENERALITES

Les propriétés physiques et chimiques particulières des produits diatomitiques, naturels, calcinés et activés, permettent des applications dans une large gamme de secteurs industriels.

Les premières utilisations des blocs et des poudres de diatomite ont concerné les produits absorbants, abrasifs et isolants. L'emploi de la diatomite, pour ses propriétés absorbantes, en tant que stabilisant de la dynamite, a été historiquement le plus important au début du siècle.

L'évolution très rapide des technologies de transformation de la diatomite, dans les années 1920, avec le développement des moyens de traitement par calcination (avec ou sans fondant) et classification dynamique, a permis une diversification des utilisations. C'est ainsi qu'ont pu être élaborés, à partir des diatomites les plus pures, des produits techniques de haute qualité de type adjuvants de filtration et charges minérales actives (Breese, 1994). Ces deux derniers secteurs d'utilisation sont actuellement les plus importants à l'échelle mondiale, la filtration étant de loin la première (tabl. 4).

Les secteurs de l'isolation et de la construction, des absorbants et de l'agriculture, qui permettent de valoriser les matériaux diatomitiques les moins purs (impropres aux applications en filtration), demeurent néanmoins encore significatifs (tabl. 4).

Secteurs d'utilisation	Etats-Unis/1992 ⁽¹⁾	Monde/1993 ⁽²⁾	Etats-Unis/1984-1994 ⁽³⁾
Filtration	82	45	64 à 71
Charges	6	28	14 à 23
Isolation	4	16	1 à 4
Autres secteurs	8	12 (dont absorbants : 2)	10 à 15

Données en %. Sources : (1) Harries-Rees, 1994 (ventes et exportations) ; (2) European Minerals Yearbook, 1995 (consommation) ; (3) d'après l'US Bureau of Mines, *in* Breese, 1994 (consommation).

Tabl. 4 - Répartition de la production américaine et de la consommation américaine et mondiale de diatomite par secteur d'utilisation.

Presque toutes les applications ont leurs propres exigences et/ou spécifications et, de ce fait, des méthodes et procédures de contrôle de la qualité des produits ont été développées par accord entre producteurs et utilisateurs de diatomite. L'évaluation de l'aptitude des produits peut être réalisée par des procédures de contrôle simples et appropriées, portant sur de petits échantillons, par comparaison des caractéristiques du produit fini avec les normes industrielles en vigueur ou avec les performances des produits concurrents (Breese, 1994).

La liste ci-après indique quelques-unes des normes ASTM et des spécifications militaires en vigueur aux USA, relatives aux procédures de contrôle et aux caractéristiques des produits diatomitiques destinés à diverses applications (Berton et Le Berre, 1983 ; Breese, 1994).

- Normes ASTM :

- D 604-42 : Diatomaceous Silica Pigment ;
- D 604-81 : Standard Specification of Diatomaceous Silica Pigment ;
- D 719-63 : Analysis of Diatomaceous Silica Pigment ;
- D 719-86 : Standard Test Methods for Analysis of Diatomaceous Silica Pigment ;
- C 517-71 : Diatomaceous Earth. Block and Pipe Insulation ;

- Spécifications militaires américaines :

- MIL-S-15191 B : Silica, Diatomaceous (Flattening Extender Pigment) ;
- MIL-D-20550 B : Diatomaceous Earth ;
- MIL-F-52637 A : Filter Aids, Water purification ;
- 52-MA-522 a : Diatomaceous Silica Pigment ;
- OS 8990 (Navy Department Bureau of Naval Weapons) : Descriptions and Requirements, Diatomaceous Earth.

Deux types de problèmes liés à l'utilisation des produits diatomitiques sont régulièrement évoqués : la santé des personnes exposées aux poussières contenant de la silice cristalline et le recyclage des gâteaux de filtration.

La diatomite peut contenir, à l'état brut, du quartz, toujours en petite quantité, et, après traitement thermique, principalement de la cristobalite à des teneurs variables (de quelques % à plusieurs dizaines de %). Compte tenu de la teneur en humidité de la diatomite brute, généralement élevée (jusqu'à 65 %), les opérations d'extraction ne génèrent souvent pas des quantités importantes de poussières et, de ce fait, ne présentent pas de problèmes particuliers. Il en est différemment dans les usines de traitement où les matériaux sont séchés, broyés et calcinés (calcination simple ou activation).

La **silice cristalline** a été classée comme substance cancérigène probable par l'IARC (International Agency for Research on Cancer) en 1987, ce qui signifie qu'elle peut, si elle est inhalée sur une période relativement longue et en quantité assez importante, causer des maladies pulmonaires, notamment la pneumoconiose (silicose).

A ce titre, les produits diatomitiques doivent être accompagnés d'une notice de sécurité ("Material Safety Data Sheet"), leurs emballages doivent porter la mention du risque associé à leur utilisation, et les gâteaux de filtration à base de diatomite doivent être entreposés après usage dans des décharges contrôlées (Breese, 1994 ; Harries-Rees, 1994).

Les producteurs de diatomite ont pris depuis longtemps des dispositions visant à réduire l'exposition des personnes aux poussières siliceuses, depuis l'extraction des matériaux bruts jusqu'à l'utilisation finale des produits, en passant par le traitement en usine : moyens individuels de protection (masques, casques), systèmes d'abattage et d'aspiration des poussières, techniques d'ensachage, transferts des produits par voie pneumatique dans des enceintes closes, etc.

A ces dispositions s'ajoutent, au niveau de la production, un suivi continu des niveaux d'empoussièrement, ainsi que des examens médicaux réguliers et des campagnes d'information des personnes exposées.

La communauté scientifique considère que la silice cristalline présente un risque professionnel, et non environnemental, et que les normes en vigueur relatives à l'exposition professionnelle, mises en place depuis de nombreuses années dans plusieurs pays, sont appropriées pour protéger la santé des personnes (European Minerals Yearbook, 1995).

Le **recyclage** des produits diatomitiques utilisés en filtration doit être aujourd'hui pris sérieusement en considération dans la mesure où 450 à 500 000 t de gâteaux de filtration sont produits chaque année en Europe (1 t de diatomite correspond à 3 t de gâteaux de filtration ; CECA, communication orale).

Des recherches ont été menées dans différents pays sur la possibilité de recycler et de régénérer les adjuvants de filtration diatomitiques, et, en Allemagne, un procédé de régénération a atteint le stade de l'unité pilote.

Le recyclage des gâteaux de filtration n'apparaît poser aujourd'hui qu'un problème de coût dans la mesure où plusieurs solutions sont techniquement opérationnelles (CECA, communication orale) : utilisation en épandage agricole (sauf pour les produits oenologiques du fait de la fermentation), pour l'élaboration d'alcools employés dans l'industrie (après pressage et distillation) et comme combustible dans les cimenteries (où un apport de silice est recherché).

4.2. FILTRATION

Le secteur de la filtration est de loin le premier utilisateur de diatomite.

La filtration est, par définition, un procédé destiné à séparer mécaniquement les particules solides en suspension dans une phase liquide au moyen de tamis de différentes dimensions. Mais cette séparation peut se révéler difficile à réaliser, par exemple dans le cas de liquides visqueux ou lorsque le colmatage du tamis intervient très rapidement. On a alors recours à des produits spécifiques dénommés **adjuvants de filtration** (un adjuvant est une substance qui, ajoutée à un milieu, en favorise une fonction ou en améliore une propriété), ou agents filtrants.

Un adjuvant de filtration est un produit pulvérulent finement divisé qui, placé dans le liquide à filtrer, aide à contrôler sa vitesse d'écoulement et la rétention des particules indésirables. Son intervention se fait en deux étapes successives. Le liquide, très chargé en adjuvant, est tout d'abord envoyé sur un tamis (toile métallique, textile ou synthétique ; matériaux minéraux poreux) à la surface duquel se forme, par sédimentation forcée, une mince couche d'adjuvant de filtration, appelée **précouche**. Puis des quantités moindres d'adjuvant sont ajoutées en continu dans le liquide à filtrer : c'est l'étape de l'alluvionnage, ou nourrissage.

Au cours de la filtration proprement dite, le mélange adjuvant de filtration-impuretés du liquide se dépose sur la précouche (qui repose elle-même sur le tamis qui ne joue plus qu'un rôle de support), créant ainsi continuellement de nouvelles couches filtrantes qui constituent le gâteau de filtration.

Ce dernier joue le rôle de média filtrant : les particules de diatomite piègent les impuretés tout en évitant le colmatage et en permettant l'écoulement du liquide.

Compte tenu de ses propriétés spécifiques (taille et forme de ses composants, densité, porosité), l'adjuvant de filtration à base de diatomite retient les particules les plus fines ($0,1\ \mu\text{m}$) avant qu'elles n'atteignent le média filtrant, permettant ainsi d'atteindre à la fois un niveau de limpidité des filtrats acceptable et une vitesse de filtration élevée, pour une longueur maximale de cycle de filtration.

La perméabilité et la vitesse de filtration du gâteau, et le degré de limpidité des filtrats dépendent de la granulométrie et de la porosité du gâteau de filtration.

L'utilisation d'adjuvants de filtration à base de diatomite présente également, par rapport aux filtres fixes classiques, les avantages suivants :

- changement du milieu filtrant par simple inversion du courant liquide, sans débatissage de l'appareil ;
- récupération aisée de la totalité des produits à coût élevé (antibiotiques par exemple), par simple lavage du gâteau de filtration avec un liquide bon marché qui se substitue aux précédents.

En général, les produits naturels, qui se caractérisent par des vitesses d'écoulement très faibles et une limpidité des filtrats optimale, sont très peu utilisés en filtration, contrairement aux produits calcinés et activés qui sont habituellement classés en trois principales familles selon leurs perméabilités : élevées (5 à 15 darcy), moyennes (0,9 à 3,8 darcy) et faibles (0,03 à 0,2 darcy). Les deux premières familles sont classiquement utilisées en précouche et en alluvionnage, la troisième servant à la filtration de finition en fin de cycle (documentation CECA).

L'industrie sucrière a été la première à développer l'emploi des adjuvants de filtration à base de diatomite. Ceux-ci sont utilisés aujourd'hui pour épurer et principalement pour le dégrossissage et la clarification, de très nombreux produits :

- vin, bière, cidre, whisky, liqueurs et autres spiritueux, jus de fruits et de légumes, sirops de sucre bruts, pectines, gélatines, vinaigre ;
- graisses et huiles alimentaires (végétales et animales), alginates et autres dérivés des algues, glucose et dextrose ;
- eaux de piscine, potables et industrielles et effluents divers ;
- solvants pour le nettoyage à sec, alcools ;
- sang humain ;
- produits chimiques organiques et inorganiques (dont phénates, silicates et acides sulfurique et phosphorique) et pharmaceutiques (dont paracétamol, antibiotiques, édulcorants) ;
- vernis, laques, résines diverses, polymères, soufre, colles ;
- en galvanoplastie ;
- huiles industrielles, lubrifiantes et de coupe.

Dans quelques cas, cependant, les adjuvants de filtration sont destinés à la récupération et à la concentration de solides finement divisés et très compressibles.

La diatomite peut être également utilisée :

- sous forme d'une paroi poreuse très perméable, à seuil de filtration déterminé, qui présentera la caractéristique de pouvoir être rabotée mécaniquement par couches ultra-minces ; l'élimination du gâteau en est facilitée, notamment dans le cas de filtres rotatifs ;
- pour la fabrication de plaques filtrantes employées en fin de cycle, pour affiner la filtration (élimination des impuretés les plus fines, de l'ordre de 1 μm) de liquides tels que l'eau, le vin et la bière, la diatomite naturelle pouvant être associée à d'autres produits (fines diverses, perlite, cellulose) dans des systèmes multicouches (CECA, communication orale).

Pour certaines applications spéciales, la diatomite peut faire l'objet d'un traitement de surface et d'un lavage à l'acide, et être mélangée à d'autres substances (fibres de cellulose, charbon, pulpe de bois), le mélange étant ensuite séché et mis sous forme d'une couche filtrante (Industrial Minerals, 1987 ; Breese, 1994).

Les produits diatomitiques de type "coproduits de fabrication" peuvent être utilisés pour la filtration d'eaux résiduaires et d'eaux de tanneries qui n'exige pas l'obtention de performances importantes.

La filtration est une étape importante de la vinification et intervient à différents stades de l'élaboration d'un vin (Gaboriau et Mouron, 1992) :

- pendant le pressurage (adjuvants grossiers) : action capillaire favorisant l'évacuation des jus hors de la masse du raisin ;
- avant la fermentation dans le cas des vins blancs (précouche d'adjuvants de filtration moyens ou grossiers) : clarification des moûts par élimination des impuretés solides indésirables, par filtration sur filtres rotatifs sous vide ;
- après la fermentation (cas les plus fréquents), au cours du vieillissement et avant l'embouteillage : élimination des particules en suspension (taille variant le plus souvent de 0,20 à 1,00 μm) telles que bactéries, levures et autres matières. La filtration est souvent réalisée parallèlement au collage (floculation).

L'utilisation d'adjuvants à base de diatomite pour la filtration du vin, qui ont remplacé les procédés traditionnels de filtration sur plaque de cellulose, présente les avantages suivants (Gaboriau et Mouron, 1992) :

- atteinte plus rapide du degré de limpidité recherché et régularité des résultats, amélioration de la couleur et du degré de brillance du vin ;
- bonne sélectivité : seules les impuretés indésirables sont éliminées, sans altération du vin lui-même ;
- amélioration de la récupération et réduction du temps de pressurage ;
- contribution au vieillissement et à la stabilisation du vin ;
- annulation du besoin d'un recours au soufrage pour prévenir toute altération ;
- amélioration de l'efficacité et réduction du coût de la filtration sur membrane.

La quantité d'adjuvant de filtration nécessaire pour un alluvionnage varie en moyenne de 40 à 150 g/hl, et dépend, avec sa qualité, du type et de la quantité de matières solides à éliminer, du débit de filtration et du degré de limpidité des filtrats désirés.

L'élaboration de la bière requiert habituellement, en moyenne, 100 g/hl (quantité variant de 20 à 120 g/hl) d'adjuvants de filtration à base de diatomite, employés également en précouches et en alluvionnage (Harries-Rees, 1994). La technique de filtration par alluvionnage est appliquée à la très grande majorité des liquides alimentaires.

D'une manière générale, le choix de l'adjuvant le mieux adapté au type de filtration doit également prendre en compte les caractéristiques intrinsèques du produit à filtrer, qui sont notamment les suivantes : variable température-viscosité ; concentration en particules solides ; dimension moyenne, répartition granulométrique et structure de ces particules ; pH ; oxydabilité (Delfau, 1979).

Les principaux producteurs d'adjuvants de filtration à base de diatomite élaborent généralement une gamme de produits correspondant à des vitesses de filtration croissantes, mais possédant également des caractéristiques différentes du point de vue de la densité, de la granulométrie, de la couleur, du pH et de la capacité d'absorption (Industrial Minerals, 1987).

Les principales caractéristiques d'un adjuvant de filtration sont les suivantes :

- grande inertie chimique vis-à-vis du liquide à filtrer, dont la qualité ne doit pas être altérée (goût par exemple), en relation avec un degré de pureté élevé (faible teneur en éléments solubles) et un pH neutre ;
- porosité ouverte très importante (supérieure à 75-80 %), dépendant de la taille et de la forme des éléments, afin d'atteindre une perméabilité optimale du gâteau ;
- faible densité (l'adjuvant doit rester en suspension dans le liquide et s'y répartir uniformément), qui conditionne la densité humide du gâteau qui doit être voisine de 0,35 pour les produits activés et de 0,30 pour les produits calcinés ;
- distribution granulométrique la plus resserrée possible : variable de 20 à 80 μ m selon les liquides à filtrer ;
- incompressibilité dans les conditions d'emploi, afin d'assurer la stabilité physique et la perméabilité du gâteau.

Les adjuvants diatomitiques étant notamment utilisés pour la filtration de produits destinés à la consommation humaine (produits alimentaires et pharmaceutiques), les spécifications les plus strictes portent sur leur pureté chimique.

En général, pour les applications en filtration, les adjuvants diatomitiques doivent présenter des teneur en SiO_2 supérieures à 90 % et en fer inférieures à 1,3 %, et être exempts de carbonates. Le fer constitue la principale impureté dans la mesure où il contribue à la création de complexes, réduisant ainsi l'inertie chimique (Industrial Minerals, 1987).

La Pharmacopée contient des spécifications relatives à la composition chimique des produits diatomitiques utilisés comme adjuvants de filtration en oenologie (Delfau, 1979). Les teneurs maximales tolérées en éléments chimiques solubles qui y figurent sont les suivantes :

- produits naturels : As : 5 ppm, Fe : 600 ppm, métaux lourds (Cd, Pb, Hg, Se) : 40 ppm ;
- produits lavés à l'acide : As : 4 ppm, Fe : 200 ppm, métaux lourds : 20 ppm.

Les applications pharmaceutiques et biotechnologiques sont également très exigeantes pour ce qui concerne la pureté chimique des adjuvants de filtration utilisés, notamment pour ce qui est des teneurs en métaux lourds et en autres éléments tels que l'aluminium ($\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 50$ ppb pour les médicaments injectables par exemple), qui, dans certains cas, doivent être rigoureusement absents (Harries-Rees, 1994).

4.3. CHARGES

Dans ce secteur, qui est le deuxième consommateur de diatomite après celui de la filtration, la diatomite intervient en tant que charge active, c'est-à-dire comme un additif fonctionnel qui modifie et améliore les propriétés du produit final.

Les propriétés physiques et chimiques des charges actives sont adaptées aux besoins particuliers de chacune des applications, et de ce fait sont étroitement contrôlées pour répondre à des spécifications rigoureuses, ce qui se traduit par des prix de vente généralement élevés (Breese, 1994).

Bien que de nombreux minéraux puissent être broyés et calibrés pour fournir des charges, les caractéristiques intrinsèques de la diatomite sont bien adaptées, ou peuvent être aisément modifiées, pour cette application.

D'une manière générale, les produits de qualité "charges" sont insolubles et inertes dans la plupart des procédés chimiques ; ils ont à la fois une faible densité en vrac et une granulométrie fine (variant généralement de 1 à 50 μm) et sont constitués de particules de forme et de taille appropriées.

De nombreuses autres propriétés peuvent intervenir pour des applications spécifiques dans le secteur des charges : couleur, surface spécifique, capacité d'absorption de liquide, abrasivité, rigidité des particules, température de fusion et porosité par exemple (Breese, 1994).

Historiquement, les produits de charges diatomitiques ont été développés à partir des fines produites lors de l'élaboration des adjuvants de filtration, qui pouvaient ainsi être valorisées. C'est encore le cas aujourd'hui où la plupart des producteurs de diatomite élaborent des charges issues de différents stades de traitement (séparation des fines en suspension dans l'air à l'aide de filtres à manches, granulométrie variant de 1 à 50 μm en général, cf. § 2.5.)

Les charges diatomitiques (diatomite naturelle, calcinée et activée) entrent dans la composition de nombreux produits : peintures, cires, vernis, laques, résines, polymères, matières plastiques, caoutchoucs et latex, pigments, papiers et cartons, encres d'imprimerie, engrais, insecticides, pesticides, ciments, bétons, enduits, mortiers, plâtres, crépis, allumettes, produits asphaltés et bitumineux, aliments du bétail, produits à polir et nettoyeurs divers, pâtes dentifrices et produits

pour empreintes dentaires, produits pharmaceutiques, explosifs, produits chimiques et catalyseurs.

L'utilisation des charges diatomitiques est prédominante dans les peintures, principalement les peintures décoratives, où elle a pour effet (Industrial Minerals, 1987 ; Breese, 1994 ; Harries-Rees, 1994 ; Harben, 1995) de :

- rendre rugueux le film de peinture (obtention d'un aspect mat) et d'améliorer l'adhérence entre les couches ;
- réduire l'éclat et le brillant de la peinture ;
- l'uniformiser et la stabiliser en facilitant la dispersion de ses composants (pigments, charges et autres agents), d'où un meilleur effet couvrant ;
- optimiser les effets des pigments qui sont des composants à prix élevé ;
- contrôler sa perméabilité à la vapeur, et ainsi de réduire le cloquage et l'écaillage de la peinture ;
- augmenter sa résistance à l'abrasion et à l'usure et sa durabilité ;
- accélérer le séchage en permettant une libération plus rapide du solvant.

Ceci est essentiellement dû à la structure microporeuse de la diatomite (diffusion de la lumière) et à son pouvoir absorbant élevé, qui permet d'obtenir un rapport volume du pigment/volume du liant extrêmement élevé.

Pour cette application, les spécifications portent essentiellement sur les propriétés suivantes :

- granulométrie : diamètre moyen généralement compris entre 3 et 10 μm selon les qualités et les applications (2 % des particules supérieures à 10 μm pour les qualités les plus fines) ;
- blancheur (85 à 90) et brillance ;
- degré de rugosité : entre 6 et 7,5 pour les sous-couches sur l'échelle de Hegmann (allant de 0 à 8 selon une rugosité décroissante) ;
- aptitude à la dispersion et faible densité apparente.

La capacité d'absorption, l'indice de réfraction, le pH et l'inertie chimique sont les autres propriétés à prendre en compte pour le choix d'un produit destiné à cette utilisation.

La consommation de diatomite est en baisse pour cette application. Les fabricants de peintures cherchent à limiter l'usage de la diatomite (dosage de l'ordre de 2-3 % en général) du fait de la présence de silice cristalline (aspect sanitaire) et pour réduire leur coût, d'où une utilisation conjointe de la diatomite avec d'autres charges moins onéreuses telles que le carbonate de calcium et l'argile (Harries-Rees, 1994).

Les charges diatomitiques entrant dans la composition des matières plastiques ont plusieurs fonctions. Dans les films en polyéthylène, du fait de leur structure finement divisée et de leurs propriétés optiques, elles jouent le rôle d'agents antiadhérents. Au cours de la fabrication de ces produits, les particules de diatomite qui y sont incorporées (à raison de 0,05 à 0,5 % en poids) se projettent à travers la surface du plastique, séparent mécaniquement les films adjacents qui ont tendance à adhérer les uns aux autres et préviennent les phénomènes de soudure à froid (Breese, 1994 ; Harries-Rees, 1994).

Dans d'autres matières plastiques, la diatomite est utilisée pour réduire leur coût, améliorer la finition de surface, augmenter la résistance à la chaleur, à l'eau et à l'abrasion, et réduire la résistance au desserrage du moule (Breese, 1994).

L'utilisation des charges diatomitiques (diatomite naturelle ou activée) dans la fabrication des **papiers et cartons** a décliné et ne concerne plus que quelques produits spécialisés (revêtements en papier, papiers décor, papiers à cigarette par exemple).

Elle se traduit par :

- une rétention extrêmement importante des charges (oxyde de titane en particulier) et des fibrilles, d'où une plus grande opacité, une meilleure formation de la feuille, et un épair plus uniforme et plus régulier ;
- une augmentation de la main ;
- une dispersion des impuretés nuisibles à la fabrication du papier, contenues dans certaines pâtes (goudrons, résines, vernis...) ;
- une accélération de l'égouttage et du séchage ;
- une meilleure aptitude à l'impression et au désencrage des vieux papiers.

Dans les **bétons, enduits, mortiers, plâtres et crépis**, la diatomite naturelle est une charge qui peut améliorer les propriétés de plasticité et de durcissement, la cohésion, l'homogénéité et la maniabilité, et réduire le ressuage et les efflorescences (Breese, 1994). Elle augmente par ailleurs l'adhérence et l'étanchéité du béton.

De par sa grande finesse (remplissage des interstices) et son effet pouzzolanique (neutralisation de la chaux libre), elle accroît la résistance des **ciments**, notamment vis-à-vis des eaux agressives (eau de mer, eaux séléniteuses). C'est le cas en particulier de matériaux de type "moler".

La diatomite est également utilisée, dans des proportions allant jusqu'à 40 % du poids du ciment, pour alléger les laits de cimentation de la colonne des puits de pétrole.

Compte tenu de sa structure microporeuse, finement divisée et fragile, et de sa dureté relativement modérée (< 6), la diatomite est un abrasif doux qui a une action de polissage contrôlé. Sous sa forme naturelle, calcinée ou activée, elle entre dans les formulations de différents produits : **pâtes dentifrices, nettoyants divers, produits à polir et à rectifier** différentes matières (outillage chirurgical, carrosseries d'automobiles, métaux dont l'argent, pierres de construction et ornementales, bois,...).

En tant que charge abrasive, la diatomite peut être mélangée à des huiles de paraffine, de l'amidon et d'autres composants, et être utilisée sous forme de poudres ou de gels.

Pour cette application, les caractéristiques primordiales sont la granulométrie, la rugosité (indice de Hegmann > 6 généralement) et l'abrasivité (Industrial Minerals, 1987), et le dosage est de l'ordre de 10 % dans les produits à polir (Harries-Rees, 1994).

Par ailleurs, les charges diatomitiques actives entrent dans la composition des produits suivants (Industrial Minerals, 1987 ; Breese, 1994 ; documentation Société des Silices Fossiles de France et CECA) :

- **résines et polymères** : en tant qu'agent clarifiant qui introduit des couleurs plus claires dans les produits de teinte brun foncé ;
- **caoutchoucs et latex** : en tant qu'agent semi-renforçant qui allège les produits (caoutchoucs synthétiques et naturels), améliore l'état de surface, la dureté et la résistance à l'usure, diminue le prix de revient des mélanges (jusqu'à 20 % de diatomite dans certaines formulations) ; et qui, associé au latex, procure des propriétés de résistance aux acides et de conductibilité à certains produits ;
- **engrais** (engrais complexes et à base de nitrate d'ammonium) : en tant qu'agent antimottant et d'enrobage, qui empêche la reprise en masse des produits granulés par la formation d'une pellicule protectrice autour des grains (dosage : 0,8 à 1 %) ;
- **insecticides** : en tant qu'agent absorbant et antiadhérent, qui empêche l'agglomération des produits (broyage du D.D.T. par exemple), parfois mélangé à d'autres charges telles que le talc ;
- **allumettes** : pour éviter les projections de particules, régulariser la combustion, assurer un dégazement homogène et augmenter le coefficient de frottement, ce qui facilite l'inflammation ;
- **produits asphaltés et bitumineux** : pour absorber les résines des revêtements routiers, améliorer la cohésion, la stabilité aux intempéries, la résistance aux chocs et à la rupture, et diminuer le ressuage et la tendance à la fissuration liée aux brusques variations de température ;
- **aliments du bétail** : en tant que support de vitamines ;
- **explosifs, conteneurs d'acétylène, produits chimiques dangereux** (acides sulfurique et phosphorique) : en tant qu'agent stabilisant dans les produits pulvérulents secs, pour permettre une manipulation et un stockage plus sûrs et plus aisés.

Du fait de sa porosité élevée et de sa structure fine et irrégulière, la diatomite, naturelle en général, constitue un support très efficace pour des produits actifs et diluants tels que les **pesticides**, les **catalyseurs** et certains **nettoyants**.

Le rôle d'un support est de prévenir l'adhérence et le colmatage, et de favoriser l'écoulement libre et le broyage, et les propriétés mises en jeu sont une grande aptitude à la dispersion dans l'eau, une granulométrie fine et uniforme, une porosité élevée et une inertie chimique (Harries-Rees, 1994).

Diverses industries chimiques utilisent la diatomite naturelle comme **support de catalyseurs** constitués de métaux, employés dans des procédés de synthèses industrielles de substances organiques (Harben, 1995) : catalyseurs en nickel (procédés d'hydrogénation en chimie organique), en vanadium (oxydation de l'anhydride sulfureux pour la production d'acide

sulfurique) et catalyseurs en acide phosphorique utilisés dans l'industrie pétrolière (raffinage du pétrole).

Elle est également employée comme support inerte et poreux pour la chromatographie en phase liquide et en phase gazeuse, et, en tant qu'absorbant polaire, en remplissage des colonnes pour la chromatographie de partage (absorption d'eau).

4.4. ABSORBANTS

Compte tenu de leur capacité d'absorption et de leur porosité élevées, et de leur faible densité, les produits diatomitiques constituent des absorbants qui sont utilisés dans différentes applications domestiques et industrielles : litières pour animaux domestiques, absorbants industriels d'huiles et de graisses, nettoyeurs divers, traitement de déchets toxiques, d'eaux et de sols pollués.

Leur emploi en tant que litières pour animaux domestiques requiert une capacité d'absorption des liquides et des odeurs élevée, une granulométrie uniforme et une absence de poussières, et une bonne cohésion à l'état humide (Industrial Minerals, 1987).

L'utilisation des produits diatomitiques naturels pour le traitement de déchets toxiques et de sols pollués est relativement nouvelle. Des recherches ont récemment été menées en Grande-Bretagne sur le traitement *in-situ* de sols contaminés, et en Allemagne et aux Etats-Unis sur l'épaississement de produits liquides toxiques (boues de stations d'épuration par exemple) par adjonction de diatomite, ce qui a pour effet de les transformer en matières subsolides et ainsi de faciliter leur manipulation et leur élimination (European Minerals Yearbook, 1995).

En Grande-Bretagne, la diatomite est utilisée pour la réhabilitation de sites miniers du fait de son aptitude à "contrôler" les métaux contenus dans les sols contaminés. Les métaux résiduels initialement solides sont solubilisés par des processus d'oxydation et/ou de lessivage, et l'acide qui est produit accentue la libération des métaux. Le rôle principal de la diatomite est de tamponner l'acidité et d'éliminer les métaux en solution afin de réduire la contamination des sols et des eaux de surface et d'abaisser la toxicité (Harries-Rees, 1994).

4.5. PRODUITS ISOLANTS ET REFRACTAIRES

La diatomite naturelle et calcinée est employée pour la fabrication de différents types de produits d'isolation thermique et phonique et réfractaires :

- briques isolantes réfractaires ;
- panneaux de construction isolants et ignifuges (élaborés par simple cuisson) ;
- ciments réfractaires de jointoiement et bétons isolants réfractaires ;
- blocs moulés, enduits et poudres de bourrage ;
- briques de diatomite brute crue (obtenues par simple sciage).

Une des utilisations les plus importantes des matériaux diatomitiques de type "moler" est réalisée dans ce secteur pour la production de briques isolantes réfractaires, particulièrement

développée au Danemark. Des mélanges artificiels composés de diatomite et d'argile peuvent également être utilisés.

Ces briques sont fabriquées par cuisson de diatomite argileuse dans un four rotatif, sans additif, et présentent les caractéristiques générales suivantes (Industrial Minerals, 1987 ; Harries-Rees, 1994) :

- densité comprise entre 500 et 880 kg/m³ ;
- résistance à des températures de 900 à 950°C, voire 1 100°C ;
- résistance élevée aux chocs thermiques ;
- faible perméabilité aux gaz ;
- bonne résistance à l'attaque acide ;
- non adhérence vis-à-vis de l'aluminium et d'autres métaux.

Le retrait à la cuisson peut être diminué par ajout de diatomite précalcinée, qui joue le rôle de dégraissant.

Ces briques sont utilisées dans de nombreuses industries : sidérurgie, métallurgie, verreries, cimenteries, industrie céramique, industrie pétrolière, installations de chauffage, incinérateurs, etc.

Par ailleurs, les produits diatomitiques naturels en vrac sont utilisés (CECA et CELITE FRANCE, communications orales) :

- en fonderie, à la surface du bain d'acier en fusion, pour son isolation thermique et son refroidissement régulier, et pour le piégeage des impuretés qui y surnagent ;
- dans l'industrie céramique, pour le refroidissement dirigé et progressif des pièces moulées à haute température (pièces plongées dans un bac rempli de diatomite), qui ne subissent ainsi pas de choc thermique.

4.6. AUTRES SECTEURS D'UTILISATION

La diatomite est utilisée de plus :

- comme matière première (source de silice réactive) pour la fabrication, dans des conditions hydrothermales et en association avec la chaux, de silicates de calcium synthétiques qui sont utilisés comme produits isolants et absorbants ;
- en agriculture et horticulture, pour améliorer les caractéristiques des sols (allègement physique, rétention d'eau), et pour des travaux de revégétalisation.

5. ECONOMIE ET MARCHÉ

5.1. GENERALITES

Une vingtaine de pays dans le monde ont une production significative de diatomite (supérieure à 5 000 t/an) et seules cinq sociétés prédominent nettement sur le marché international.

Les principaux producteurs pratiquent des politiques commerciales distinctes selon qu'elles s'adressent aux marchés nationaux où à l'exportation, en apportant dans tous les cas à l'utilisateur une assistance technique et commerciale intégrée. La capacité de fournir de tels services est principalement due à la connaissance technique des procédés de fabrication et des besoins particuliers des consommateurs, et à l'aptitude à élaborer des produits spécifiques destinés à une large gamme d'applications. Ces services comprennent la fourniture de produits disponibles et fiables (correspondant à des appellations et à des marques) par l'intermédiaire de réseaux commerciaux de distribution présents à l'échelle mondiale, et le développement de produits nouveaux grâce à des structures de Recherche et de Développement.

De nombreux petits producteurs les concurrencent avec succès, par la pratique de prix attractifs, sur des micromarchés locaux dont les besoins sont moins exigeants en terme de qualité et d'assistance technique (Breese, 1994).

En 1988, moins de 20 % de la production mondiale de diatomite faisait l'objet d'un commerce international. Cette substance de faible densité étant handicapée par des coûts de transport élevés, les échanges sont essentiellement interrégionaux, concentrés en Europe de l'Ouest et dans le bassin pacifique (Roskill, 1990).

L'industrie de la diatomite, qui a connu une période faste dans les années 1980 où à la fois la production et les prix ont augmenté, a abordé les années 1990 avec une surcapacité de production et une baisse toujours plus grande des prix moyens aux Etats-Unis (Roskill, 1990).

La consommation mondiale de produits finis diatomitiques, qui est de l'ordre de 500 000 t/an, se répartit en trois principaux marchés (CECA, communication orale) :

- le marché nord-américain, au premier rang (200 à 250 000 t/an), arrivé à maturité ;
- le marché européen (environ 150 000 t/an), stable ou en légère croissance, nettement dominé par les pays de l'Union Européenne et dans lequel réémergent quelques pays d'Europe centrale et orientale ;
- le marché sud-est asiatique (Corée du Sud, Japon et Thaïlande principalement), actuellement au niveau de l'Europe et en forte croissance, ce qui bénéficie pour l'instant essentiellement aux producteurs américains.

Les Etats-Unis sont les premiers producteurs et exportateurs au monde, réalisant 60 % des exportations mondiales en 1988, bien que leurs exportations aient diminué dans les années 1980, passant de 157 000 t de matériaux bruts en 1980 à 137 000 t en 1989, du fait des parts de marché prises par des pays tels que l'Espagne, la Corée du Sud, la France et l'Islande (Roskill, 1990). En 1985, les Etats-Unis ont exporté environ 19 % de leur production dans 77 pays (Industrial Minerals, 1987).

Entre 1980 et 1989 (Roskill, 1990), la consommation de diatomite aux USA a progressé dans le secteur de la filtration (de 66 à 71 %), aux dépens de celui des charges minérales (de 21 à 15 %). Cette évolution s'est ensuite accentuée, ces marchés représentant respectivement 82 et 6 % en 1992 (tabl. 4). Elle s'explique par le fait que la diatomite offre des avantages techniques plus marqués par rapport aux produits concurrents dans le secteur de la filtration que dans celui des charges (Roskill, 1990).

En 1992, le marché américain de la diatomite était arrivé à saturation, en partie du fait des problèmes environnementaux liés à son utilisation en filtration (élimination des adjuvants usagés), d'où l'effort d'implantation des producteurs américains sur le marché européen pour compenser les baisses de consommation aux USA.

En Europe, le marché de la filtration est pourvu par des producteurs locaux qui entrent en concurrence avec les principaux producteurs américains. C'est le cas notamment de la société française CECA qui approvisionne les pays d'Europe occidentale et exporte de façon significative en Europe centrale et orientale.

Au Danemark, les produits de type "moler" sont exportés dans le monde entier par la société SKAMOL, et seulement en Europe par la société DAMOLIN. L'Allemagne en est le principal consommateur dans le secteur de l'alimentation animale. Bien que les marchés des produits de type "moler" restent stables globalement, la demande pour l'alimentation animale a baissé légèrement dans les années 1980 (du fait de la réduction des cheptels dans les élevages européens), tandis qu'augmentait celle pour les absorbants (Industrial Minerals, 1987).

L'Allemagne, qui a arrêté sa production de diatomite en 1994, du fait de l'épuisement des réserves, est le premier importateur mondial (37 400 t en 1984), notamment pour l'élaboration de la bière, suivi par la Grande-Bretagne et les Pays-Bas (Harben, 1995).

En Asie, où le Japon, la Corée du Sud et la Chine assuraient 21 % de la consommation mondiale de diatomite en 1988, l'importance respective des secteurs d'utilisation est différente de celles des USA et de l'Europe. Le marché des charges minérales (notamment pour l'industrie du bâtiment) est plus important au Japon par exemple, pays autosuffisant pour les produits diatomitiques de qualités inférieures et gros importateur pour les autres qualités. Le marché de la filtration des huiles végétales était en expansion en 1988 en Asie, notamment dans les pays de l'ASEAN (Roskill, 1990).

En Afrique, la création de la Zone Préférentielle de Commerce d'Afrique Orientale et Centrale, dans les années 1980, devait permettre d'accroître largement les échanges commerciaux entre états, en particulier les exportations de produits diatomitiques (notamment par la société African Diatomite Industries basée au Kenya). Les principaux secteurs de consommation de diatomite sur le marché kenyan étaient alors la filtration (bière, boissons non alcoolisées, sucre et amidon), les charges (produits en caoutchouc) et l'isolation, et les exportations concernaient presque totalement le secteur de la filtration (Industrial Minerals, 1987).

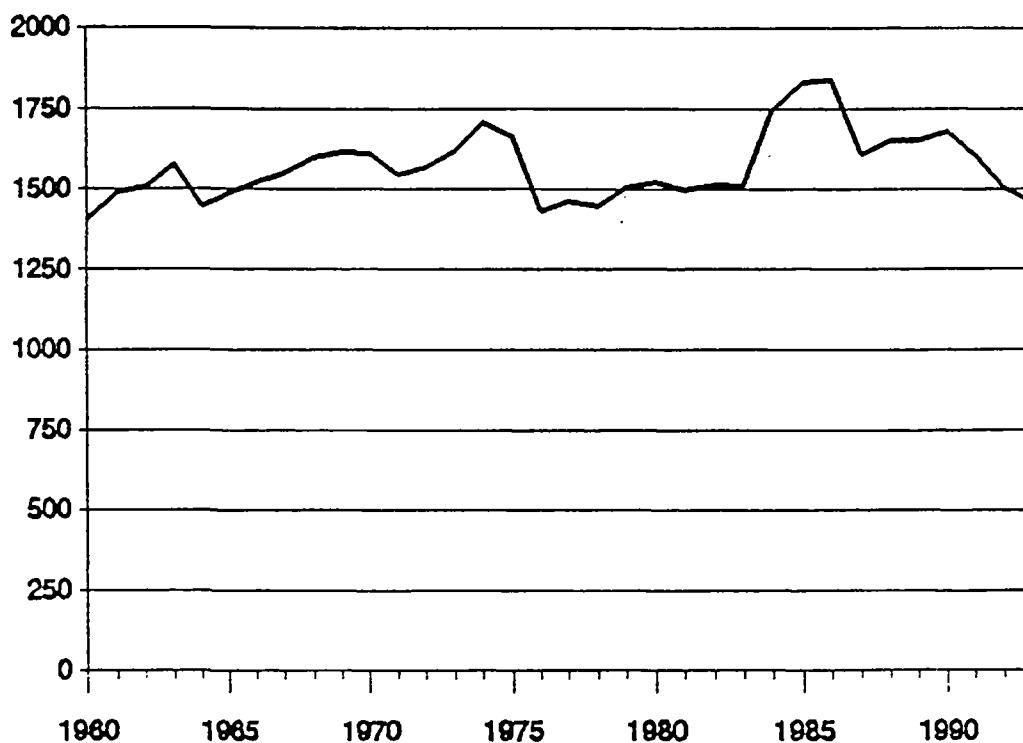
D'après les prévisions, la production et la consommation de diatomite à l'échelle mondiale devraient connaître une augmentation continue et stable de l'ordre de 3 % jusqu'à l'an 2000 (Industrial Minerals, 1987). A plus long terme, la diatomite sera sérieusement concurrencée par des produits principalement synthétiques sur ses marchés traditionnels (filtration et charges essentiellement), considérés aujourd'hui comme matures et stables (cf. § 6).

Pour se maintenir au niveau actuel, l'utilisation de la diatomite devra se diversifier et se développer dans de nouvelles applications actuellement encore peu consommatrices, mais à fort potentiel de croissance. Il s'agit (Harries-Rees, 1994), en premier lieu, des secteurs de la biotechnologie (systèmes de supports de bactéries et d'enzymes), de l'environnement (traitement des déchets toxiques, épuration des eaux) et de la chimie (supports de catalyseurs).

5.2. PRODUCTION MONDIALE

Les estimations relatives à la production mondiale de diatomite brute, toutes qualités confondues, varient selon les sources. D'après :

- European Minerals Yearbook (1995 ; fig. 5), elle était de 1,4 Mt en 1960 et est restée comprise entre 1,4 et 1,7 Mt/an jusqu'en 1993, à l'exception de la période 1984-1986 pendant laquelle elle était légèrement supérieure (1,75 à 1,84 Mt/an) ;
- R.O.Y. Breese (1994), elle était, à de rares exceptions près, en lente augmentation entre 1980 et 1990, atteignant un maximum de 1,87 Mt en 1988, pour revenir à un niveau de 1,84 Mt en 1990 ;
- Roskill (1990), cette production était de 2,15 Mt en 1986 et de 2,13 Mt en 1988.



Données en milliers de tonnes de matériaux bruts.

Fig. 5 - Evolution de la production mondiale de diatomite entre 1960 et 1993 (d'après European Minerals Yearbook, 1995).

Sur la base des données les plus récentes publiées, relatives aux vingt principaux producteurs mondiaux (tabl. 5, fig. 6) et aux producteurs de moindre importance, la production mondiale de diatomite brute semble se situer, ces dernières années, en deçà de 2 Mt/an, aux alentours de 1,8 Mt/an.

PAYS	PRODUCTION ANNUELLE DE DIATOMITE BRUTE (x 1000 t)	ANNEE	SOURCE
Etats-Unis	599	1993	1
France	230	1994	2
Japon	205	1988	3
ex-URSS	150	1993	1
Chine	100	1993	1
Danemark	96*	1993	1
Corée du Sud	75	1993	1
Espagne	50	1994	4
Mexique	47	1993	1
Roumanie	40	1992	5
Italie	25	1993	1
Pérou	25	1992	5
Islande	19	1993	1
Brésil	15	1992	5
Australie	11	1992	5
Thaïlande	10	1992	5
Costa Rica	10	1992	5
Hongrie	8	1993	5
Argentine	7	1992	5
Chili	6	1992	5

*dont moler : 95 et diatomite : 1.

Sources des données : 1 : European Minerals Yearbook, 1995 ; 2 : Enquête BRGM, 1995 ; 3 : Roskill, 1990 ; 4 : Regueiro *et al.*, 1995 ; 5 : Harries-Rees, 1994.

Tabl. 5 - Principales productions nationales de diatomite.

La production mondiale de diatomite (tabl. 5) est nettement dominée par les Etats-Unis dont la production annuelle avoisinait 600 000 t en 1993 (soit environ 1/3 de la production mondiale) et dont la capacité de production était estimée à environ 1 Mt en 1989 (Roskill, 1990).

Les Etats-Unis sont suivis par la France, le Japon, les pays de l'ex-URSS, la Chine, le Danemark, la Corée du Sud et l'Espagne, pays produisant annuellement de 230 000 à 50 000 t de diatomite brute (tabl. 5, fig. 6).

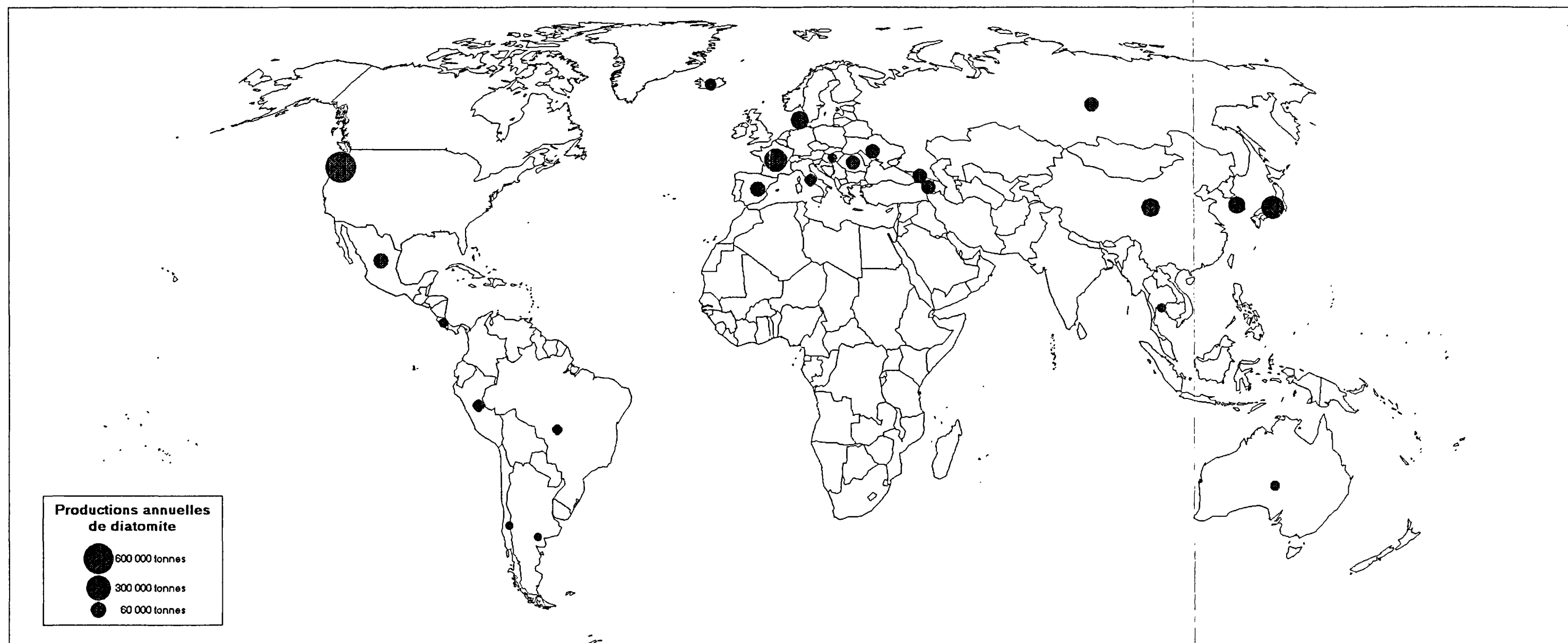


Fig. 6 - Principaux pays producteurs de diatomite.

De nombreux autres pays affichent de faibles productions, comprises entre moins de 1 000 et 5 000 t/an, non répertoriées dans le tableau 5 :

- en Europe : République tchèque, Portugal, Yougoslavie et Grande-Bretagne ;
- en Afrique : Algérie, Kenya, Maroc, Mozambique, Egypte, Afrique du Sud et Nigéria ;
- en Asie : Turquie, Philippines et Inde ;
- en Amérique : Canada et Colombie ;
- en Océanie : Nouvelle-Zélande.

Les Etats-Unis, premier producteur et exportateur mondial de diatomite, assurent une production à partir de quatre états de l'Ouest (Californie, Nevada, Oregon, Washington) où opèrent huit sociétés. Parmi celles-ci, Celite Corporation (anciennement Manville Sales Corp.), filiale du groupe World Minerals Inc. (lui-même filiale de Alleghany International), est le premier groupe industriel producteur de diatomite au monde. Il est implanté sur trois continents (USA, Mexique, Chili, France, Espagne, Islande, Chine) et sa capacité totale de production est de l'ordre de 500 000 t/an de diatomite brute.

La France est le premier producteur européen, devant l'ex-URSS (républiques d'Arménie, de Géorgie, de Russie et d'Ukraine), le Danemark, l'Espagne, la Roumanie et l'Italie (tabl. 5). Ces productions sont très différentes au niveau qualitatif : adjuvants de filtration et charges sont essentiellement élaborés en France ; produits isolants réfractaires pour l'industrie du bâtiment et supports divers dans les états de l'ex-URSS (peu d'informations communiquées sur ces productions) et en Roumanie ; produits à base de moler au Danemark et produits divers en Espagne et en Italie (tabl. 6).

La production européenne de diatomite a récemment été marquée par :

- la fermeture, en 1994, du seul gisement allemand (Basse Saxe) et du gisement français de La Bade/Collandres (Cantal), pour cause d'épuisement des réserves ;
- l'arrêt de la production, toujours en 1994, du gisement espagnol exploité par la société Alarcón Palacios dans la province d'Albacete, ce qui s'est traduit par une baisse importante de la production de ce pays (110 000 t en 1992 contre 50 000 t en 1994) ;
- la diminution apparente importante de la production des pays de l'ex-URSS (250 000 t en 1990 contre 150 000 t en 1993) et de la Roumanie (250 000 t en 1990 contre 40 000 t en 1992), à priori pour des raisons liées à la situation économique générale de ces pays.

La diatomite a été exploitée par le passé en Bulgarie (région de Blagoevgrad), ce qui ne semble plus le cas actuellement.

Les informations générales (localisation, société exploitante, type de matériaux et secteurs d'utilisation) relatives aux principaux gisements de diatomite exploités dans le monde sont consignées dans le tableau 6.

PAYS	REGION	LOCALITE	SOCIETE	TYPE DE MATERIAUX / UTILISATIONS	
Algérie	Oranie	Sig	E.N.P.M.N.F.S.U.	diatomite carbonatée / ciments, filtration	
Argentine	Province de Rio Negro		Cia Minera Agregados Calcareos SA	charges, filtration, industrie pétrolière	
			- MINACLAR SA - TIACFIL SA - TERRADEC SA	diatomite argileuse, traitée à l'acide et calcinée	
Australie	New South Wales	Bells Mountain	Australian Diatomite Mining Pty Ltd	litières pour animaux domestiques, absorbants (déchets industriels)	
	Victoria	Lillicur	Commercial Minerals Ltd	hors filtration, produits réfractaires	
	Western Australia	Badgingarra	Mallina Holdings Ltd	diatomite naturelle, calcinée et activée / filtration, charges	
Brésil	Etat de Ceara		Minérois Ouro Branco Ltda	filtration, charges	
	Etat de Bahia	Mucugê et Ibicoara	CIEMIL	diatomite naturelle, calcinée et activée / filtration, charges	
Canada	Colombie Britannique	Quesnel	Clayburn Industries Ltd	diatomite impure / absorbants, charges, supports, briques réfractaires isolantes	
Chili	partie nord	Arica	- DIACTIV SA - CELITE CORP.	diatomite calcinée / filtration, charges	
Chine	Province de Jilin	Changbai et Huenjiang	- Huadian Diatomite Development and Sales Co. - Jilin Dunhua Diatomite Mine - Jilin Linjiang Forestry Administration	SiO ₂ : 85 %	isolation et filtration
	Province du Yunnan	Xundian	Yunnan Science and Technology Enterprise Group Co.		
	Province de Zhejiang	Chenxian	Zhejiang Shengxian Minerals Industry Co.		
Corée du Sud	Huenghae, Kyongsangbuk	Pohang		charges et filtration notamment	
	Yangbuk, Kyongsangbuk	Wolsung			
Danemark	Ile de Fuur	Limfjorden	DAMOLIN A/S	moler séché, calciné / poudres pour : alimentation animale, filtration, supports, traitement de l'acide, ciments, pesticides, fertilisants, isolation ; granules pour : litières pour chats, absorbants industriels, isolation des coulées de métaux, épuration des eaux, pesticides	
	Iles de Mors et de Fuur, région de Salling		SKAMOL A/S	moler / briques isolantes (Fuur) ; granules pour : litières pour chats, absorbants d'huiles et de graisses, isolation des coulées de métaux, supports de pesticides (Mors)	
Espagne	Province d'Albacete	Elche de la Sierra (Cantera Portela)	CELITE HISPÁNICA SA	diatomite très pure / charges, filtration	
		près de Hellín	Minas Volcan SA/ Ruiz Moral SA	diatomite très blanche (SiO ₂ : 85 %) / ciments principalement	
		Rio Segura / Hellín	CEKESA	SiO ₂ : 60 à 65 % / ciments, fertilisants, supports de catalyseurs	
	Province d'Almeria	Nijar	Minas Volcan SA / Ruiz Moral SA	SiO ₂ : 95 % / isolation thermique, charges	
	Province de Jaén	Martos	PROFIQUISA	diatomite impure / briques isolantes	

Tabl. 6 - Principaux gisements de diatomite exploités dans le monde.

PAYS	REGION	LOCALITE	SOCIETE	TYPE DE MATERIAUX / UTILISATIONS	
Etats-Unis	Californie : Santa Barbara County	Santa Ynez Mountains, Lompoc	- CELITE CORPORATION - GREFCO INC.	filtration, charges	
	Californie : Shasta County	Lake Britton/Burney	- AMERICAN RESOURCES - GREFCO INC.	filtration, industrie cimentière	
	Californie	Herlong	Lassinite Industry		
	Nevada	Basalt	GREFCO INC.	diatomite naturelle uniquement / charges	
		Clark Station et Lovelock	Eagle Picher Industries Inc.	diatomite naturelle / filtration, charges	
		Fernley (Est de Marino)	CR Minerals Corp.	diatomite naturelle uniquement / charges, agriculture	
		Nord de Fernley	Moltan Company		
	Oregon : Malheur County	Vale	Eagle Picher Industries Inc.	filtration, charges	
Oregon : Lake County	Christmas Valley	Oil-Dri of America Corp.	filtration, absorbants (dont litières pour chats), agriculture		
	Washington : Grant County	Quincy	CELITE CORPORATION	diatomite activée / filtration	
France	Département de l'Ardèche	Montagne d'Andance/Saint-Bauzile	CECA	diatomite naturelle, calcinée et activée / filtration, charges, supports de catalyseurs, isolation, agriculture, environnement, absorbants	
	Département du Cantal	Virargues/Murat	- CECA - CELITE FRANCE		
Hongrie	Tukaj Mountains	Erdobénye	Hungarian Ore and Mineral Co.	diatomite naturelle et calcinée / produits réfractaires, absorbants, agriculture (supports)	
	Mátra Mountains	Szürdökpüspöki	Buda Brick Industrial Co.	diatomite brute / produits réfractaires	
Islande		Reykjahlid	Icelandic Diatomite	diatomite calcinée et activée / charges, filtration	
		Lake Myvatn	Kisilidjan HF		
Italie	Province de Viterbo	Castiglione in Teverina	DIATOM SpA	diatomite naturelle et calcinée / filtration, isolation, absorbants	
Japon	Honshu		Showa Chemical Industry Co.	diatomite naturelle et calcinée / industrie du bâtiment, peu pour filtration	
	Hokkaido		Chuo Silica		
	Kyushu		Hokushu Keisodo		
Kenya	Kariandus	Soysambu	African Diatomite Industries Ltd	diatomite naturelle et calcinée / filtration, charges, isolation	
Maroc	Khemifra	Awinat	Morocco Minerals Co.	filtration de boissons (filtres couches)	
Mexique	Jalisco	San Nicolas/Zacoalco de Torres	Celite Mexico	diatomite très pure et très blanche / charges, filtration (plaques filtrantes)	
Pérou	Puira	Bayóvar	plusieurs sociétés dont Agregados Calcareos SA	SiO ₂ : 68 %	différentes utilisations hors filtration
	Ica	Pisco			
	Arequipa	Tarucani			
	Ayacucho	Quicapata		SiO ₂ ≈ 90 %	
Roumanie	Arad	Minis	COMINEX	diatomite argileuse brute et broyée / briques isolantes, supports de pesticides, métallurgie	
	Constanta	Adamclisi	DOBROMIN	diatomite broyée / engrais chimiques ; mélange diatomite-bentonite/étanchéité, nourriture animale, filtration (vin)	
	Buzau	Patîrlagele		industrie du bâtiment, dont fabrication du verre (source de silice alternative)	
Turquie	Région d'Ankara		Türkiye Seker Fabrikaları AS	filtration (sirop de sucre)	

Sources des données : Industrial Minerals, 1987 ; Regueiro *et al.*, 1991 ; Griffiths, 1992 ; Dublanc *et al.*, 1993 ; O'Driscoll, 1993 ; Breese, 1994 ; Harries-Rees, 1994 ; Le Berre *et al.*, 1994 ; O'Driscoll, 1994 ; European Minerals Yearbook, 1995 ; Griffiths, 1995 ; Regueiro *et al.*, 1995 ; enquête BRGM, 1995.

Tabl. 6 - Principaux gisements de diatomite exploités dans le monde (suite).

Des gisements de diatomite d'intérêt économique potentiel, encore inexploités, ont été identifiés dans de nombreux pays et régions du monde :

- en Europe :

- . Allemagne : Bavière,
- . Grèce (Stamatakis et Tsipoura-Vlachou 1990) : îles de Samos (bassin de Mytilinii), de Crète (bassins de Heraklion et de Kastellion) et de Zakynthos,
- . Pologne ;

- en Afrique :

- . Angola,
- . Djibouti,
- . Ethiopie,
- . Niger,
- . Ouganda : Nebbi District,
- . Tanzanie,
- . Tchad,
- . Zimbabwe ;

- en Amérique du Sud :

- . Argentine (Dublanc *et al.*, 1993) : provinces de Salta et de Catamarca,
- . Equateur,
- . Vénézuéla ;

- aux Etats-Unis (Breese, 1994) : dans les quatre états où des exploitations sont en activité, ainsi que dans ceux de l'Idaho, de l'Utah, du New Hampshire, de New-York et de Floride ;

- en Asie :

- . Turquie,
- . Indonésie,
- . Philippines,
- . Vietnam,
- . Corée du Sud,
- . Chine.

Des campagnes de prospection de gisements ont récemment été menées aux Etats-Unis (partie occidentale), en Hongrie, en Turquie, en Australie, en Indonésie, au Chili et au Mexique.

Les plus grandes réserves mondiales de diatomite, totalisant 300 Mt, ont été découvertes en 1990 en Chine, dans la province de Guangdong, ce qui augmente d'autant les réserves prouvées jusqu'alors à l'échelle mondiale (2 300 Mt) et permettrait de satisfaire, sur les bases actuelles de la consommation, la demande pour plus d'un millier d'années (Roskill, 1990).

5.3. PRODUCTION FRANCAISE

La production française de diatomite est réalisée par deux sociétés (cf. § 2.4.1.) :

- CECA, filiale d'Elf Atochem, qui possède deux usines à Saint-Bauzile (Ardèche) et à Riom-ès-Montagnes (Cantal), approvisionnées respectivement par les gisements de la Montagne d'Andance et de Virargues/Foufouilloux ;
- CELITE FRANCE, filiale du groupe américain Celite Corporation, dont l'usine, basée à Murat (Cantal), est alimentée par le gisement proche de Virargues/Foufouilloux.

Cette production est restée stable depuis 1985-1986, aux alentours de 230 000-250 000 t/an de matériaux bruts.

D'après notre enquête, la production française de diatomite brute (quantité de matériaux extraits en carrières) a été de 228 000 t en 1994, ce qui correspond, compte tenu de la perte de masse (de l'ordre de 60 à 70 %, liée à la présence d'eau et de matière organique) lors du traitement thermique (séchage, calcination) des matériaux, à environ 86 500 t de produits finis (sortie usine).

Cette même année 1994, les ventes de produits diatomitiques s'élevaient à 81 500 t et étaient ainsi réparties :

- | | |
|-----------------------------|------------|
| - diatomite naturelle | : 2,9 % ; |
| - coproduits de fabrication | : 10,4 % ; |
| - diatomite calcinée | : 32,6 % ; |
| - diatomite activée | : 54,0 %. |

5.4. EXPORTATIONS - IMPORTATIONS - CONSOMMATION FRANCAISE APPARENTE

D'après la nomenclature douanière en vigueur en France et dans la plupart des principaux pays qui font le commerce de diatomite, les produits diatomitiques correspondent à différentes positions.

La position n° 25-12 intitulée : "Farines siliceuses fossiles (kieselguhr, tripolite, diatomite, par exemple) et autres terres siliceuses analogues, d'une densité apparente n'excédant pas 1, même calcinées", intègre la terre de moler (ou moler), la diatomite naturelle et la diatomite épurée par calcination simple (sans addition d'autres matières) ou par lavage à l'acide. Elle ne prend pas en compte :

- le tripoli, produit utilisé comme abrasif doux ou pour le polissage, qui relève du n° 25-13 ;
- les blocs sciés de diatomite qui correspondent aux n° 68-06 s'ils sont crus, ou au n° 69-01 s'ils ont été cuits ;
- la diatomite activée (calcinée en présence d'agents frittants) qui relève, ainsi que d'autres produits non diatomitiques, de la position n° 38-02 ("produits divers des industries chimiques").

Il n'est donc pas possible par ce biais de connaître dans leur ensemble les exportations et importations de diatomite, ni leur répartition en fonction du type de produits (diatomite naturelle, calcinée et activée).

Les exportations françaises de diatomite naturelle et calcinée (tabl. 7), qui s'élevaient en 1994 à 31 349 t, étaient pour plus de 80 % destinées aux pays européens voisins : Allemagne, Italie, Bénélux, Royaume-Uni, Espagne et Autriche.

Les importations de ces mêmes produits en 1994 étaient de 11 717 t (tabl. 7) et provenaient presque totalement de quatre pays : Etats-Unis (34 %), Espagne (22 %), Allemagne (21 %) et Danemark (17 %, produits de type "moler").

PAYS	EXPORTATIONS		IMPORTATIONS	
	Quantités (t)	Valeurs (kF)	Quantités (t)	Valeurs (kF)
Belgique + Luxembourg	2 978	4 853		
Pays-Bas	2 377	2 521		
Allemagne	8 417	20 062	2 518	6 663
Italie	5 053	8 385		
Royaume-Uni	2 537	5 407		
Espagne	2 351	6 721	2 607	6 406
Autriche	2 124	5 076		
Danemark			1 976	3 447
Etats-Unis			4 013	7 841
Autres	5 512	17 965	603	1 954
Total	31 349	70 990	11 717	26 311

Source des données : statistiques du Commerce Extérieur.

Tabl. 7 - Exportations et importations françaises de diatomite naturelle et calcinée en 1994.

Le solde de ces échanges était positif pour notre pays en 1994 en terme de quantité (+ 19 632 t) et de valeur marchande (+ 44,679 MF).

Bien que la France soit un important producteur de diatomite, elle importe majoritairement des produits des Etats-Unis, qualitativement comparables aux produits français, pour différentes raisons qui se trouvent conjuguées : politique commerciale des firmes américaines très active, coûts de production inférieurs aux USA (usines de plus grande taille, main-d'oeuvre et énergie moins chères), taux de change pénalisant la France, coût peu élevé du frêt maritime (surtout depuis la Californie).

D'après notre enquête, les échanges commerciaux concernant l'ensemble des produits diatomitiques se répartissaient ainsi en 1994 :

- exportations : . produits naturels et calcinés : 31 300 t ;
 . produits activés : 24 700 t ;
- importations : . produits naturels et calcinés : 11 700 t ;
 . produits activés : 15 500 t.

En 1994, les exportations françaises s'élevaient donc à 56 000 t, ce qui représentait 69 % des ventes, et les importations à 27 200 t, ce qui se traduisait par un solde positif des échanges de 28 800 t.

Si l'on considère les chiffres globaux relatifs aux ventes, importations et exportations françaises, on aboutit à une consommation apparente de 52 700 t en 1994, dont 66 % correspondent à des produits activés et 34 % à des produits diatomitiques autres (naturels, calcinés et coproduits de fabrication).

Il apparaît donc que la France, troisième exportateur mondial (après les Etats-Unis et le Danemark), exporte plus de diatomite qu'elle n'en consomme.

En 1994, la répartition de la consommation française de diatomite par secteurs d'utilisation s'établissait approximativement ainsi (CECA, communication orale) :

- 70 % pour la filtration : essentiellement adjuvants utilisés, par ordre d'importance décroissante, pour la filtration du glucose (environ 10 000 t/an), du vin (6 à 7 000 t/an), de la bière (4,5 à 5 000 t/an) et des huiles alimentaires (environ 1 500 t/an) ;
- 15 % pour les absorbants, industriels principalement ;
- 10 % pour les charges, essentiellement pour les peintures ;
- 5 % pour les autres secteurs : engrais, isolation, alimentation animale, etc.

5.5. PRIX

Aux Etats-Unis, les coûts de production se répartissent approximativement ainsi (Industrial Minerals, 1987) :

- extraction : 10 %,
- traitement : 60 %,
- emballage et expédition : 30 %.

L'énergie est le poste de dépense le plus important, représentant de 25 à 30 % du total des coûts directs. Le traitement (séchage et calcination notamment) en est le principal consommateur.

La diatomite est une substance de faible densité en vrac dont les coûts de transport à la tonne sont plus élevés que pour la plupart des autres produits minéraux. Le transport représente une part très significative du prix global des produits rendus chez l'utilisateur.

Les coûts de transport en Europe ont fait augmenter la concurrence entre les producteurs américains et européens. En 1987, en raison des taux de change, les coûts de transport de la diatomite par bateau entre les USA et l'Europe étaient d'environ 60 % inférieurs à ceux entre la

France et les autres pays européens (Industrial Minerals, 1987). Les producteurs américains ont su tirer parti de cette situation et, à partir de 1986, les importations en provenance des USA ont entraîné, sur le marché européen et notamment français, une baisse des prix de l'ordre de 25-30 %. A court terme, l'intégration des pays d'Europe de l'Est dans le marché mondial et la mise en production des gisements chinois à une grande échelle pourraient provoquer également une baisse des prix.

D'une manière générale, les prix moyens de la diatomite sur le continent américain sont plus bas qu'en Europe de l'Ouest, et ils sont les plus élevés en Asie compte tenu des hauts niveaux d'importation (Roskill, 1990).

En Europe, les prix varient en fonction des zones géographiques et des marchés (CECA, communication orale). A titre d'exemple, les prix des agents filtrants sont plus élevés en Allemagne du fait de l'existence de réseaux intermédiaires de distribution, qu'en Belgique et aux Pays-Bas, pays qui abritent les principaux ports marchands dans lesquels arrivent les produits importés des USA. Les niveaux de prix pratiqués sont également différents selon que les produits sont destinés aux brasseries ou à des industries par exemple.

Aux Etats-Unis, les prix sont dictés par l'utilisation finale et, en 1987, la différence de prix entre les adjuvants de filtration de bas de gamme et de qualité supérieure était de l'ordre de 1/3. En France, les prix des adjuvants de filtration calcinés et activés sont sensiblement identiques à l'heure actuelle.

Comme c'est le cas de nombreux produits, les prix des produits diatomitiques varient en fonction de différents paramètres parmi lesquels : les quantités, les types de conditionnement, la qualité des produits, l'utilisation finale, les modes de transport, l'origine. De ce fait, les prix fournis ci-après, relatifs aux produits américains et européens, sont purement indicatifs (tabl. 8, 9, 10 et 11).

Les charges sont des produits qui peuvent être fortement valorisés pour des applications très spécifiques, leur prix pouvant alors atteindre 20 000 F/t.

D'après les statistiques du Commerce Extérieur de la France (cf. tabl. 7), la valeur marchande moyenne de la diatomite (naturelle et calcinée) importée et exportée était respectivement de 2 246 F/t et de 2 265 F/t en 1994.

TYPE DE PRODUIT	PRIX* (US\$/t)
Adjuvants de filtration calcinés	360
Adjuvants de filtration	262
Charges (peintures, ...)	287
Supports d'insecticides	230-300
Additifs pour béton	180-200
Isolation	153
Qualités extrafines	1350

* prix FOB usine

Tabl. 8 - Prix des produits diatomitiques aux USA en 1993 (d'après Harben, 1995).

	Pays d'origine ou de destination	Prix* (ECU/t)
EXPORTATIONS	Danemark (moler)	229
	France	456
IMPORTATIONS	Islande	353
	USA	303

* prix moyens, toutes qualités confondues.

Tabl. 9 - Prix des produits diatomitiques en provenance ou à destination de l'Union Européenne en 1993 (d'après European Minerals Yearbook, 1995).

TYPE DE PRODUIT	PRIX * (£/t)
Adjuvants de filtration calcinés	370-410
Adjuvants de filtration activés	380-420

* prix CIF - Source : Industrial Minerals, décembre 1995

Tabl. 10 - Prix des agents filtrants américains importés en Grande-Bretagne en 1995.

TYPE DE PRODUIT	PRIX (FF/t)
Adjuvants de filtration (calcinés ou activés)	2 500 - 4 000
Charges pour usages courants	3 000 - 5 000
Produits naturels pour refroidissement de pièces de fonderie	2 000

Sources : CECA et CELITE FRANCE (communications orales).

Tabl. 11 - Prix de quelques produits diatomitiques élaborés et vendus en France en 1995.

6. PRODUITS DE SUBSTITUTION

La nature et l'importance des produits concurrents de la diatomite varient en fonction des secteurs d'utilisation.

L'aspect sanitaire lié à son utilisation (présence de silice libre cristalline dans les produits diatomitiques calcinés et activés) n'a eu jusqu'à présent qu'un impact réduit sur les marchés où elle est bien implantée (filtration et charges principalement).

Cependant, de nombreux utilisateurs recherchent activement des produits de substitution à la diatomite, du fait de cet aspect sanitaire, mais également pour des raisons liées aux problèmes d'élimination des produits après utilisation (adjuvants de filtration), au prix qui est parfois trop élevé, à la présence d'impuretés, à la durabilité et à la facilité d'approvisionnement (proximité, disponibilité).

Du fait de leurs caractéristiques, les adjuvants diatomitiques jouent un rôle de toute première importance dans la **filtration** des liquides alimentaires, grâce notamment à leur pouvoir clarifiant, pour l'élaboration de la bière et du vin par exemple.

La diatomite, qui pourvoit à une large gamme d'applications, n'est encore que peu concurrencée, dans le secteur de la filtration, par des produits naturels et synthétiques (perlite, cellulose et charbon actif principalement) ou par des techniques ne faisant pas appel aux adjuvants.

La perlite expansée est un agent filtrant moins spécialisé que la diatomite, utilisé dans un nombre plus limité de cas, quand la clarification des liquides n'est pas recherchée (glucose et jus de fruits par exemple). Elle n'est donc pas à considérer à proprement parler comme un substitut à la diatomite, mais surtout comme un produit aux propriétés différentes et complémentaires. D'ailleurs, les principaux producteurs mondiaux de diatomite produisent également de la perlite expansée, utilisée par ailleurs comme charge et comme produit isolant.

L'emploi de la cellulose reste marginal (pour la filtration de produits pharmaceutiques par exemple, pour des raisons de pureté chimique) car trop onéreux, du fait de son prix d'achat et des coûts d'incinération des rejets.

Les caractéristiques comparées des principaux adjuvants de filtration couramment utilisés sont consignées dans le tableau 12.

Les techniques de type filtration tangentielle et membranaire sur membranes synthétiques, microporeuses, polymériques (nylon, cellulose), céramiques ou à base de charbon actif, et l'ultrafiltration ont fait l'objet de nombreuses recherches ces vingt dernières années.

Ces membranes sont plus durables et d'emploi plus facile que les procédés avec adjuvants, les systèmes de précouches de filtration nécessitant une maintenance (nettoyage et réinstallation des couches) et une élimination des produits après utilisation. A ce jour, ces techniques se révèlent encore trop coûteuses pour concurrencer réellement la diatomite, compte tenu notamment des investissements lourds qu'elles impliquent, et ne sont toujours pas transposables à une échelle industrielle.

PRODUITS	AVANTAGES	INCONVENIENTS
Diatomite	- Vaste gamme de granulométries. - Teneur en fines pouvant être réduite par calcination.	- Légèrement soluble dans les acides dilués et les solutions alcalines.
Perlite expansée	- Vaste gamme de granulométries. - Rétention de particules aussi fines qu'avec la diatomite. - Densité en vrac inférieure à celle de la diatomite (0,045-0,090 contre 0,12-0,19).	- Plus soluble que la diatomite dans les acides et les solutions alcalines. - Peut donner des gâteaux fortement compressibles.
Cellulose	- Utilisée principalement comme une précouche grossière. - Haute pureté et excellente inertie chimique. - Insoluble dans les acides dilués.	- Prix élevé. - Légèrement soluble dans les solutions alcalines diluées et fortes.
Charbon actif/ anthracite	- Utilisable pour filtrer des solutions très fortement alcalines.	- Disponible seulement dans des granulométries grossières. - Prix élevé.

Tabl. 12 - Caractéristiques comparées des principaux adjuvants de filtration (d'après Harben, 1995).

L'avenir de l'utilisation de la diatomite en filtration ne paraît donc pas menacé à court terme, mais il pourrait l'être à plus longue échéance quand les travaux de recherche relatifs à ces techniques permettront d'en améliorer les performances (augmentation des débits de filtration et de leur longévité) et surtout d'en abaisser le coût.

Le recours à ces techniques pourrait également être favorisé par l'évolution des législations en matière de santé et d'environnement, qui pourraient imposer des contraintes supplémentaires pour l'élimination des adjuvants diatomitiques usagés (mise en décharge de plus en plus onéreuse), voire des interdictions de leur emploi (Harries-Rees, 1994).

Certains utilisateurs diminuent la consommation de diatomite par le recours à la centrifugation, en amont de la filtration avec diatomite. Mais ceci n'est possible que dans les très grandes unités de production de bière et de vin.

La filtration des eaux fait de préférence appel, en général, à des produits tels que le sable siliceux, l'argile et le schiste expansés, l'anthracite, la zéolite naturelle, la perlite et les filtres artificiels, plutôt qu'à la diatomite, encore utilisée pour la filtration des eaux de piscine aux Etats-Unis.

Dans le secteur des charges, la diatomite fait l'objet d'une concurrence beaucoup plus importante de la part de nombreux produits minéraux, naturels et synthétiques, toutefois variable selon les cas. Le talc, le carbonate de calcium, le kaolin, le sable siliceux, le mica, la perlite et les charges synthétiques ou chimiquement modifiées sont ses principaux concurrents dans ce secteur.

A titre d'exemple, les USA et le Canada ont consommé, en 1988, 4 670 000 t de charges minérales dans l'industrie papetière, dont seulement 3 000 t de diatomite (Roskill, 1990). Pour la fabrication de matières en caoutchouc, la diatomite se révèle une charge plus performante que le carbonate de calcium, le kaolin ou la barytine. Les charges abrasives des pâtes dentifrices sont le plus souvent à base de carbonate de calcium, de phosphate dicalcique, de silice précipitée et d'alumine.

Les principaux produits de substitution à la diatomite dans les autres secteurs d'utilisation sont les suivants :

- supports de pesticides : silices synthétiques, kaolin ;
- absorbants : bentonite, attapulgite et sépiolite, zéolites naturelles ;
- isolation thermique : briques à base d'argiles, laines de roche et de verre, perlite expansée, vermiculite exfoliée, polystyrène ;
- traitement des sols contaminés : zéolites naturelles.

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BERTON Y. et LE BERRE P. (1983) - Diatomite - Guide de prospection des matériaux de carrière. Ed. BRGM, collection Manuels et Méthodes, 5, pp. 95-98.

BREESE R.O.Y. (1994) - Diatomite. Industrial Minerals and Rocks, 6th edition, Littleton, pp. 397-412.

CHAMPREUX F. et EUVRARD J.F. (1993) - CECA : la diatomite de Saint-Bauzile. Mines et Carrières, août-septembre 1993, pp. 94-98.

CHAMPREUX F. et SERIEYSSOL K. (1986) - Une spécialité auvergnate peu connue : la diatomite. Les richesses du sous-sol en Auvergne et Limousin, ville d'Aurillac, pp. 226-236.

DELFAU M. (1979) - Diatomite - Mémento substances utiles (matériaux de carrière). Rap. BRGM 79 SGN 158 MTX, 19 p., annexes.

DUBLANC E.A., MALCA D.A. and PEREZ LEALE A. (1993) - Industrial minerals of Argentina. Looking for investment. Industrial Minerals, September 1993, pp. 25-36.

EUROPEAN MINERALS YEARBOOK (1995) - Diatomite. European Communities, first edition, London, pp. 200-205.

GABORIAU H. et MOURON R. (1992) - Etude du marché des diatomites comme agent de filtration. Rap. BRGM R 36330, 40 p., annexes.

GOËR de HERVE A. (de) et TEMPIER P. (1988) - Notice explicative de la feuille Saint-Flour à 1/50 000. Carte géologique de la France, Editions BRGM, 92 p.

GRIFFITHS J. (1992) - Australia's white minerals. Finding more exports. Industrial Minerals, July 1992, pp. 55-57.

GRIFFITHS J.B. (1995) - Chinese Minerals Directory. Industrial Minerals Information Ltd, Surrey, 254 p.

HARBEN P.W. (1995) - Diatomite. The Industrial Minerals HandyBook, second edition, A Guide to Markets, Specifications and Prices, London, pp. 57-61.

HARRIES-REES K. (1994) - Diatomite. Stability under threat ? Industrial Minerals, April 1994, pp. 31-43.

INDUSTRIAL MINERALS (1987) - Diatomite. No skeletons in the cupboard. May 1987, pp. 22-39.

ISKANDAR D. (1988) - La diatomite miocène de la Montagne d'Andance. Carrière de Saint-Bauzile (Ardèche, France). Etude palynologique. Ecostratigraphie. Paléoclimatologie. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard-Lyon I, 164 p., annexes.

- JEAMBRUN M. (1977) - La diatomite dans le Massif central français. Gîtologie et principes de recherches. Rap. BRGM 77 SGN 263 MCE, 42 p.
- KADEY F.L. Jr. (1975) - Diatomite. Industrial Minerals and Rocks, fourth edition, New-York, pp. 605-635.
- KADEY F.L. Jr. (1983) - Diatomite. Industrial Minerals and Rocks, 5th edition, vol. 1, S.J. Lefond ed., AIME, New-York, pp. 677-708.
- LE BERRE P., PRIDA T. et NEAG G. (1994) - Etude du marché des substances non métalliques en Roumanie. Rap. BRGM N 1527, 81 p., annexes.
- MEIN P., MEON H., ROMAGGI J.P. et SAMUEL E. (1983) - La vie en Ardèche au Miocène supérieur d'après les documents trouvés dans la carrière de la montagne d'Andance. Nouv. Arch. Mus. Hist. nat., fasc. 21, pp. 37-44.
- O'DRISCOLL M. (1993) - South Korea's minerals industry. Imports prove Seoul-destroying. Industrial Minerals, August 1993, pp. 18-37.
- O'DRISCOLL M. (1994) - China's minerals industry. Gathering for the great leap forward. Industrial Minerals, June 1994, pp. 19-45.
- PETTIFER L. (1982) - Diatomite - growth in the face of adversity. Industrial Minerals, April 1982, pp. 47-69.
- REGUEIRO M., CALVO J.P., ELIZAGA E. and CALDERON V. (1991) - Diatomite deposits in Spain: an overview. VI International Flint Symposium, Spain, October 1991, Abstracts, pp. 93-96.
- REGUEIRO M. and GONZALEZ-BARROS (1995) - Spanish industrial minerals and rocks. Industries come of age. Industrial Minerals, May 1995, p. 67.
- ROSKILL (1990) - The economics of diatomite. Sixth edition, London, 226 p., annexes.
- STAMATAKIS M.G. and TSIPOURA-VLACHOU M. (1990) - Diatomaceous rocks in Greece. Minerals, materials and industry. The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 185-192.

