

mémento roches et minéraux industriels

la bentonite

P. Le Berre

février 1988 88 SGN 115 GEO



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

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

BRGM

Service Géologique National Département Géologie

B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - France

Tél.: (33) 38.64.34.34

POUR TOUS RENSEIGNEMENTS ET COMMANDES, CONTACTER :

BRGM SERVICE MINIER NATIONAL (SMN/REM) B.P. 6009 – 45060 ORLEANS CEDEX 2 Téléphone Secrétariat : 02 38 64 33.09

Télécopieur : 02 38.64.37.29 – Télex : BRGM 780258 F

SOMMAIRE

INTRODUCTION

1 - ECONOMIE ET MARCHE

1.1 - Marché français

- 1.1.1 Répartition du marché par entreprises
- 1.1.2 Production française d'argile brute
- 1.1.3 Importations
- 1.1.4 Exportations
- 1.1.5 Consommation apparente
- 1.1.6 Niveau des prix

I.2 - Production mondiale

1.2.1 - Principales sociétés productrices

- 1.2.1.1 Etats-Unis
- 1.2.1.2 Europe
- 1.2.1.3 Autres pays

1.2.2 - Evolution de la production mondiale

2 - GEOLOGIE

2.1 - Minéralogie

- 2.1.1 Structure cristalline et morphologie
- 2.1.2 <u>Nature des smectites des principaux gisements de</u> bentonite

2.2 - Types de gisements

- 2.2.1 Origine volcanique (d'après R.E. Grim et N. Güven, 1978)
- 2.2.2 Origine sédimentaire

3 - PROPRIETES ET UTILISATIONS

3.1 - Relations structure cristalline - propriétés

- 3.2 Utilisation des bentonites calciques
- 3.3 Utilisations des bentonites sodiques (naturelles et artificielles)
 - 3.3.1 Utilisations en fonction du pouvoir liant
 - 3.3.2 Utilisations en liaison avec les propriétés rhéologiques
- 3.4 Utilisations des bentonites activées par traitement acide
- 3.5 Utilisation de l'hectorite
- 3.6 Utilisation des bentonites organophiles
- 3.7 Utilisations des bentonites blanches
- 3.8 Utilisation de la saponite

4 - CRITERES D'EXPLOITABILITE ET SPECIFICATIONS INDUSTRIELLES

- 4.1 Principaux critères d'exploitabilité
 - 4.1.1 Critères liés au gisement
 - 4.1.2 Critères liés à la matière brute
 - 4.1.3 Analyses et tests
 - 4.1.3.1 Composition des échantillons
 - 4.1.3.2 Tests physico-chimiques
- 4.2 Spécifications industrielles
 - 4.2.1 Utilisation en fonderie
 - 4.2.2 Utilisation pour le bouletage du minerai de fer
 - 4.2.3 Utilisaton en forage et travaux publics
 - 4.2.3.1 Rappels concernant la rhéologie
 - 4.2.3.2 Techniques utilisées pour la détermination des caractéristiques d'une boue à base de bentonite
 - 4.2.3.3 Spécifications concernant les bentonites utilisées en forage pétrolier
 - 4.2.3.4 Spécification concernant les bentonites utilisées en travaux publics

5 - MODES DE TRAITEMENT

- 5.1 Fabrication de bentonite sodique
- 5.2 Fabrication de bentonite activée à l'acide
- 5.3 Fabrication d'argile déshydratante
- 5.4 Fabrication de bentonite épurée

6 - PRODUITS DE SUBSTITUTION

- 6.1 Utilisation en fonderie
- 6.2 Utilisation pour le bouletage du minerai de fer et de la nourriture animale
- 6.3 Utilisations en forage et comme absorbants

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

INTRODUCTION

Le terme bentonite a été proposé en 1898 par Knight pour désigner une argile au toucher savonneux appartenant à la formation "Benton shale" et affleurant dans la région de Rock River (Wyoming) où la première exploitation de bentonite aurait été ouverte. Cette formation tire son nom de Fort-Benton situé à 650 km environ au Nord de Rock River.

Le marché des bentonites est obscurci par une profusion de termes commerciaux ou régionaux utilisés pour décrire certains matériaux (cf. tableau 1). Une première confusion est venue de l'utilisation du terme "terre à foulon" de part et d'autre de l'Atlantique. Historiquement, ce terme désignait toutes les argiles absorbant les huiles, les graisses ou les matières colorantes et qui pouvaient être utilisées pour nettoyer (ou fouler) la laine. Ce terme est encore très utilisé au Royaume-Uni et aux USA. Comptetenu de la nature des argiles qui étaient utilisées pour fouler la laine, les terres à foulon désignent :

- au Royaume-Uni : des smectites calciques
- <u>aux USA</u>: des attapulgites, des smectites calciques ou des mélanges de ces argiles.

De nombreux qualificatifs sont également utilisés pour désigner une caractéristique de l'argile (bentonite gonflante ou non-gonflante) ou la région de production (bentonite du WYOMING).

Pour plus de clarté dans cet ouvrage, nous appellerons bentonite, l'ensemble des argiles à usage industriel, essentiellement composées de minéraux du groupe des smectites.

Minéral constitutif	Termes commerciaux	Termes régionaux
smectite Na	bentonite sodique naturelle bentonite sodique artificielle	bentonite du Wyoming (USA)
	bentonite sodique activée bentonite gonflante	bentonite (UK)
smectite Ca	bentonite calcique bentonite non gonflante bentonite blanche	Southern bentonite (USA) Terre à foulon (USA, UK)
smectite Mg smectite K	saponite métabentonite	
smectite Li,Mg	hectorite (naturelle) laponite (artificielle)	
smectite H (traitement acide)	terre activée acide terre décolorante	
smectite + molécules organiques greffées	bentonite organophile bentone	

Tableau 1 - Nomenclature des principaux termes commerciaux ou régionaux appliqués aux bentonites

1 - ECONOMIE ET MARCHE

1.1 - Marché français

Le marché français des bentonites est principalement contrôlé par trois entreprises : Société Française des Bentonites et Dérivés, CECA et Laviosa.

l.l.1 - <u>Répartition du marché par entreprises</u>: <u>La Société Française des Bentonites et Dérivés (SFBD)</u> est une filiale du groupe allemand <u>Süd-chemie</u> et possède deux usines de traitement au Tréport (76) et à Villars, près d'Apt (84). Elle produit actuellement environ 55 kt/an de bentonite pour fonderie, forage et travaux publics:

^{- 45} kt/an à l'usine du Tréport

^{- 10} kt/an à l'usine de Villars.

Les matériaux traités proviennent principalement de Sardaigne (produits semi-ouvrés fabriqués dans une usine appartenant à Süd-Chemie), de Grèce et des USA (argiles brutes). Un faible tonnage, de l'ordre de 7 kt/an provient également de la carrière de Réquiécourt, près de Gisors (Eure).

De plus, la SFBD commercialise en France, environ 25 kt/an de bentonite fabriquée en RFA par Süd-Chemie, dont 15 kt/an de terre activée à l'acide.

La <u>Société CECA</u>, filiale du groupe Elf Aquitaine produit actuellement 50 à 60 kt/an de bentonite dans trois usines :

- 35 à 40 kt/an à Honfleur (14),
- 8 à 12 kt/an à Port 1a Nouvelle (11),
- 6 à 7 kt/an au Buisson (24).

L'approvisionnement en argiles est essentiellement assuré par des filiales implantées en Sardaigne et en Grèce. Ces argiles sont traitées dans les usines de Honfleur et Port la Nouvelle pour la production de bentonite pour fonderie, forage et travaux publics. De plus, l'usine de Honfleur produit des argiles déshydratantes et des bentones (bentonites organophiles principalement utilisées en peinture et obtenues à partir de bentonite sodique du Wyoming et d'hectorite de Californie).

L'usine du Buisson produit de la bentonite calcique à partir d'une argile extraite sur le plateau de la Bessède et principalement destinée aux marchés de la nourriture animale, du traitement des eaux et de la fonderie.

La <u>Société Laviosa</u> est une société italienne possédant une usine située à Portes les Valences (26). Elle traite de la bentonite en provenance de Sardaigne. La production est de 15 à 20 kt/an environ.

La <u>Société Expansia</u> (filiale des Laboratoires Beaufour) située à l'Isle sur la Sorgue (84) produit environ 2 000 t/an de smectite pure et de mélange attapulgite-smectite destinés principalement à l'industrie pharmaceutique.

D'autres sociétés (négociants) commercialisent également de la bentonite en petite quantité et en particulier :

- <u>le Comptoir des Minéraux et Matières Premières</u> (CMMP Paris) représentant exclusif de American Colloïd : 1 à 1,5 kt/an de bentonites pour fonderie en provenance d'une usine située à Liverpool (produits à base de bentonite américaine ou du bassin méditerranéen);
 - <u>la société des Minerais de la Méditerranée</u> (Paris) l à 1,5 kt/an de bentonite américaine
 - les Produits Ballu-Schuiling (Clichy la Garenne, 92)
 1 à 2 kt/an de bentonite pour fonderie produite à l'usine SFBD du Tréport

La société Iko-France (filiale d'une firme allemande)
 0,5 kt/an de bentonite pour fonderie.

1.1.2 - Production française d'argile brute

La production française d'argile brute utilisée pour la fabrication de bentonite est faible, elle est comprise entre 15 et 20 kt/an. Les carrières sont situées dans deux départements, la Dordogne et l'Eure.

- En Dordogne

La principale carrière est située au lieu-dit Fromental à 2 km au Nord de Bouillac. Elle appartient à la société CECA et alimente l'usine du Buisson (production d'argile brute de l'ordre de 10 kt/an). Une autre carrière est également exploitée de façon épisodique au lieu-dit les Brandes en bordure de la route D2 entre Cadouin et Montferrand du Périgord (production de l'ordre de 0,5 à 1 kt/an). Elle appartient à la société ARSIP (Argiles Rares et Silices Industrielles du Périgord, directeur : M. Lafaure). Ces deux carrières exploitent les argiles vertes (3-4 m d'épaisseur) de l'Oligocène inférieur du plateau de la Bessède (production de bentonite pour nourriture animale principalement).

- dans l'Eure

Une carrière a été ouverte en 1985 au lieu-dit Réquiécourt, sur la commune de Cahaignes (15 km au SW de Gisors) par la SFBD, suite aux travaux de prospection menés par le Service Roches et Minéraux Industriels du BRGM dans le cadre de l'inventaire du territoire métropolitain (production 1986 de l'ordre de 7 kt). Une carrière expérimentale avait été ouverte en 1984, dans le même secteur, sur la commune de Fourges (prélèvement d'un lot d'argile de 3 kt et remise en état). Les argiles du Sparnacien extraites sur 3-4 m d'épaisseur sont traitées à l'usine du Tréport pour la production de bentonite de fonderie, et travaux publics (en mélange avec d'autres bentonites).

1.1.3 - Importations

Le marché français est essentiellement approvisionné par des importations d'Italie, de Grèce, de RFA et des USA, sous forme d'argile brute, de produit semi-ouvré ou de produit fini.

Ces importations peuvent être estimées à partir des statistiques du Commerce Extérieur de la France (Direction Générale des Douanes et Droits indirects). Les bentonites entrent principalement sous deux rubriques :

25.07.60.0 : bentonites

Ces importations concernent essentiellement les bentonites naturelles entrant à l'état brut en France.

38.03.90.0 : matières minérales naturelles activées

Ces importations concernent essentiellement les bentonites activées (produits finis ou semi-ouvrés). L'évolution en tonnage et en coût représenté sur la figure l montre que le tonnage de bentonite importé est relativement stable, soit :

- 90 kt de bentonite brute.
- 80 kt de bentonite activée (produit fini ou semi-ouvré).

Le coût de ces importations a augmenté à un rythme régulier de l'ordre de 6 % par an, pour atteindre environ 140 MF en 1985-86.

Le tableau 2 montre que les bentonites naturelles proviennent principalement de Grèce, d'Italie, alors que les bentonites activées sont surtout importées d'Italie et de RFA.

		s naturelles (.60.0) t	Bentonites activées (38.03.90.0) t		
	1985	1986	1985	1986	
Italie	32.641	30.497	48.513	46.796	
Grèce	39.759	37.472 6.733 2.297 11.062	25.393 842 9.134	3.810 24.320 8.980	
R.F.A.	6.816				
U.S.A.	10.220				
Autres Pays	8.930				
TOTAL	98.366	88.061	83.882	83,906	

Tableau 2 - Importations françaises de bentonite par pays, pour 1985 et 1986 (statistiques du Commerce Extérieur de la France)

1.1.4 - Exportations

Les données statistiques concernant les exportations sont incomplètes (les exportations sous la rubrique 38.03.90.0 étaient confidentielles jusqu'à Janvier 1987).

Mais d'après les données recueillies auprès des entreprises concernées, celles-ci peuvent être estimées à environ 20 kt/an et sont principalement à destination de la RFA, Italie, Belgique, Espagne, Portugal, Afrique, Moyen-Orient et Extrême-Orient.

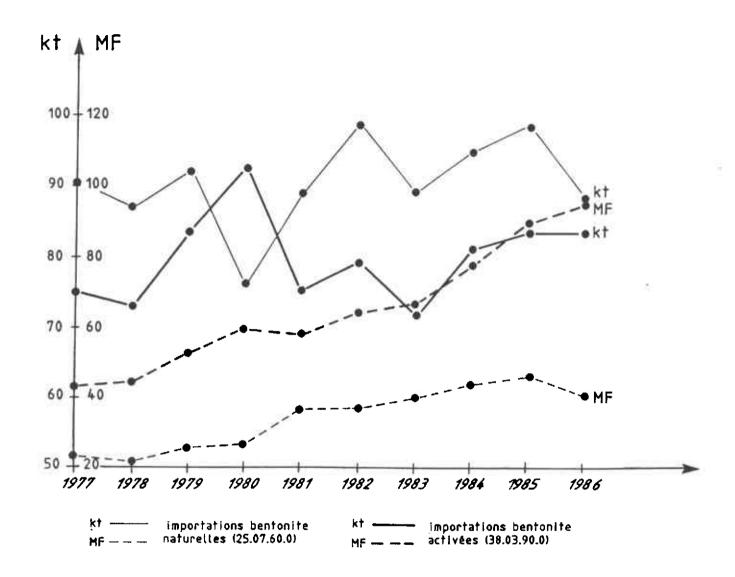


Fig. 1 - Evolution des importations françaises de bentonite, d'après les statistiques du Commerce Extérieur de la France

1.1.5 - Consommation apparente

Elle a été estimée de deux manières pour 1986 (calcul en tonnage de produit fini) :

_	s la production treprises	Calcul d'après la pro par type d'argi	
SFBD	75-85 kt	Argiles françaises	13 kt
CECA	50-60 kt	Argiles brutes importées	62 kt
Laviosa	15-20 kt	Produits semi-ouvrés importés (Italie)	44 k t
livers	5-10 kt	Produits finis importés	37 kt
Exportations	20 kt	Exportations	20 kt
Consommation	125-155 kt	Consommation	136 kt

*Le tonnage de produit fini a été calculé en diminuant de 30 % le tonnage des argiles brutes et de 10 % le tonnage des produits semi-ouvrés (données SFBD) à cause des pertes d'eau lors du traitement.

Ces deux estimations sont concordantes et montrent que la consommation française de bentonite a été de l'ordre de 140 kt en 1986 (exprimée en produit fini). La répartition de cette consommation en fonction des utilisations est donnée dans le tableau 3.

Utilisation	Tonnage consommé	Pourcentage consommation totale
Fonderie	80 kt	60 %
Travaux publics	30 kt	20 %
Terres décolorantes activées à l'acide	15 kt	10 %
Alimentation animale	7 kt	5 %
Divers : forage, céramique, bentone, argile déshydra- tante, pharmacie, cosmétique	8 kt	5 %

Tableau 3 - Estimation de la répartition de la consommation en fonction des utilisations (1986).

La fonderie constitue, en tonnage, le principal secteur d'utilisation des bentonites et une base stable pour ce marché malgré des risques de fléchissement liés à la décroissance du nombre de fonderies, à la vétusté de certaines d'entre elles (fonderies autonomes), à la fabrication de pièces à l'étranger et à la mise au point de nouveaux procédés de moulage sans bentonite.

Le marché des travaux publics est beaucoup plus capricieux (son volume dépend de l'ouverture des gros chantiers).

Certains secteurs sont en forte décroissance (consommation de bentonite de forage très faible) ou ont disparu (consommation de bentonite pour le bouletage du minerai de fer arrêtée depuis la fermeture de l'usine de Segré).

1.1.6 - Niveau des prix :

Les prix de vente 1987, départ usine ou entrepôt, communiqués par les entreprises sont les suivants :

- Fonderie : 600 à 800 F/t pour les bentonites activées en provenance d'Italie, Grèce, RFA)
 - 1 000 à 1 500 F/t pour les bentonites sodiques naturelles américaines
- Travaux publics : 700 à 800 F/t

- Autres usages

- , argiles blanches pour céramique : 1 500 à 2 000 F/t
- . bentones (bentonites organophiles): 20 000 à 30 000 F/t
- . bentonite pour pharmacie et cosmétique : 40 000 F/t

1.2 - Production mondiale

La production mondiale de bentonite était d'après le tableau 4, de l'ordre de 8 MT en 1985 (non comptées les productions de la Chine, de l'URSS, de la Yougoslavie et du Canada).

Cette production est assurée principalement par les Etats-Unis (50 %) et l'Europe de l'Ouest (25 %).

1.2.1 - Principales sociétés productrices

La liste des principales entreprises productrices est donnée pour chaque pays en annexe.

1.2.1.1 - Etats-Unis

Les gisements de bentonite sodique naturelle sont situés dans le Nord-Ouest, principalement au Wyoming, mais aussi dans le Montana et le Sud-Dakota (cf. fig. 2). La production est dominée par six sociétés :

- American Colloïd Company: capacité de production de bentonite Na naturelle supérieure à 1400 kt/an grâce à ses usines de Belle Fourche, Upton, Lovell, Malta et Colony (autres usines de 500 kt/an de capacité notamment à Aberdeen, Mississippi et Sandys Ridge, Alabama).
- <u>la division Baroïd de NL Industries</u> : usines à Colony (900 kt/an de capacité) et Lovell pour production de bentonite de forage
- <u>Dresser Industries Inc</u>: exploitation à Greybull (430 kt/an de capacité) pour production de bentonite pour bouletage de minerai de fer et forage.

Production en kt	1984 kt	1985* kt
Amérique du Nord		
Etats-Unis	3 990	3 932
Mexique	313	299
Amérique du Sud		
Argentine	85	95
Brésil	201	200
Pérou	32	32
Guatémala	9	9
Europe de l'Ouest		
RFA	600**	600**
Grèce	778	750
Italie	314	304
Grande-Bretagne	286	299
France	10	12
Espagne	73	73
Europe de l'Est		
Hongrie	64	60
Pologne	70	75
Roumanie	180	180
Chypre	32	52
Turquie	28	28
Afrique		
Algérie	28	29
Maroc	35	36
Egypte	3	3
Zimbabwe	70	70
Afrique du Sud	42	44
Moyen-Orient		
Israël	6	12
Iran	10	10
Asie-Océanie		
Inde	150	150
Pakistan	21	19
Japon	410	461
Philippines	38	2
Nouvelle-Zélande	6	2
Australie	30	30
TOTAL	7 914	7 868

Tableau 4 - Estimation de la production mondiale de bentonite, d'après Minerals Yearbook 1985 (US Bureau of Mines)

^{*} Données partiellement estimées

^{**} d'après estimation Industrial Minerals, Dec. 1985.

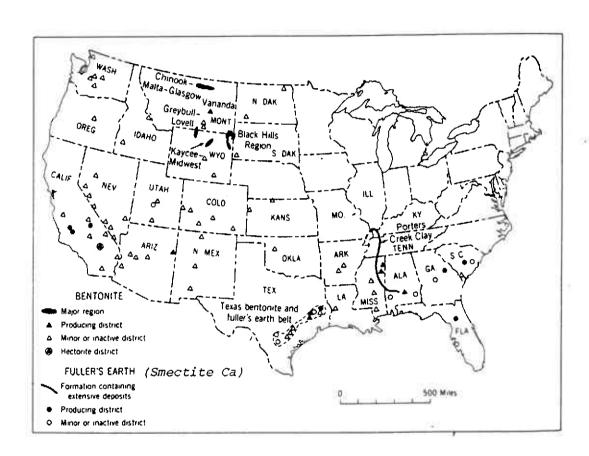


Figure 2 - Carte de localisation des principaux gisements de bentonite des Etats-Unis (d'après Industrial Minerals and Rocks, 1983)

- Federal Ore and chemical Inc: exploitations à Colony et Upton (capacité 450 kt/an), production essentiellement destinée au bouletage du minerai de fer.
- <u>Kaycee Bentonite Partnership</u>: capacité de production de 600 kt/an de bentonite de Wyoming essentiellement destinée au bouletage du minerai de fer.
- <u>Wyo-Ben Inc</u> : capacité de production de 750 kt/an de bentonite du Wyoming.

Les principaux gisements de bentonite calcique sont situés au Sud (Mississippi, Alabama, Missouri, Géorgie, Floride, Texas) et sont principalement exploités par deux sociétés :

- Oil Dri Corp. of America

Elle possède deux exploitations de 250 kt/an de capacité à Riplay (Mississippi) et Ochlocknee (Géorgie). De plus, elle a repris l'exploitation d'Ochlocknee qui appartenait à Anschutz Corp. Les gisements situés en Géorgie sont des produits impurs constitués par un mélange de smectite Ca, d'attapulgite, kaolin, diatomite.

- Lowe's Inc.

Elle possède cinq exploitations situées au Tennessee, Missouri, Illinois, Californie (500 kt/an de capacité).

Les matériaux exploités par ces deux sociétés sont utilisés pour la production d'absorbants pour l'industrie, l'agriculture et pour litières animales.

Au Texas, Southern Clay Products Inc. (filiale English China Clays) fabrique principalement des produits haut de gamme (bentonite blanche raffinée pour pharmacie, cosmétique et céramique, bentonites dopées par des produits organiques utilisées en forage et pour la fabrication de peintures, encres, graisses, et adhésifs).

Dans l'Ouest des Etats-Unis (Californie, Nevada), il existe également des exploitants de bentonite Ca, parmi lesquels on peut citer Wilbur - Ellis Co, R.T. Vanderbilt Co, Industrial Mineral Ventures:

- R.T. Vanderbilt est spécialisé dans la production de bentonite blanche pour cosmétique, et pharmacie (produits Veegun).
- <u>Industrial Mineral Ventures</u> exploite un gisement d'argile composée de bentonite Ca, saponite, sépiolite, hectorite et situé à Imvite, Amargosa Valley, Nevada (production d'argiles spéciales pour forage, charges, suspensions ...).

Le principal gisement mondial d'<u>hectorite</u> (bentonite Li-Mg) est également situé dans l'Ouest, près de Hector en Californie (hectorite associée à de la calcite). Il est exploité par NL Industries, en particulier pour la production de bentones.

1.2.1.2 - Europe

Les principaux gisements en exploitation sont situés dans cinq pays, la RFA et l'Angleterre au Nord, l'Italie, la Grèce et l'Espagne du Sud.

La position dominante est tenue par le groupe allemand Süd-Chemie AG dont l'usine située à Moosburg, près de Munich (capacité de production : 700 kt/an) traite de la bentonite Ca provenant de plusieurs localités de Bavière. Elle produit non seulement de la bentonite sodique principalement pour fonderie et travaux publics, mais est aussi spécialisée dans la fabrication de terres décolorantes activées à l'acide. Elle possède de nombreuses filiales en France (Société Française des Bentonites et Dérivés), en Italie (Süd-Chemie Italia SpA) et au Mexique (Quimica Sumex). De plus, elle a racheté en 1986, l'usine de Duisbourg qui appartenait à American Colloïd.

Le principal producteur du Royaume-Uni est la société Laporte Industries qui exploite de la terre à foulon à Redhill (Surrey) et Baulking (Oxfordshire) pour la production de bentonite Na (fonderie, forage, T.P.) et de litière animale (capacité de production des deux usines : 250 kt/an). L'usine de Baulking a été rachetée à Brett Bentonite Ltd. Elle possède également une usine à Widness (Cheshire) spécialisée dans la production de terre activée à l'acide et de laponite (hectorite artificielle). Par sa filiale Minas de Gador SA (100 % Laporte), elle domine le marché espagnol : carrières de bentonite Ca dans les régions d'Almeria et Madrid, de saponite près de Tolède. Cette domination a été renforcée par un accord signé avec la société Tolsa (Minas de Gador produisant seulement de la bentonite, Tolsa produisant uniquement des argiles fibreuses).

Les gisements italiens sont concentrés sur la bordure ouest de la Sardaigne. La production est dominée par la Société Industria Chimica Carlo Laviosa SpA. La plupart de la production quitte la Sardaigne sous forme semi-finie pour être ensuite traitée à Livourne. Cette usine reçoit également de la bentonite de Grèce, exploitée par une filiale (Mediterranean Bentonite Co). Elle possède également une usine en France (Portes les Valences). La bentonite de Sardaigne est également exploitée par des filiales de sociétés étrangères : CECA Italiana SpA, Süd-Chemie Italia SpA, Baroïd International SpA.

Les exploitations de Grèce sont situées sur l'île de Milos. Le principal producteur est Silver and Baryte ores Mining Co (400 kt/an de capacité) dont l'activité a progressé grâce aux exportations de bentonite pour bouletage de minerai de fer vers le Canada. Les autres producteurs sont Mykobar Mining Co SA (filiale de Dresser, USA) et Mediterranean Bentonite Co Ltd (filiale de Laviosa, Italie).

Les argiles exploitées en Europe sont principalement des bentonites calciques naturelles transformées en bentonites sodiques par ajout de carbonate de sodium. Il faut aussi noter l'existence de gisements de bentonite blanche en Grèce et en Turquie et de bentonite sodique naturelle en Turquie.

1.2.1.3 - Autres pays

La production du Japon était de l'ordre de 450 kt en 1985. Deux types de gisements sont exploités : des bentonites Na et des bentonites H naturelles. Les principales compagnies sont Kunimine Industries Co Ltd et Hojun Kogyo Co Ltd (bentonite pour fonderie, T.P., etc.). Mizusawa Industrial Chemicals Ltd est spécialisé dans la production de terres activées à l'acide.

La production de l'Inde (150 kt/an environ) est principalement assurée par l'état de Gujarat. Les principaux producteurs sont Ashapura Minechem Pvt. Ltd., Kutch Minerals et Gimpex Pvt Ltd.

1.2.2 - Evolution de la production mondiale

Le graphique de la figure 3 montre que cette production a atteint 8,4 Mt en 1981, a chuté a 7 Mt en 1982-83 pour remonter à 7,8 Mt en 1984-85.

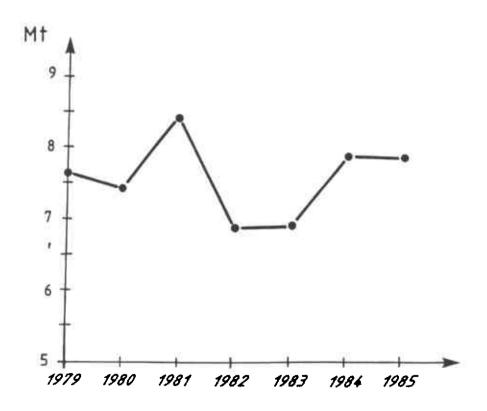


Figure 3 - Evolution de la production mondiale de bentonite, d'après Mineral Yearbook (statistiques du Bureau of Mines - USA)

2 - GEOLOGIE

2.1 - Minéralogie

2.1.1 - Structure cristalline et morphologie

Les bentonites sont des argiles essentiellement composées de minéraux du groupe des smectites.

Les smectites sont des phyllosilicates dont le feuillet élémentaire est constitué par une couche octaédrique comprise entre deux couches tétraédriques (phyllosilicate 2/1, cf. fig. 4). Elles se caractérisent par une importante variation de l'équidistance entre les feuillets en fonction du degré d'hydratation (argiles gonflantes). Elles se divisent en deux familles:

- les smectites trioctaédriques dont toutes les cavités octaédriques sont occupées par un cation Mg2+;
- les smectites dioctaédriques dont seulement deux cavités octaédriques sur 3 sont occupées par un cation Al3+. De plus, il existe des substitutions entre cations situés en position octaédrique ou tétraédrique entraînant l'apparition d'un déficit de charge variant entre 0,4 et 1,2 e /maille.

Ce déficit joue un rôle fondamental dans les propriétés des smectites car il permet la mise en place de cations compensateurs (généralement Ca2+Na+, ou Mg2+) situés entre les feuillets et facilement échangeables (capacité d'échange de cations ou CEC élevée).

Le groupe des smectites dioactédriques (cf. tableau 5) comprend une série quasi-continue de minéraux dont les termes extrêmes sont la montmo-rillonite (substitutions uniquement dans la couche octaédrique) et la beidellite (substitutions uniquement dans la couche tétraédrique). La nontronite est une beidellite contenant du fer en position octaédrique (en remplacement de l'aluminium).

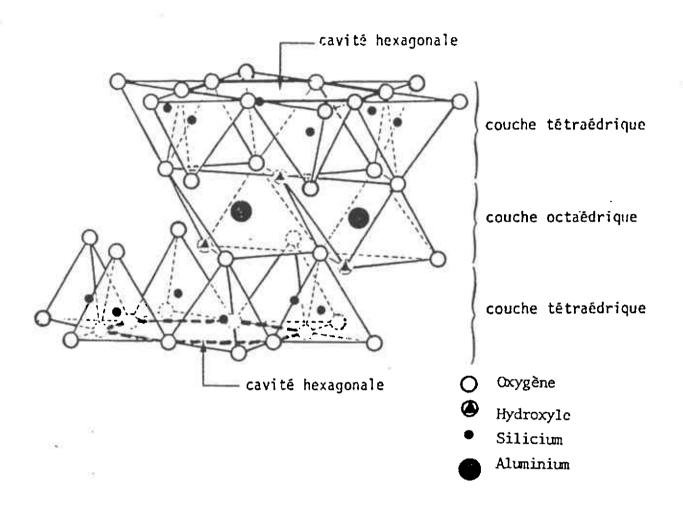


Figure 4 - Représentation dans l'espace d'un feuillet de phyllosilicate 2/1.

N Pr Pr Pr Pr	atia	sites notaé	du? ∰	Substitution avec modification de	vec de	S mc N		PORMULES TYPES	TYPES	-	*	
charges inter- foliaires	n/3	n/3 cation	répart.	répart, dans sites tétra.	dans sites octa.		Cations octa		Cations tétra.		cations échan- geables	ons -r
		A1	désord.		Al par Mg	MONTMORILLONITE	A14-x Mgx	⁵ (H0)	Si ₈	020	0 ₂₀ CE _x nH ₂ 0	nH ₂ 0
	8	Fe 3+	ord. ou	Si	e Al par	BEIDELLITE (Al, Fe ³⁺)	(A1, Fe ³⁺) ₄	(HO)	Si _{8-x} Al _x	020	0_{20} CE nH ₂ 0	пН ₂ 0
7.0		Al	désor.	par Al	Mg							
		Fe 3+	ord.	Si par Al		NONTRONITE	(Fe ³⁺ ,A1) ₄	(OH)	Si _{8-x} Alx	020	CE.	nH_2O
æ		Al, Cr	ord.	Si par Al		VOLCHONSKOITE	(A1,Cr)4	[†] (H0)	Sig-xAlx	020	$c_{\rm X}$ $^{ m nH}_2^{ m 0}$	nH_2^0
		M.	désord.		Mg par Li	HECTORITE	Mg6-x Lix	[†] (но)	Sig	020	0_{20} CE _{2x} nH ₂ 0	$^{\rm nH}_2$ 0
	-				ou lacune							
1,2	>	M.	désord.		Mg par lacune	STEVENSITE	M8 _{6-x}	(OH)	S ₁₈	020	CE _x nH ₂ 0	$^{\mathrm{nH}_20}$
		Mg	désord.	Si par Al		SAPONITE	Mg ₆	[†] (HO)	Sig-x Alx	020	CE	CE _x nH ₂ 0

Tableau 5 - Formule structurale des minéraux argileux du groupe des smectites

* CE : Ca, Mg, Na, K

Parmi les smectites trioctaédriques, on peut citer en particulier la saponite (substitution tétraédrique de Si par Al) et l'hectorite riche en lithium (substitution octaédrique de Mg par Li).

Les cristaux élémentaires de smectite ont des formes variées (lattes, lamelles polygonales ou à contours irréguliers) et constituent des agrégats de types différents : globulaires, moussus, lamellaires (foliès, compacts réticulés).

2.1.2 - Nature des smectites des principaux gisements de bentonite

Les smectites des gisements en exploitation ont généralement une composition intermédiaire entre montmorillonite et beidellite. Des bentonites à composition de montmorillonite pure sont connues (Cheto en Arizona, Otay en Californie, Nutfield au Royaume-Uni). Par contre, on ne connaît pas parmi les principaux gisements exploités, de bentonite composée de beidellite pure. Certaines smectites (gisements de Challao et Las Heras en Argentine, Usui au Japon, province de Natal en Afrique du Sud) ont une faible teneur en Mg ce qui laisse toutefois supposer une composition proche du pôle beidellitique.

Les autres types de smectite sont rares (célèbre gisement d'hectorite de Hector en Californie).

Les cations interfoliaires de la plupart des bentonites brutes sont principalement constitués de calcium (bentonite calcique). Mais le sodium peut aussi être prédominant (bentonite sodique naturelle) comme dans les célèbres gisements du Wyoming (USA) et dans d'autres gisements signalés au Canada, en Argentine, en Turquie, en Inde, en Afrique du Sud, en Australie et au Japon.

Lorsque les teneurs en fer sont très faibles les bentonites sont alors de teinte blanche (gisements aux USA, en Grèce et en Turquie).

2.2 - Types de gisements

2.2.1 - Origine volcanique (d'après R.E. Grim et N. Güven, 1978).

La plupart des gisements de bentonite sont issus de l'altération in situ de cendres volcaniques en milieu aqueux. Mais ils peuvent aussi avoir d'autres origines (altération hydrothermale ou deutérique de roches volcaniques).

- Altération de cendres volcaniques en milieu aqueux

Cette origine est confirmée par la présence d'aiguilles de verre et autres structures reliques de la roche-mère, par la nature des minéraux non argileux associés (feldspath, mica, pyroxène, magnétite ...), l'absence de minéraux détritiques et le passage à des niveaux de cendres ou tufs volcaniques non altérés.

Ce mode de genèse, le plus fréquent, est celui des gisements de bentonite du Wyoming et du Montana et de la plupart des autres gisements des USA. C'est aussi celui des gisements situés en Angleterre, RFA, URSS, Hongrie, Yougoslavie, Japon, Maroc, Argentine, Nouvelle-Zélande, Afrique du Sud.

Le milieu de dépôt des matériaux volcaniques est très variable (marin, lacustre, lagunaire) et les roches associées sont de natures diverses. L'altération en milieu marin peu profond semble toutefois la plus commune. La nature des cendres est aussi très variable (rhyolite, dacite, trachyte ...).

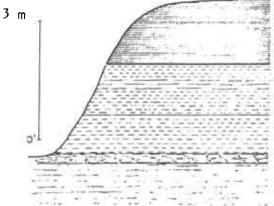
Le processus d'altération comprend les principales phases suivantes : dévitrification, hydratation et cristallisation des smectites. Cette altération est généralement contemporaine du dépôt des cendres en milieu aqueux. La cristobalite et les zéolites mises en évidence dans certains dépôts n'étaient pas présentes lors de ce dépôt mais ont cristallisé, comme les smectites, après la phase de dévitrification.

La nature des cations échangeables est liée à la composition des cendres originelles et définie le plus généralement lors de la cristallisation des smectites.

Exemple : description du gisement de bentonite de Black Hills (Wyoming, Montana, Sud-Dakota).

Les couches exploitables sont intercalées dans une série marine constituée d'argilites, marnes et sables argileux d'âge Crétacé. Il peut exister localement jusqu'à 20 couches de bentonite dont l'épaisseur varie de quelques cm à 3 m. Les couches les plus épaisses sont litées et représentent une séquence de cendres volcaniques. La base des horizons bentonitiques est généralement bien marquée (niveau de chert). On suppose que les cendres volcaniques originelles étaient de composition rhyolitique. Des fragments de verre non altéré, des cristaux de quartz, feldspath, biotite sont présents. La cristobalite peut atteindre, dans certains niveaux, des teneurs supérieures à 25 %. Mais la smectite constitue généralement plus de 90 % de la roche.

Le niveau productif le plus connu est appelé "Clay Spur", il est situé dans la partie supérieure du "Mowry Shale" (sommet du Crétacé inférieur). Son épaisseur est comprise entre 0,7 et 1,2 m et il est constitué de smectite sodique (cf. fig. 5). Dans d'autres niveaux, le cation absorbé est du calcium.



Argilite sombre non siliceuse Belle fourche formation Bentonite scmbre à intercalations d'argilite siliceuse Bentonite sombre

Sentonite claire Viveau basal à chert argilite siliceuse Mourry formation

Figure 5 - Coupe géologique dans le niveau "Clay Spur Bentonite" (d'après Patterson, 1955)

- Altération hydrothermale de roches ignées

Ce mode de genèse a été proposé pour des gisements situés en Algérie, Espagne, Grèce, URSS, Hongrie, Roumanie, Japon, etc. La nature de la rochemère est variable (rhyolite, trachyte, andésite-basalte) et sa texture est très bien conservée dans la bentonite. La smectite est généralement le seul minéral constitutif, mais elle peut être parfois associée à d'autres minéraux présents en petite quantité (kaolinite, halloysite ...). Certains gisements montrent une distribution zonale de l'altération (centre plus altéré). La grande profondeur d'altération et l'absence de variation verticale de la composition minéralogique permettent de supposer que ces gisements ne sont pas issus d'une altération météorique. Ce mode de formation est celui envisagé pour l'hectorite d'Hector en Californie qui serait issue de la réaction chimique de fluides chargés en lithium, fluor et silicium sur des carbonates.

- Altération deutéritique de cendres volcaniques

Cette altération correspond aux modifications subies par une roche ignée sous l'action des gaz provenant du magma, immédiatement après sa mise en place. Il n'existe pas de démarcation nette entre ce type d'altération et l'altération hydrothermale. Toutefois, certains gisements de bentonite, semblent être essentiellement issus d'une altération deutérique.

Exemples:

- . Bentonite issue de l'altération d'une lave perlitique (rhyolite vitreuse) située dans une séquence volcanique du "Karoo System" (Lias) et s'étendant du Mozambique jusqu'en Afrique du Sud : l'altération en smectite est très irrégulière (nodules d'argile dans la perlite) et s'est probablement concentrée dans les zones à forte teneur en gaz (elle ne semble pas en relation avec un réseau de fractures).
- . <u>Bentonite de Uri en Sardaigne</u> (Italie) : la bentonite constitue des bancs lenticulaires enfermés dans des laves non argilisées (trachy-andésites).

- Altération météorique

La genèse des gisements de bentonite par altération météorique de roches volcaniques semble rare. Ce type d'altération conduit généralement à des mélanges de minéraux argileux (smectite-halloysite, par exemple).

Mais ce type d'altération peut se surimposer sur des gisements préexistants. Il aurait , en particulier, permis la formation des bentonites naturelles acides exploitées :

- Au Japon (préfectures de Yamagata et Niigata) :

pH acide de l'ordre de 5 - 6 et faible capacité d'échange de cations.

- à Pembina (Canada) :

Les niveaux de bentonite sont intercalés dans des argiles pyriteuses et organiques. L'oxydation de la pyrite a engendré la production d'acide ayant réagi sur la bentonite.

2.2.2 - Origine sédimentaire

Des smectites peuvent se former par pédogénèse dans certaines conditions (milieux confinés basiques), être mobilisées et concentrées par l'érosion et le transport puis déposées sous forme de couches sédimentaires exploitables dans des bassins continentaux (gisements sédimentaires de faciès détritique).

Un exemple de ce type de gisement a été mis en évidence par le BRGM dans le Sparnacien du Bassin de Paris. Durant cette période, s'est individualisé le bassin des argiles plastiques (cf. fig. 6) caractérisé par une différenciation minéralogique:

- dominance de smectite à l'Ouest, secteur où a été menée la prospection ;
- dominance de kaolinite à l'Est.

Cette sédimentation argileuse aurait essentiellement pour origine l'argile à silex issue de l'altération de la craie du Crétacé. A l'Ouest du Bassin de Paris, la craie est très riche en silex et présente une grande extension. Son altération, en milieu basique a conduit à la formation de smectites à partir des argiles de la craie, mais aussi probablement à partir de la silice des silex.

A la suite de mouvements tectoniques (fin Thanétien-début Sparnacien) ayant ravivé l'érosion, l'argile à silex a été mobilisée et triée : les sédiments grossiers ont été bloqués par des anticlinaux alors que des argiles ont passé ces barrières pour s'accumuler dans le bassin des argiles plastiques (les ondulations tectoniques ont pu favoriser l'existence de bas-fonds favorables à la cristallisation des smectites).

Rappelons que suite aux travaux du BRGM, une carrière de bentonite a été ouverte près de Gisors (Eure) par la Société Française des Bentonites et Dérivés.

Mais les smectites qui se déposent dans ces bassins continentaux peuvent aussi se transformer progressivement selon les conditions de dépôt. Ainsi, N. Trauth (1977) a mis en évidence dans des bassins tertiaires, une séquence géochimique des minéraux argileux au fur et à mesure de l'évolution de la sédimentation d'un pôle détritique (smectite Al, Fe héritée) vers un pôle évaporitique (cf. Fig. 7). Cette séquence peut s'orienter dans deux voies : la voie attapulgite-sépiolite (argiles fibreuses) ou la voie saponite - stévensite (smectites Mg en feuillets) en fonction du rapport silice en solution/Mg disponible dans le milieu (si ce rapport est faible, la voie smectite est privilégiée).

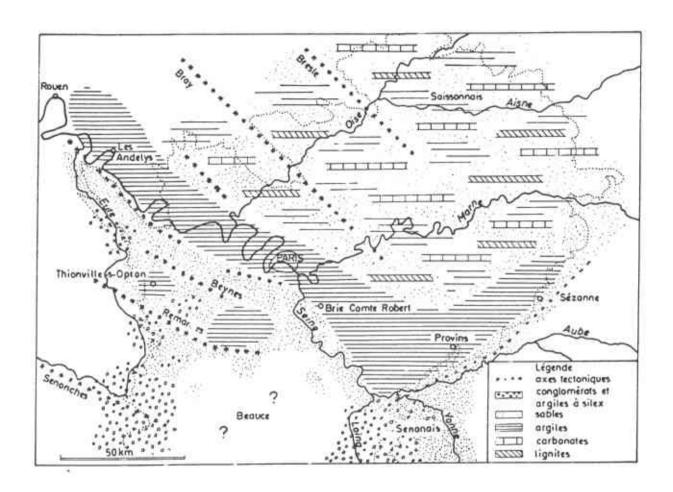


Figure 6 - Répartition paléogéographique des faciès sédimentaires du Sparnacien inférieur (d'après M. THIRY, C. CAVELIER et N. TRAUTH, 1977)

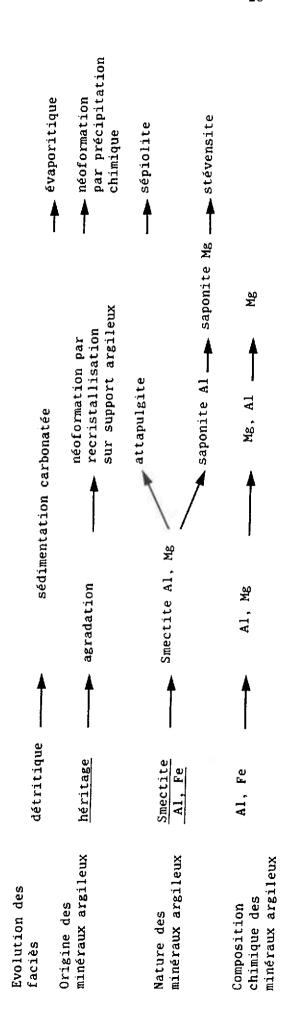


Figure 7 : Séquence des minéraux argileux dans la sédimentation continentale tertiaire (d'après N. TRAUTH, 1977)

Cette évolution peut conduire à des gisements de smectites magnésiennes. Ainsi le ghassoul exploité au Jbel Ghassoul au Maroc est essentiellement constitué de saponite Mg et de stévensite. Il constitue des couches intercalées dans une sédimentation à caractère évaporitique (dolomite-gypse) avec des passées détritiques sablo-argileuses. D'après N. Trauth (1977), ces smectites seraient le résultat de la transformation de minéraux argileux préexistants (saponite) et d'une néoformation (stévensite).

3 - PROPRIETES ET UTILISATIONS

3.1 - Relations structure cristalline - propriétés

Les propriétés particulières des smectites découlent de leur structure cristalline (cf. chapitre 2.1). Ces minéraux sont constitués de feuillets élémentaires d'épaisseur 10 A faiblement liés entre lesquels l'eau pénètre facilement (argiles gonflantes). L'eau fixée à la surface des feuillets est organisée selon un réseau hexagonal (liaisons du type hydrogène). En conséquence, ces argiles peuvent être dispersées dans l'eau sous la forme de très petites particules (forte surface spécifique). Ces particularités du système eau-smectite sont à l'origine de la plupart des propriétés des bentonites : viscosité, thixotropie, plasticité, retrait-gonflement, pouvoir liant ...

Ces propriétés varient beaucoup selon les types de smectite et en particulier en fonction de la nature des cations interfoliaires. Comme ces cations sont échangeables, certaines propriétés des smectites peuvent être obtenues par un traitement approprié.

Ainsi, la plupart des bentonites calciques naturelles sont transformées en bentonites sodiques artificielles par ajout de carbonate de sodium lors de la fabrication (échange Ca++ - Na+). En effet les bentonites sodiques présentent généralement de meilleurs caractéristiques (pouvoir liant, viscosité ...) et les gisements de ce type d'argile sont rares.

Des smectites sont également rendues organophiles par greffage de cations organiques.

Le tableau 6 regroupe les principales utilisations des bentonites en fonction des propriétés physico-chimiques des smectites.

3.2 - Utilisation des bentonites calciques

Les bentonites calciques constituent la plupart des gisements exploités dans le monde (les autres types de bentonite sont rares à l'état naturel). Ces argiles ont tout d'abord été utilisées pour dégraisser la laine (terres à foulon) mais cet emploi à pratiquement disparu. Elles sont encore utilisées comme absorbants : charges pour pesticides, litières pour animaux, absorbants de sols industriels. Elles conviennent également pour le bouletage de la nourriture animale.

A partir de bentonite calcique naturelle, qui contient essentiellement des ions Ca++ en position interfolaire, mais aussi d'autres cations en quantité moindre, on produit aussi une bentonite exclusivement calcique très

Tableau 6 : Principales applications commerciales de la bentonite en relation avec ses propriétés physico-chimiques (d'après J. A. BAIN in D. HIGHLEY, 1972)

- 1 Capacité d'échange de cations
- . préparation de smectite sodique
- . préparation de smectite organophile
- 2 Propriétés d'absorption et d'adsorption (peuvent être accrues par traitement acide)
 - 2.1 en suspension

- . raffinage et décoloration des huiles
- . clarification et purification du sucre,

des sirops et vins

. purification de l'eau, traitement des

eaux d'égouts et effluents

2.2 - à sec ou en pâte

- préparation pharmaceutique ou thérapeutique
- rabsorbant (nettoyage des sols d'usine,

litières animales)

- 3 Surface spécifique (peut-être accrue par traitement acide)
- action catalytique (support pour catalyses)
- . support pour insecticides et fongicides .
- . charges minérales
- 4 Propriétés rhéologiques (modification des propriétés d'écoulement en milieu fluide)
 - 4.1 pouvoir de viscosité et de suspension
- . boues de forage
- . peintures
- . vaporisateur d'engrais
- . émulsions de bitume
- . formulation de fondants pour céramique

4.2 - thixotropie

- 👊 murs de forage
- 🖟 génie civil (voiles)
- 🖟 peinture ne coulant pas
- 5 Imperméabilité, protection
- 🤜 génie civil (jointoiement)
- 🕟 forage en terrain perméable

6 - pouvoir liant

- ma liant des sables pour moules de fonderie
- m bouletage du minerai de fer et des
 - aliments pour animaux

7 - Plasticité

formulation de mortier, mastic, adhésif et de certaines pâtes céramiques. absorbante et utilisée comme argile déshydratante (elle concurrence les gels de silice).

Mais la plupart des bentonites calciques extraites du sous-sol sont transformées en vue de la production de bentonite sodique artificielle et de bentonite activée à l'acide.

3.3 - Utilisations des bentonites sodiques (naturelles et artificielles)

Ces bentonites sont principalement utilisées pour leur pouvoir liant et leurs propriétés rhéologiques.

3.3.1 - Utilisations en fonction du pouvoir liant

Ces bentonites sont utilisées pour la fabrication de moules de fonderie et le bouletage du minerai de fer. Le pouvoir liant est en relation avec la surface spécifique élevée de ces argiles qui permet d'enrober des petites particules avec une faible quantité d'argile et, en présence d'eau, de lier l'ensemble en une masse rigide.

- Fabrication de moules de fonderie

La bentonite est utilisée pour lier du sable généralement siliceux. On obtient ainsi un mortier appelé sable de moulage contenant environ 8 % de bentonite et qui permet la réalisation de moules dans lesquels est coulé le métal en fusion (fonte, acier, métaux non ferreux, etc). Lorsque le métal est refroidi, le moule est désagrégé et les pièces sont récupérées (c'est le décochage). Le sable de moulage n'est généralement pas un sable neuf, mais le sable récupéré au décochage, envoyé dans un malaxeur où il est réhumidifié et dans lequel on ajoute 0,5 % environ de bentonite (correspondant à la bentonite détruite sur la bordure interne du moule en contact avec le métal en fusion et n'ayant plus de pouvoir de liaison).

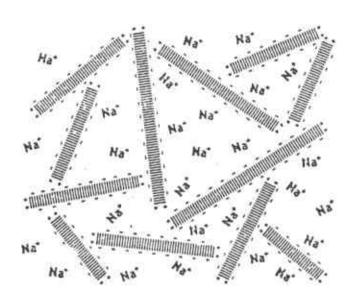
- Bouletage

Le bouletage du minerai de fer permet le traitement des minerais pulvérulents et des concentrés trop fins (minerais broyés et enrichis par flottation) pour être agglomérés sur grille. Les boulettes sont préparées par addition au minerai de 0,5 % à 1 % de smectite et de 8 - 10 % d'eau, puis cuites dans des fours vers 1250°c.

3.3.2 - Utilisations en liaison avec les propriétés rhéologiques

Les particules argileuses placées dans l'eau forment des suspensions aux propriétés rhéologiques remarquables. En effet, ces particules sont chargées négativement sur leur surface et positivement sur les bords. Si la suspension n'est pas trop riche en argile, ces particules s'orientent et constituent un gel (cf fig. 8). Si l'on agite ce gel, les faibles liaisons électriques se cassent et la suspension devient un fluide de haute viscosité. Cette propriété réversible, appelée thixotropie, est utilisée en forage et pour les travaux publics.

Figure 8 : Organisation en gel de particules de smectite sodique en suspension



- Boues de forage

La bentonite sodique est mise en suspension dans l'eau pour la confection de boues essentiellement destinées au forage rotary (recherche pétrolière). Grâce à sa viscosité élevée, cette boue transporte les cuttings vers la surface. En cas d'arrêt, elle constitue un gel qui empêche les cuttings et autres charges minérales entrant dans la composition de la boue (baryte) de s'accumuler au fond du forage.

Cette boue permet également de créer un revêtement étanche (cake), sur les parois du forage, de maintenir ces parois et de lubrifier l'outil de forage (trépan).

La bentonite sodique convient pour les suspensions en eau douce. Lors de la traversée de terrains salifères, il est nécessaire d'utiliser une boue saturée en sel à base d'attapulgite ou de bentonite dopée à l'aide de produits organiques (la bentonite seule flocule en milieu salé).

- Travaux publics

La bentonite sodique est principalement utilisée pour la création de fondations spéciales : au fur et à mesure du creusement d'une excavation, on

injecte une boue à la bentonite qui a pour effet de maintenir et d'imperméabiliser les parois (les particules provenant de l'extraction sont également maintenues en suspension). Le béton est ensuite injecté au fond de l'excavation par un tube préalablement bouché au plâtre. Lors de l'injection du béton, le tube remonte progressivement et la bentonite est pompée. Cette technique est utilisée par exemple, pour les fondations d'immeubles.

Lors de la création d'écran d'étanchéité (non surmontés par une construction), on utilise directement des coulis autodurcissables constitués par un mélange de bentonite et de ciment. Des enceintes imperméables sont ainsi réalisées à l'intérieur desquelles on peut creuser des fouilles, une fois la prise de ciment terminée (centrales nucléaires, écluses). Des panneaux préfabriqués peuvent être mis en place, ce qui permet d'avoir des parois moins épaisses et un mur propre (réalisation de parkings souterrains). Les coulis au ciment sont également utilisés pour stabiliser des terrains fissurés (injection dans des forages à maille régulière).

La bentonite est également utilisée pour la **réalisation de tunnels** en terrain perméable : la boue est injectée en avant du tunnelier, ce qui a pour effet de stabiliser les terrains (création d'un gel) et de permettre le marinage des déblais.

3.4 - Utilisations des bentonites activées par traitement acide

L'activation à l'acide des bentonites calciques a pour effet de remplacer les cations échangeables par H+ et d'éliminer une partie de Fe, Al, Mg présents dans le feuillet. Ce traitement a pour effet d'augmenter la surface spécifique et la porosité de ce minéral, d'où des capacités d'adsorption et d'absorption plus élevées et un pouvoir catalytique accru.

Ces bentonites activées à l'acide sont utilisées comme terres décolorantes pour :

- la décoloration des huiles et graisses végétales et animales destinées à l'alimentation ;
- la décoloration des huiles et graisses industrielles et des huiles minérales de lubrification (avant et après utilisation).

Les conditions de blanchiment sont généralement les suivantes : décoloration, sous vide entre 70 et 150°C et pendant 20 à 30 mn.

Ces bentonites sont également utilisées pour catalyser certaines réactions chimiques (alkylation des phénols) et pour favoriser la polymérisation, l'isomérisation et ajuster le pH de solutions.

3.5 - Utilisation de l'hectorite

L'hectorite en suspension dans l'eau présente des propriétés rhéologiques remarquables, supérieures à celles des bentonites sodiques classiques (thixotropie très développée). Elle est principalement utilisée pour la fabrication de peintures (ne coulant pas), cosmétiques, produits d'entretien, etc. Mais elle permet aussi la fabrication de produits organophiles.

Dans le gisement d'Hector en Californie, ce minéral est associé à de la calcite en forte proportion (50-75 % Ca CO3). Il est extrait de sa gangue par dispersion dans l'eau chaude, cyclonage et centrifugation. La société anglaise Laporte Industries fabrique également une hectorite synthétique appelée "Laponite".

3.6 - Utilisation des bentonites organophiles

Les bentonites organophiles plus connues sous le terme commercial de bentones sont généralement obtenues en échangeant les cations interfolaires présents à l'état naturel par des cations organiques. Après dispersion dans un liquide organique, les particules de smectite constituent un gel grâce au développement de liaisons hydrogène (cf. fig. 9).

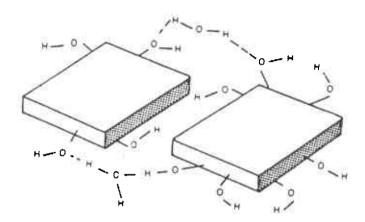


Fig. 9 - Création d'un gel par développement de liaisons hydrogène à partir de particules de smectite organophile (d'après Industrial Minerals, Sept. 1985)

Des matériaux de ce type peuvent être également obtenus par réaction de smectites avec des molécules organiques polaires qui remplacent l'eau à la surface des particules (d'après Grim et Güven, 1978)

Les bentonites organophiles sont généralement obtenues à partir de bentonite sodique naturelle (type Wyoming) ou d'hectorite. Les propriétés des produits obtenus sont similaires, mais influencées par la structure di ou trioctaédrique de ces minéraux et la taille des particules (surface spécifique des hectorites 20 fois plus forte que celle des bentonites Na). Ainsi, les gels obtenus à partir d'hectorite modifiée sont beaucoup plus visqueux que ceux à base de bentonite Na modifiée.

Ces matériaux entrent principalement dans la fabrication des peintures, encres, graisses, cosmétiques, produits pour lesquels les propriétés rhéologiques sont essentielles.

3.7 - Utilisations des bentonites blanches

La combinaison des caractéristiques classiques des bentonites et de la blancheur permet l'utilisation de ces matériaux dans des domaines particuliers : cosmétiques, détergents, céramiques, peintures, etc. En fonction des utilisations, ces matériaux sont simplement séchés ou broyés (plastifiants pour céramique) ou subissent un traitement d'épuration par lavage (cosmétiques).

3.8 - Utilisation de la saponite

Cette smectite magnésienne est utilisée principalement en forage. La présence de magnésium en forte quantité engendre une faible capacité d'échange de cations d'où une plus grande tolérance aux électrolytes et une plus grande stabilité thermique.

4 - CRITERES D'EXPLOITABILITE ET SPECIFICATIONS INDUSTRIELLES

4.1 - Principaux critères d'exploitabilité

4.1.1 - Critères liés au gisement

La distance entre le gisement exploitable et le lieu de consommation peut atteindre plusieurs milliers de km (bentonite du Wyoming utilisée dans le monde entier, par exemple). L'usine de traitement est située près du lieu d'extraction ou du lieu de consommation.

L'extraction des bentonites est généralement réalisée à ciel ouvert. Le taux de découverte D/E (rapport entre épaisseurs de la découverte et du niveau exploitable) peut être très élevé et dépasser 10. Ainsi dans la carrière de Redhill (Angleterre) exploitée par la Société Laporte, la découverte constituée par 40 m de sable argileux jaune à intercalations de bancs de grès, surmonte un niveau de bentonite de 3 m d'épaisseur.

Cette extraction peut être aussi réalisée en **galeries souterraines.** Cette technique a été employée en Angleterre (Bath) et en RFA (Bavière) et est encore utilisée dans certaines exploitations au Japon.

4.1.2 - Critères liés à la matière brute

Les bentonites sont des argiles essentiellement composées de smectite. La prospection de nouveaux gisements devra s'orienter généralement vers des matériaux ayant la composition suivante :

- <u>teneur en smectite</u> : 70 à 80 % minimum du tout-venant. Ce seuil pourra être abaissé pour des smectites rares : hectorite de Californie pouvant contenir entre 50 et 75 % de calcite.
- teneur en sable : 15 % maximum. Pour une utilisation en fonderie la teneur doit être inférieure à 12 % (sable > 20 microns) alors que pour le forage, elle ne doit pas dépasser 4 % (sable >74 microns).

- Teneur en carbonates : elle doit être inférieure à 2,2 % pour une utilisation en fonderie.
- Teneur en fer : elle doit être inférieure à 2 % Fe203 pour les bentonites blanches utilisées en céramique.

4.1.3 - Analyses et tests

4.1.3.1 - Composition des échantillons

Les principaux tests préliminaires à réaliser en vue de caractériser un échantillon de bentonite sont les suivants : mesure de la teneur en sable, calcimétrie, capacité d'absorption de bleu de méthylène, analyse minéralogique par diffractométrie de rayons X.

La capacité d'absorption de bleu de méthylène est une mesure très utilisée dans le domaine des bentonites. Le mode opératoire adopté par le BRGM est le suivant :

- verser l g d'argile séchée et broyée à 80 microns dans un bécher de 100 ml, ajouter 20 ml d'eau déminéralisée.
- acidifier la solution en versant 0,5 ml de H2SO4 5 N et agiter pendant 10 mn (agitateur magnétique).
- verser 2 ml d'une solution de bleu de méthylène à 3,74 g/l. agiter 5 mn, puis prélever une goutte de solution à l'aide d'une baguette de verre et la déposer sur un papier filtre.
- recommencer l'opération jusqu'à ce qu'une auréole de bleu de méthylène diffuse autour de la tache formée.
- quand l'auréole apparaît, redéposer une goutte de solution, après 2 mn d'agitation, pour confirmation. Si l'auréole persiste, le point de saturation est atteint. Si l'auréole ne persiste pas, ajouter l'ml de solution.

La capacité d'absorption s'exprime en mg de bleu de méthylène par g d'argile. Les smectites présentent une capacité très élevée par rapport à l'ensemble des autres types de l'argile. Elle est généralement comprise entre 180 et 220 mg/g pour les bentonites commercialisées (méthode BRGM).

Une autre technique consiste à ajouter une solution saturée de pyrophosphate à l'argile sèche pour améliorer la dispersion de l'argile, ce qui a pour effet d'augmenter la capacité d'absorption. Mais ce test n'a qu'une valeur comparative et doit toujours être réalisé de la même manière (vérification des résultats par analyse minéralogique aux rayons X.

4.1.3.2 - Tests physico-chimiques

Ces tests permettent non seulement de comparer les bentonites, mais aussi de définir la nature des cations échangeables (Ca ou Na).

- Test d'Enslin

La valeur d'Enslin est la capacité d'absorption d'eau maximale d'une bentonite mesurée par hydratation des échantillons pendant 24 h.:

Cette valeur varie de 200 à 300 % (bentonites calciques) à 500 - 1000 % (bentonites sodiques).

- Mesure de la teneur en colloïdes

10 g d'argile tamisée à 80 microns sont versés dans un bécher contenant 500 ml d'eau déminéralisée. Après agitation pendant l h, on laisse reposer 24 h. La suspension est ensuite siphonée et l'argile sédimentée au fond du bécher est séchée et pesée (soit P ce poids). La teneur en colloïdes est égale :

Elle varie de 15 à 30 % pour les bentonites calciques à 80-90 % pour les bentonites sodiques.

- Mesure du gonflement

Elle consiste à verser très lentement une poudre de bentonite dans une éprouvette contenant de l'eau déminéralisée (gonflement exprimé en ml/g bentonite).

Le gonflement des bentonites calciques est très faible (2 à 3 ml/g) et augmente très nettement pour les bentonites sodiques (12 à 15 ml/g).

- Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg comprennent la limite de liquidité (teneur en eau entre l'état liquide et l'état plastique) et la limite de plasticité (teneur en eau entre l'état plastique et l'état solide). La différence entre ces deux valeurs est appelé indice de plasticité.

Cet indice, généralement compris entre 70 et 100 pour les bentonites calciques, varie entre 300 et 600 pour les bentonites sodiques.

4.2 - Spécifications industrielles

4.2.1 - Utilisation en fonderie

Le Centre Technique des Industries de la Fonderie (CTIF) a établi une spécification technique qui recommande de mesurer :

- les teneurs en eau, en éléments de plus de 20 microns et en carbonates
- la capacité d'absorption de bleu de méthylène
- le rendement maximal à vert
- la résistance thermique à 400 ou 500°c.

Le <u>rendement maximal à vert</u> est mesuré sur des éprouvettes obtenues par malaxage de sable et de bentonite à différentes teneurs en eau. Il est égal à la résistance à la compression maximale divisée par le pourcentage de bentonite contenu dans le sable (exprimé en kPa/% d'argile).

La spécification du CTIF recommande les seuils de spécification suivants :

- teneur en éléments > 20 microns : 12 % maximum
- teneur en carbonates : 2,2 % maximum
- rendement maximal à vert : 20 kPa/1 minimum
- chauffage à 400-500°C : baisse du rendement < 20 %

Le CTIF recommande également de mesurer la **résistance à haute humidité** RHH (non pris en compte dans la spécification). Elle correspond à la résistance à la traction d'une éprouvette chauffée sur l'une de ses extrémités. La rupture a lieu dans la zone de recondensation de l'humidité. On considère que cette valeur est en relation avec l'apparition de certains défauts sur les pièces (gales). Cette résistance est généralement > 2 kPa pour les bentonites sodiques et < 1kPa pour les bentonites calciques (mélanges à 6 % bentonite, 2% eau et complément à 100 % pour le sable).

Certains industriels recommandent également de mesurer la **résistance au cisaillement**. Elle est matérialisée par le coefficient CH10 égal à la résistance d'un sable à 10 % bentonite exprimée en psi et multipliée par la teneur en eau de ce sable.

4.2.2 - Utilisation pour le bouletage du minerai de fer

Les boulettes fabriquées en vue de la réduction de certains minerais de fer (minerais pulvérulents ou concentrés fins) doivent présenter les principales caractéristiques suivantes :

Boulettes crues

. Taille uniforme (9-16mm), surface lisse et non collante

- . Résistance à la compression : 0,7 à 0,8 kg pour des boulettes de dimension $10-12,5\ mm$
- . Nombre de chutes d'une hauteur de 0,45 m avant rupture : 8 à 10
- . Résistance au choc thermique : les boulettes doivent résister à un choc thermique de 500°c.

Boulettes cuites

- . Résistance à la compression : 250 à 350 kg
- . Résistance à l'abrasion : teneur en fines < 5 mm produites après rotation, dans un tambour MICUM (0,25 m de large, l m diamètre, 25 t/mn). Elle doit être inférieure à 6 % après 100 tours et à 8 % après 200 tours.

Boulettes après réduction

. Gonflement : Si Fc, Fr, dc et dr sont les teneurs en fer et les densités apparentes des boulettes cuites et réduites, le gonflement est calculé de la manière suivante :

Il doit être inférieur à 0,10.

- . Résistance à la compression : 50 à 100 kg.
- . Résistance à l'abrasion : teneur en fines < 2 mm après 500 tours dans un tambour de 100 mm de diamètre. Elle doit être inférieure à 4 %.

4.2.3 - Utilisation en forage et travaux publics

4.2.3.1 - Rappels concernant la rhéologie

L'action d'une force exercée sur un fluide provoque un écoulement. En régime laminaire, dans lequel chaque lame de fluide se déplace parallèlement à la direction de l'écoulement, l'équation d'écoulement relie la tension de cisaillement τ et le taux de cisaillement Υ (ou vitesse de cisaillement ou de déformation).

Le taux de cisaillement Υ s'exprime en seconde $^{-1}$ (S $^{-1}$) et est égal à :

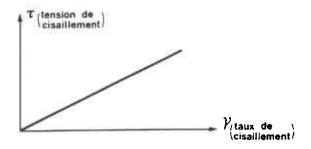
$$\gamma = \frac{dv}{dr} = \frac{\text{Différence de vitesse entre 2 lames voisines}}{\text{Distance entre les 2 lames}}$$

La tension de cisaillement τ s'exprime généralement en livres par 100 pieds carrés (ou baryes en système CGS) et est égale à la force appliquée par unité de surface de la lame qui provoque le cisaillement (pression).

Pour un taux de cisaillement donné, on définit la viscosité apparente µa généralement exprimée en centipoises (cP) :

$$\mu a = \frac{\tau}{\gamma}$$

Pour les fluides newtoniens (eau - gas oil) la tension de cisaillement est directement proportionnelle au taux de cisaillement :



La courbe est une droite passant par l'origine et le fluide se met en mouvement dès qu'une force supérieure à zéro lui est appliquée. Pour un tel fluide, µa est constant à température et pression constantes, la viscosité apparente est la viscosité réelle.

Mais les boues à base de bentonite ne sont pas des fluides newtoniens. Elles peuvent être généralement assimilées à des fluides binghamiens pour lesquels la tension de cisaillement varie aussi linéairement avec le taux de cisaillement. Mais à la différence des fluides newtoniens, il est nécessaire de leur appliquer une force minimale pour mettre le fluide en mouvement. Cette force correspond à la tension limite de cisaillement ou yield value ou yield point.

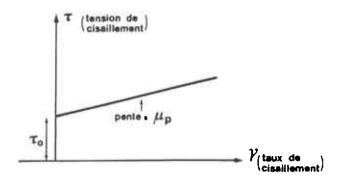
Ces fluides sont caractérisés par deux constantes :

το : tension limite de cisaillement qui correspond à la force minimale pour provoquer l'écoulement ;

 μp : viscosité plastique qui correspond au rapport de la variation de la tension de cisaillement à la variation correspondante du taux de cisaillement, autrement dit à la pente de la courbe représentant τ en fonction de Υ .

Théoriquement, l'équation d'écoulement est : τ = το + μρΥ

La courbe représentant cette fonction est, en coordonnées cartésiennes, une droite ne passant pas par l'origine.



Dans ce cas, la viscosité plastique µp est différente de la viscosité apparente µa qui n'est plus une constante.

4.2.3.2 - Techniques utilisées pour la détermination des caractéristiques d'une boue à base de bentonite

- Mesure de viscosité au viscosimètre Fann

C'est un appareil à cylindres coaxiaux permettant des mesures à différentes vitesses de rotation : le cylindre extérieur mis en mouvement par un moteur électrique, entraîne en présence de boue, un cylindre intérieur. On détermine en fonction du taux de cisaillement (déduit de la vitesse de rotation), la tension de cisaillement (déduite de la lecture de la graduation).

Cet appareil est conçu de façon à obtenir directement les paramètres suivants :

viscosité plastique μp = lecture Fann 600 t/mn - lecture Fann 300 t/mn (cP) vield value τ_0 = 2 ($\mu a - \mu p$) (livres/100 pieds carrés)

- mesure de viscosité à l'entonnoir de Marsh

On détermine le temps d'écoulement d'un volume de 946 cm3 de boue à travers un entonnoir normalisé rempli à 1,5 1.

- détermination du filtrate loss

La perte en eau sur filtre ou filtrate loss d'une boue est mesurée à l'aide d'un filtre-presse Baroïd. La boue est soumise à une pression de 7 bars dans un cylindre normalisé muni à sa base d'une plaque filtrante (surmontée d'un tamis et d'un papier filtre). Le filtrate loss est la quantité d'eau recueillie à travers cette plaque pendant une durée de 30 mn.

4.2.3.3 - Spécifications concernant les bentonites utilisées en forage pétrolier

Il existe deux spécifications pour les bentonites utilisées en forage pétrolier :

- la spécification américaine API (American Petroleum Institute) n°13 A (Décembre 1979);
- la spécification OCMA (Oil Companies Materials Association) n° DFCP 4 (Octobre 1973).

Les principales spécifications exigées pour les bentonites de forage par l'American Petroleum Institute sont :

- lecture au viscomètre Fann à 600 t/mn : 30 minimum
- yield value (Lb/100 ft2)) : 3 X viscosité plastique maximum
- filtrate loss: 13,5 cm3 maximum
- refus sur tamis de 200 mesh (74 microns) : 4,0 % maximum.

La viscosité Fann, la yield value et le filtrate loss sont mesurés sur une suspension de 22,5 g dans 350 cm3 d'eau distillée (6,4 g/100 ml). Les exigences formulées dans cette spécification engendrent un rendement minimum de 92 barils (14,6 m3) de boue de viscosité apparente 15 cp/t de bentonite.

Les principales spécifications exigées par l'OCMA pour les bentonites de forage sont :

- rendement minimal de 16 m3 de boue de viscosité 15 cP de bentonite :
- filtrate loss inférieur à 15 ml pour une boue contenant 7,5 g de bentonite/100 ml d'eau distillée.
- refus sur tamis de 200 mesh (74 microns) : 2,5% maximum.

Le rendement minimal de 16 m3/t correspond à une concentration maximale de 6,4 g de bentonite/100 ml d'eau (ce rendement est défini par des mesures de viscosité apparente à trois concentrations différentes).

4.2.3.4 - Spécification concernant les bentonites utilisées en travaux publics

Contrairement aux bentonites pour forage pétrolier, il n'existe pas de véritable spécification réglementant cette utilisation (chaque entreprise réalisant ces propres tests de laboratoire).

La société SOLETANCHE, principale société française spécialisée dans ce domaine, recommande la démarche suivante :

- mesures sur les boues à la bentonite

. Etablissement de la relation viscosité = f (concentration):
Une certaine quantité de bentonite est malaxée pendant 5 minutes dans un bécher de 5 litres contenant 2 litres d'eau (le malaxeur est un agitateur Turbotest de la société Rayneri équipé d'une turbine défloculeuse de diamètre 80 mm tournant à 1500 tours/minute).

La viscosité est ensuite mesurée à l'aide du cône de Marsh immédiatement, puis à l heure et 24 heures (la boue étant laissée au repos).

En opérant à différentes concentrations, on obtient des courbes viscosité = f (concentration) qui permettent (cf. fig. 9) :

- d'une part, de définir la concentration de bentonite nécessaire (rendement) pour l'obtention d'une viscosité de référence de 40 secondes pour l heure d'hydratation (5 minutes de malaxage + 55 minutes au repos);
- d'autre part de déterminer la vitesse de mûrissement de la bentonite, ce qui est très important sur le plan pratique pour définir la capacité de stockage nécessaire sur le chantier (en site urbain, on choisit souvent des bentonites à mûrissement rapide pour minimiser le nombre de cuves ou silos de stockage).

Les bentonites sont classées de la manière suivante en fonction du rendement R :

mauvaises bentonites R > 90 grammes/litre d'eau

bentonites moyennes 90 > R > 50 grammes/litre d'eau

bonnes bentonites R < 50 grammes/litre d'eau

. Filtrate loss

La boue est considérée comme bonne lorsque l'eau libre est inférieure à 20 ml et l'épaisseur du cake inférieur à 2.5 mm.

- Mesures sur les coulis bentonite-ciment

Au contact du ciment une boue de bentonite peut subir un épaississement très marqué, ne pas subir de variation de viscosité notable ou enfin se fluidifier.

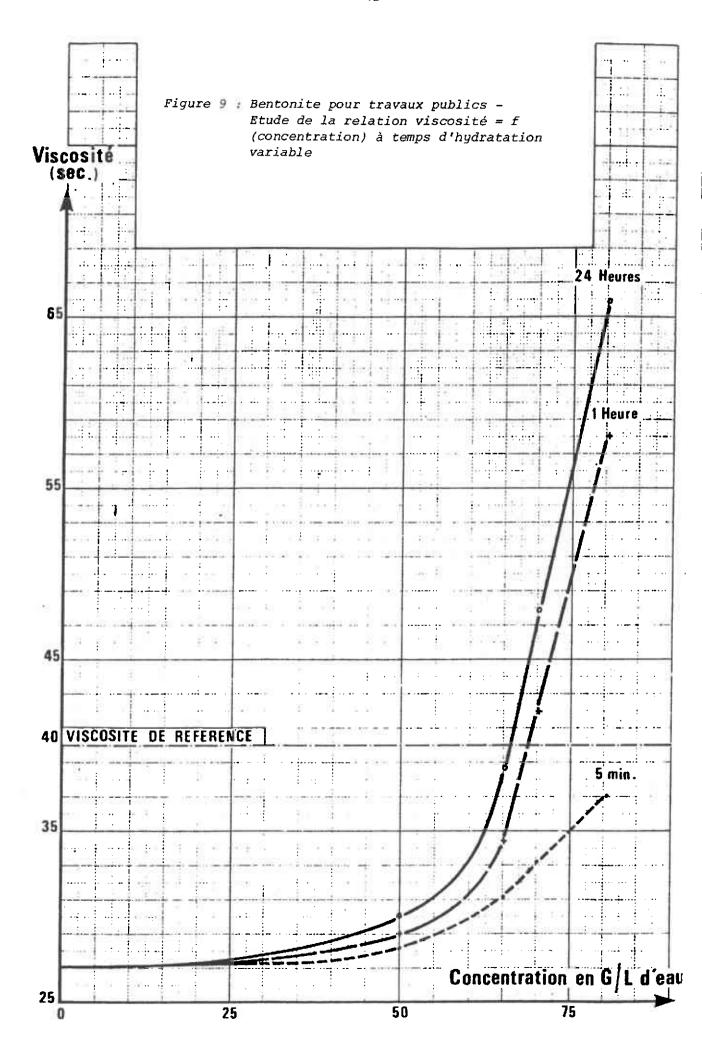
L'intérêt est évidemment d'être dans le premier cas (ce qui permet d'économiser de la bentonite) dans la mesure où cela ne conduit pas à un coulis trop rigide et pour lequel la ressuée soit trop importante (ce qui traduirait un caractère instable du coulis).

L'essai est le suivant : on part d'une boue hydratée pendant 1 heure et dont la viscosité Marsh est de 40 secondes, dans laquelle on ajoute 200 grammes de ciment par litre de boue en malaxant durant 5 minutes à l'aide du turbotest Rayneri tournant à 1 500 tours/minute.

On mesure ensuite la viscosité : celle-ci doit être de 38+/-2 secondes.

- Autres mesures

SOLETANCHE mesure également les viscosités apparentes et plastiques et la yield value (viscosimètre Fann) sur boues à la bentonite de viscosité Marsh 40 s après l h, ainsi que la rigidité à l h (boue à la bentonite) ou initiale (coulis bentonite-ciment) à l'aide d'un scissomètre à croisillons



(résultat exprimé en mg/cm2) et la ressurée finale du coulis (sur éprouvette de 1 1).

5 - MODES DE TRAITEMENT

5.1 - Fabrication de bentonite sodique

Le schéma-type d'une chaîne de fabrication de bentonite sodique artificielle à partir de smectite calcique brute est présenté sur la figure 10. Les principales phases du traitement sont les suivantes :

- alimentation de la chaîne de traitement

L'argile extraite est entreposée sur une aire de stockage (à l'air libre ou de préférence à l'abri des intempéries) de façon à être reprise par un chargeur pour alimenter l'installation.

Une trémie de réception (assurant en même temps un rôle de tampon) permet la distribution de la terre sur un brise-motte destiné à homogénéiser le calibre du tout-venant. Une épierreur peut être éventuellement nécessaire si la matière brute contient de gros éléments (fragments rocheux).

- activation

Selon la teneur en eau naturelle de l'argile brute, il sera éventuellement nécessaire de l'humidifier avant de procéder à l'activation, le matériau à traiter devant contenir environ 35 à 38 % d'eau (par rapport au poids humide). L'activation se fait à l'aide d'un doseur pondéral qui déverse le carbonate de sodium en poudre sur le matériau avant son entrée dans le malaxeur-extrudeur. Cet ajout a pour objet de permettre le remplacement des cations interfolinaes Ca++ par Na+. Le taux d'activation est généralement compris entre 3 et 4 % (par rapport au poids humide).

Séchage

L'humidité de l'argile activée doit être ramenée de 35/38 % à environ 13/15 % dans un séchoir rotatif. La température du four est généralement inférieure à 150°C.

- Broyage

Après ce préséchage, l'argile est réduite en poudre ($<80~\mu$) dans un broyeur ventilé (envoi d'un flux d'air chaud à 60° C) dans lequel l'humidité de l'argile est abaissée à une teneur comprise entre 8 et 12 %. Préalablement au broyage, il peut parfois être nécessaire de faire passer le matériau séché sortant du four dans un brise-motte, afin de faciliter cette opération.

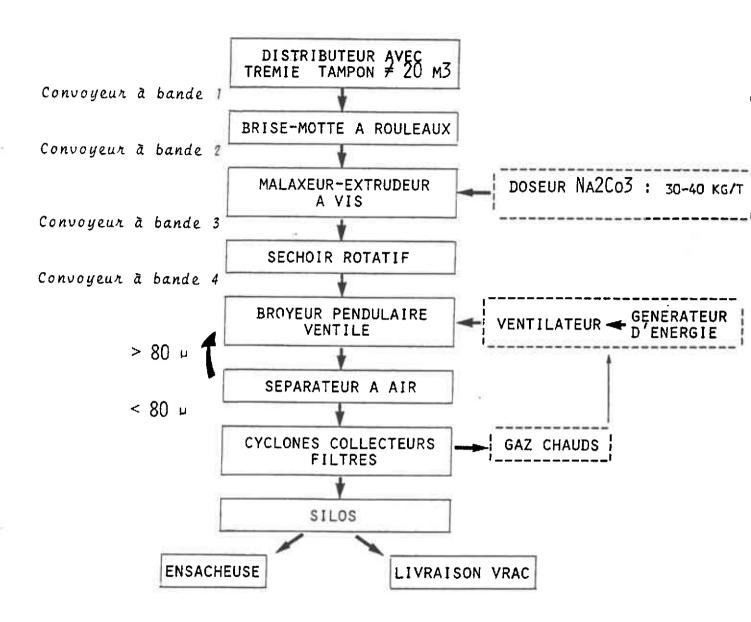


Figure 10 - Schéma-type de fabrication de bentonite sodique artificielle (d'après B. ROZES, 1980)

La teneur en eau résiduelle du produit broyé joue un rôle déterminant sur la qualité des bentonites. Elle ne doit pas être inférieure à 7-8 % . Mais d'après les utilisateurs, elle ne peut être supérieure à 12 % (fonderie), à 10 ou 15 % (selon spécifications API et OCMA pour forage). Sur le plan technique, cette teneur ne doit pas non plus être trop élevée pour pouvoir broyer l'argile dans de bonnes conditions.

- Stockage-conditionnement

L'argile broyée à la finesse requise est "sélectée" en sortie du broyage par un classificateur à air. La fraction supérieure à 80 μ est renvoyée au broyage alors que les particules inférieures à 80 μ sont aspirées par un système de cyclones et stockées dans des silos.

Les silos alimentent une ensacheuse qui permet le conditionnement du matériau en sacs de 50 kg. Une livraison en vrac par camion-citerne est également envisageable.

Le mode de préparation des bentonites sodiques naturelles est identique à celui précédemment décrit, mise à part la phase d'activation qui est supprimée.

5.2 - Pabrication de bentonite activée à l'acide

Le traitement de l'argile brute (bentonite calcique) commence par une mise en suspension. Cette suspension est alors soumise à l'action, d'un acide minéral, généralement HCl ou H2SO4.

On obtient ainsi une structure très poreuse avec une surface interne fortement augmentée : élimination des cations interfoliaires Ca++ et Na+ remplacés par H+ et élimination partielle de Al, Fe et Mg présents dans le feuillet.

La suspension acide résultant de l'activation est alors séparée dans des filtres-presses, puis le tourteau obtenu est débarrassé de l'excès d'acide par lavage.

Ce tourteau est ensuite **séché** (température inférieure à 120°C), broyé et tamisé. Les performances du produit obtenu sont fonction de la nature de l'argile, des conditions d'activation (type d'acide et concentration, température, durée, teneur en argile) et de la granularité du matériau après broyage.

5.3 - Fabrication d'argile déshydratante

Cette bentonite qui contient uniquement des ions Ca++ en position interfoliaire est obtenue à partir d'une bentonite calcique naturelle (ions Ca++ dominants, mais autres ions présents entre les feuillets). Ce produit est obtenu par mise en suspension de la bentonite à la concentration de 20g/l et ajout de sulfate de calcium à 2g/l.

5.4 - Fabrication de bentonite épurée (cosmétiques, pharmacie ...)

Exemple : chaîne de traitement de la société Expansia (1'Isle sur la Sorgue-France).

(trémie d'alimentation
TRAITEMENT	\ \\
	épierreur
PAR VOIE	< ₹₽
	laminage par 2 broyeurs à rouleaux
SECHE	45
	stockage
	47
TRAITEMENT	mise en suspension dans un trommel
	et élimination des éléments > 5 mm
PAR VOIE)
TAK VOIL	traitement acide pour éliminer
HUMTDE	les carbonates
ROMIDE	TES Carbonates
	cyclonages successifs pour élimination
	des éléments > 5 microns (5 % solide)
CONCENTRATION	₹
	classificateur à râteau (15 % solide)
	1
SECHAGE	centrifugeuse (25 % solide)
) ∜
	séchage et pulvérisation (passage dans un flux d'air
PULVERISATION	à 600 ° C)
	homogénéisation des conteneurs

5.5 - Fabrication de granulés absorbants (litières animales)

Un exemple de chaîne de traitement pour ce type de fabrication à partir de bentonite calcique a pu être observé dans l'usine de la société Laporte à Redhill en Angleterre :

- Concassage de l'argile brute au concasseur à mâchoires (mélange de plusieurs argiles) : production d'éléments de dimension 20 cm.

- séchage à 400°C dans un tambour rotatif : la chaleur provoque une désagrégation de la matière et la formation des granulés.
- tamisage pour production de granulés 2-8 mm représentant 70 % du matériau sortant du tambour (autres 30 % destinés au marché des pesticides et de la fonderie).
 - ensachage en sacs de 6 kg et mise sur palettes.

6 - PRODUITS DE SUBSTITUTION

La structure cristalline des smectites constituées de feuillets élémentaires de très petite dimension entre lesquels l'eau pénètre facilement est à l'origine des propriétés particulières (viscosité, thixotropie, plasticité, surface spécifique élevée ...) des bentonites. Ces propriétés particulières font que ce matériau ne peut pas généralement être remplacé par un autre minéral industriel dans de nombreux domaines d'utilisation.

6.1 - Utilisation en fonderie

Les sables utilisés pour la réalisation de moules de fonderie étaient auparavant des sables naturels contenant 8 à 25 % d'argile. Ces sables naturels ont été progressivement remplacés par des sables synthétiques : sable purs dans lesquels on ajoute de la bentonite. Mais la mise au point de nouveaux procédés de fabrication ne nécessitant pas de bentonite comme le "vacuum process" (moulage sous-vide du sable placé dans un film plastique) pourrait engendrer une baisse de la consommation de bentonite.

Des résines sont également utilisées pour lier le sable des noyaux (pièces en sable placées à l'intérieur des moules), mais ne sont pas utilisées pour la confection des moules.

6.2 - Utilisation pour le bouletage du minerai de fer et de la nourriture animale

De la chaux (Brésil) et du clinker (Suède) ont été utilisés en remplacement de la bentonite pour le bouletage du minerai de fer.

La bentonite utilisée comme liant de la nourriture animale peut également être remplacée par d'autres argiles (kaolin, argile kaolinique) ou des produits organiques (lignosulphonates). D'autres minéraux sont également utilisés dans ce domaine (talc, zéolites, carbonates ...) mais ne jouent pas le rôle de liant.

6.3 - Utilisations en forage et comme absorbants

Les seuls minéraux pouvant se substituer aux bentonites dans ces domaines sont les attapulgites et sépiolites. Ces argiles fibreuses dominent le marché des **absorbants** (litières animales, absorbants de sols industriels), et représentent une part relativement importante du marché des supports

phytosanitaires. Dans le domaine du **forage**, elles peuvent se substituer aux bentonites lors de la traversée de milieux riches en sel.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- Anonyme (1979) Manuel de rhéologie des fluides de forage. Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel. Editions Technip.
- Anonyme (1978) Bentonite, sépiolite, attapulgite, etc... Swelling markets for active clays. Industrial Minerals, Mars 1978. p. 49-91.
- Berton Y. et Le Berre P. Guide de prospection des matériaux de carrière.

 Manuels et méthodes n° 5 du BRGM.
- Broussaud A. (1977) Critères d'évaluation des concentrés de minerai de fer. Rapport BRGM 77 SGN 578 MIN.
- Clarke G. (1982) Bentonite a review of world production. Industrial Minerals, Oct. 82.
- Clarke G. (1985) Special Clays. Industrial Minerals. Sept. 85.
- Grim R.E. et Given N. (1978) Bentonites: Geology, Mineralogy, Properties and Uses. Developments in Sedimentology n° 24 Elsevier.
- Highley D.E. (1972) Fuller's Earth. Mineral Dossier n° 3. Mineral Resources Division. Institute of Geological Sciences. London
- Le Berre P. et Rozès B. (1981) -Vers l'existence de gisements de bentonite en France ? Prospection des argiles du Sparnacien dans l'Ouest du Bassin de Paris. Chronique de la recherche minière n° 460.
- Rozès B. (1980) Analyse de la formation des coûts des matériaux de carrière. Bentonites sodiques artificielles. Rapport BRGM 80 SGN 891 MTX.
- Trauth N. (1977) Argiles évaporitiques de la série carbonatée continentale et épicontinentale tertiaire. Mémoire n° 49. Sciences Géologiques Strasbourg.



ANNEXE:

LISTE DES PRINCIPAUX PRODUCTEURS DE BENTONITE (d'après revue Industrial Minerals, Oct. 82 et Industrial Minerals Directory, 1987)

Pays entreprises	Localisation des carrières et usines Utilisations	Capacité de production * (ou production) annuelle	Observations
AMERIQUE DU NORD CANADA Dresser Industries Inc.	carrière près de Rosalind (Alberta)	40 kt bentonite pour TP, fonderie, bouletage, forage	
Avonlea Mineral Industries Ltd	carrière et usine à Wilcox, Saskatchewan	60 kt de bentonite Na pour forage, fonderie, nourriture animale, traitement des eaux	
Pembina Mountain Clays	près de Morden,Manitoba	Bentonite Ca	Filiale de Filtrol Corp. Matériau broyé envoyé pour activation acide à Winnipeg
MEXIQUE Arcillas Industriales de Durango SA de CV	carrière à Cuencamé, Durango - usine à Gomez Palacio, Durango	180 kt d'argile brute 140 kt (120 kt en 1980) de produit fini	
Quimica Sumex SA de CV	carrières à Tlaxcala, Panotla — usine à Puebla	(42 kt) de terres décolorantes (Tonsil)	filiale de Süd-Chemie (RFA)
Technica Mineral SA	carrières dans les états de Zacatecas, Jalisco, Michoacan. Usine à Tlaquepaque, Jalisco	3 kt bentoníte	usine de traitement acide envisagée

 * Les chiffres donnés concernent généralement la capacité de production, les valeurs entre parenthèses donnent une estimation de la production annuelle

	autres usines de trai- tement (220 kt de capacité) dans Maryland Ohio, Illinois, Wisconsin, Indiana	racheté en 1987 à AIMCOR (Applied Indus- trial Materials Corp., société qui avait re- pris une partie des activités de IMC)	nombreuses filiales à l'étranger en particulier en Angleterre (Volclay - 100 %) et en Australie (Volclay-60 %)	filiales étrangères produisant de la ben- tonite en Italie et au Pérou notamment
(40 kt) argile brute	1 400 kt de bentonite sodique naturelle pour forage, bouletage, du minerai de fer, nour- riture animale, imper- méabilisation		300 kt de bentonite calcique pour fonderie, chimie, nourriture animale (Sandy's Ridge- Aberdeen) terres activées acides pour le traitement des huiles (Aberdeen)	900 kt à Colony bentonite Na naturelle pour forage
carrière souterraine à Linares	carrière et usine de bentonite Na à Belle Fourche (Sud-Dakota) Upton et Lovell (Wyoming), Malta (Montana)	carrière et usine de bentonite Na à Colony (Wyoming)	Sandy's Ridge (Alabama) et Aberdeen (Mississippi)	carrières et usine à Lovell et Colony (Wyoming)
Bentonite de Mexico Sa de CV (filiale IMCO Services - USA)	ETATS-UNIS American Colloïd Co	*/		NL Industries Baroïd

production de bentone à Honfleur, France, en liaison avec CECA-SA	exploitations à Rosalind (Alberta-Canada) et à Milos (Grèce)			joint-venture entre Black Hills Ben- tonite Inc. et IMCO Services.	
hectorite pour bentone	430 kt bentonite Na pour forage et bouletage minerai de fer	450 kt de bentonite Na pour bouletage minerai de fer, forage, fonderie nourriture animale	fonderie, bouletage terres activées acide	600 kt de bentonite Na pour forage et boule- tage du minerai de fer	500 kt de bentonite Ca pour absorbant
carrière et usine a Hector, Barstow, Californie	carrière et usine a Greybull, Wyoming	carrières et usines à Colony et Upton (Wyoming) usines à Burnett (Minnesota) et Glasgow (Montana)	carrière et usine de bentonite Ca à Aberdeen (Mississippi) carrière de bentonite blanche en Idaho (démarrage en 1987)	carrières près de Kaycee et Ten Sleep usines à Casper,Worland, Mills (Wyoming)	carrières et usines à Olmsted (Illinois), Paris (Tennessee),Oran, Bloomfield (Missouri)
	Dresser Industries Inc. (Magcobar Minerals)	Federal Ore and Chemical Inc. (IMCO Services-Halliburton Co)	International Minerals and Chemical Corp.(IMC)	Kaycee Bentonite Partnership	Lowe's Southern Clay (Division of Edward Lowe Industries)

Oil Dri Corp. of America	carrières et usines à Ripley (Mississippi) et Ochlocknee (Géorgie)	absorbants industriels litières, supports phytosanitaires	.argile exploitée en Géorgie composée de bentonite Ca et attapulgite (80/20). .a repris la carrière et l'usine de Ochlocknee de Anschutz Minerals Corp.
Mid. Florida Mining Co.	carrière à Marion County-usines à Lowell et Marion County (Floride)	200 kt argile brute 130 kt de granulés absorbants	argile brute consti- tuée d'un mélange de bentonite Ca et attapulgite
Southern Clay Products Inc. (filiale English China Clays)	carrière et usine à Gonzales (Texas)	30 kt de bentonite et bentone pour forage, papier, caoutchouc, plastiques bentonite blanche pour pharmacie, céramique	
Wilbur-Ellis Co	carrière à New-Indria et usines à Fresno et Florin (Californie)	50 kt pour nourriture animale, étanchéité	
Wyo-Ben Inc.	carrières et usines à Lovell, Greybull, Thermopolis (Wyoming)	750 kt (500 kt) pour forage, fonderie, bou- letage	
R.T. Vanderbilt Co Inc.	carrière à White Caps, près de Beatty (N.V.) usines à Norwalk (C.T.) et Murray (K.Y.)	bentonite blanche (produits Veegun) pour pharmacie, cos métique	

60 kt d'argile brute 12 kt de produit broyé pour forage, fonderie, bouletage	30 kt (12 kt)	200 kt (170 kt) de bentonite Na et Ca pour fonderie, forage, TP, bouletage, pharmacie	10 kt de terre activée acide	(10 kt) argile brute (6 kt) pour forage fonderie	(9 kt) pour fonderie, bouletage, nourriture animale, forage
carrière et usine près de Zapala, Neuquén	carrières près de Calingasta et usine à Chimba, San Juan	carrière et usine à Campina Grande, district de Boa Vista, PB	carrières près de Lima, usine à Callao	carrière à Piura, Vichayal - usine à Lima	exploitation de bento- nite Na à Piura, de bentonite Ca à Ica usine à Lima
AMERIQUE DU SUD ARGENTINE Geberovich Hnos SCC	Industrias Petral Srl	BRESIL Bentonit Uniao Nordeste SA (40 % Laporte Earths)	PEROU Natrogel SA (filiale Minera Baribent)	Minerales Andinos SA (filiale NL Industries)	Cia Minera Agregados Calcareous SA (Comasca)

EUROPE DE L'OUEST			
FRANCE	-		
CECA SA	carrière près du Buisson (24), usines à Honfleur (14), Port-la- Nouvelle (11) et au Buisson	80 kt de bentonite Na et Ca pour fonderie forage, TP, bentone, argiles déshydratantes	filiale en Italie CECA Italiana Spa
Société Française des bentonites et Dérivés (filiale Süd-Chemie)	carrière près de Gisors (27), usines au Tréport (76) et à Apt (84)	80 kt de bentonite Na et Ca pour fonderie, forage, TP	
RFA			
Süd-Chemie AG	carrières près de Freising, Mainburg et Landshut, usine à Moosburg (Bavière)	500 kt environ de ben- tonite Na artificielle 100 kt de terre activée acide	leader européen- nombreuses filiales au Mexique, Italie, France) a racheté en 1986 l'usine American Colloïd de Duisbourg
Erbslöh Geisenheim Gmbh and Co.	carrières et usines à Landshut (Bavière)	100 kt de bentonite Na et Ca principalement pour fonderie	
GRECE			
Mediterranean Bentonite Co Ltd. (filiale Laviosa, Italie)	carrière sur l'île de Milos	300 kt argile brute	argile traitée à Livourne

ute	e Na ur			ute	nt.	ben- rage,	ute our e	ute ute
50 kt d'argile brute	30 kt de bentonite Na principalement pour forage	40 kt	40 kt bentonite Na	15 kt d'argile brute	25 kt bentonite Na	100 kt (55 kt) de ben- pour fonderie, forage, TP, bouletage	60 kt d'argile brute 50 kt bentonite pour fonderie et forage	10 kt d'argile brute 10 kt d'argile brute
carrières en Sardaigne	carrières à Mandas et Trexenta, usine à Cagliari (Sardaigne)	carrière et usine à Torrabla (Sardaigne)	carrières à Nurallao, et Giba, usine à Sant Antioco	carrière à Arsiero, Vicenza	carrière et usine à Pietracuta di S. Leo, Pesaro	carrière et usine à Giba, Sardaigne	carrière et usine à Maglio di Sopra	carrière à Recoara carrière à S. Giovanni
CECA Italiana SpA (filiale CECA, France)	Edemsarda SpA.	Sardamin Srl	Baroïd International SpA (filiale NL Industries)	Elba SpA	Stà Mineraria Estrat- tiva Srl.	Süd-Chemie Italia SpA (filiale Süd-chemie)	Valdol SpA	

ESPAGNE			
Minas de Gador SA. (filiale de Laporte G.B.)	carrières de bentonite Ca à Nijar (Almeria), à Campoamoi et Yuncos (Madrid)		
	carrière de saponite à Esqunias (Tolède) usine à Almería	90 kt bentonite forage, fonderie nourriture animale (12 kt de bentonite activée acide)	accord avec TOLSA : Minas de Gador ; bentonites;TOLSA : sépiolites, attapulgites
	usine à Yuncos (Madrid)	30 kt de bentonite pour fonderie et nourriture animale	
Bentonitos Especiales SA		bentonite pour nourriture animale	
GRANDE-BRETAGNE Laporte Industries	carrières et usines à Redhill (Surrey), Baulking (Oxforshire) usine à Widnes, (Cheshire) autres gisements à Maidstone (Kent), Bath, Avon, Clophill, (Bedfordshire)	250 kt de bentonite pour fonderie, forage, TP, nourriture animale litières pour chats 30 kt de bentonite activée à l'acide pour raffinage des huiles	filiales en Espa- gne (Minas de Gador 100 %) au Brésil, (Bentonite União Nordeste, 40 %), en Australie (Volclay standard Pty Ltd, 40 %) . produit de l'hectorite synthétique (Laponite)

Steetley Minerals Ltd	carrière et usine à Woburn Sands (Bedfordshire)	50 kt de bentonite Ca et Na pour fonderie, forage, TP, litières animales	
	usine à Middlesborough (Cleveland)	traitement de bentonite américaine, de Grèce et d'Italie	
Anglomin Ltd	usine à Redruth (Cornwall) carrière à Balikesir (Turquie)	production de bentonite blanche	
EUROPE DE L'EST			
CHYPRE			
Bentex Minerals Co Ltd	carrière à Troulli, Larnaca	15 kt d'argile brute	la création d'une usine de bentonite activée Na est envisagée
Drapia Mining Co. Ltd	carrière et usine près de Drapia, région de Kalavasos, Larnaca	70 kt de bentonite Na pour fonderie, forage TP	argile brute vendue pour nourriture animale. Autres gisements mis en évidence à Parsata.
Peletíco Ltd	carrière et usine à Pentakomo, Limassol, usine à Larnaca	150 kt de bentonite pour forage, TP, nourriture animale et absorbant	

Esan - Eczacibaşi Industrial Minerals Co Industrial Minerals Co Kale Muhendislik Kayaç Industrial Raw Materials and Materials and Materials and Materials As Madenleri Aş Turan Madencilik C Sanayi ve Ticaret Ltd B AFRIQUE	carrière à Unye et Fatsa (région de la Mer Noire) carrière et usine à Resadiye carrière de bentonite blanche à Kepsut, Balikesir	bentonite blanche (55 kt) d'argile brute pour production de bentonite Ca et Na naturelle (30 kt) d'argile brute pour fonderie, forage, absorbant 5 kt d'argile brute activée acide ou traitée Na.
	carrières à Mostaganem et Marina	40 kt

MAROC			
Cie Marocaine des Barytes (COMABAR)	carrière de bentonite blanche à Trebia, Nadar usine à Safi City	120 kt pour fonderie forage, pharmacie	
Morocco Minerals Co	carrière à Afrah-Hiddoun usine à Beni Anser, région de Nador	25 kt (10 kt) pour fo- rage et fonderie	
AFRIQUE DU SUD			
Cape Bentonite (Pty) (filiale de Cullinan Minerales Ltd)	carrière et usine à Heidelberg, Southern Cape (bentonite Na naturelle)	36 kt (24 kt) de bento- nite pour fonderie, bouletage, forage. 5 kt de terre décolo- rante pour raffinage des huiles	
G et W Base & Indus- trial Minerals (Pty) Ltd	carrière à Koppies, Northern Orange Free State. Usine à Wadeville, Germinston Transvaal	bentonite Na et Ca	
MOZAMBIQUE			
Luzinada Umbeluzi Mina Ldce		1,5 kt	

Corp. Ltd. (filiale Tanzania State Mining Corp.) ISRAEL Ltd. IRAN	carrière à Sinya, près d'Arusha carrière (souterraine) à Makhtesh Ramon carrières à Mehrjan	pour fonderie, TP, forage 10 kt de bentonite pour nourriture animale 50 kt (25 kt) pour	bentonite impure (60 % smectite, 20 % illite, 20 % kaolinite)
iran Barite Co ASIE-OCEANIE INDE Industries Ashapura Minechem Pvt Ltd	(Ispahan) et Waramin (Téhéran) carrières à Kutch et Bhavnagar, usines à Bhavnagar et Gandhidam (état de Gujarat) carrières et usines à Bhuj, Kutch, Bhavnagar (état de Gujarat) — Bentonite Na naturelle	forage, céramique bouletage 60 kt (50 kt) bentonite Na pour forage, fonde- rie, bouletage, TP, insecticides	

Wree Mfg Co Sons t Ltd & Sons Minerals terals chemical Works Shemical ss Ltd/ lextile	carrières et usines à 3,3 kt (2,2 kt) bento-Sewree, Bombay et nite activée à 1'acide Vapi, état de Gujarat pour raffinage des huiles	carrière à Kutch, état pour forage de Gujarat	carrières à Kutch et 20 kt (12-15 kt) de Gandhidam, usine à bentonite Na pour fon-Gandhidam derie, forage	carrière à Bhavnagar, 20 kt bentonite état de Gujarat	carrières à Sherdi, Hamla, 40 kt (18 kt) de ben- Vandh, Saran (Kutch) usines à Kutch-Mandvi, Gandhidam, état de Gujarat	carrières dans le dis- 25 kt de bentonite Na trict de Barmer, usines pour fonderie, TP, à Barmer et Jodhpur - forage Rajasthan	carrières à Dera Ghazi 1,5 kt (1,1 kt) pour Khan Campbellpur chimie, traitement des (Punjab), Shah - ra - huiles
Bombay Se Chemicals Pvt Ltd Gandhi & Gimpex Pv Gimpex Pv Kutch Min Kasmali Kashmir (Industrie Qureshi 1	carrières e Sewree, Boml Vapi, état	_	ind .	Kasamali & Sons Minerals carrière à Bhavn état de Gujarat	Kutch Minerals Vandh, Saran (Ku usines à Kutch-M Gandhidam, état de Gujarat	Neelkanth Chemical Works trict de Barmer, à Barmer et Jodh Rajasthan	Kashmir Chemical carrières à Dera Ghaz Industries Ltd/ Khan Campbellpur Qureshi Textile (Punjab), Shah - ra -

JAPON			
Hojun Kogyo Co Ltd	carrières à Myogi (Kanra), Kami-Kuroiwa (Tomioka), Gobara (Annaka)	180 kt (130 kt) de bentonite pour fonderie TP, agriculture	carrière souterraine à Myogi. Principale so- ciété productrice de bentonite au Japon (produit de la ben-
	usines à Nakajuku et Haraichi (Annaka, Gunma Préf.)		tonite organophile)
Kunimine Industries Co Ltd	carrières à Ohé-Cho (Nishimurayama-gun, Yamataga Préf.), Ka- Kawasaki-cho (Shibata-gun, Miyagi	160 kt (140 kt) de ben- tonite Na et Ca pour forage, fonderie, construction	carrière souterraine à Ohé-Cho
	rrei.), zao-cho (Katta-gun, Miyagi Préf.) usines à Ohe-Cho et Zao-Cho		

Mizusawa Industrial Chemicals Ltd	carrières à Tsuruoka (Yamagata, Nakajo et Shibata (Niigata) usines à Tsuruokoa et Nakajo	160 kt (140 kt) de bentonite principa- lement des terres activées acides pour le raffinage des huiles, mais aussi des produits floculants pour le traitement des eaux, les papiers auto- copiants, les caout- choucs	cette société possède une usine d'activation acide de 40 kt de capacité
Nippon Kasseihaduko	carrières à Oomi, Oodate, Shibata usine à Taumi, Omi- Machi, Niigata Préf.	30 kt (25 kt) de bentonite activée acide et activée NHK pour le raffinage des huiles et du pétrole. 6 kt (5 kt) de bentonite Ca pour la pharmacie. 1 kt (0,05 kt) de bentonite organique	
PHILIPPINES Filmag (Philippines) Inc	carrière et usine à Merida, Leyte	40 kt de bentonite brute traitée pour fonderie, forage, TP	

AUSTRALIE			
Cudgen RZ Ltd	carrières à Miles, Qld usine à Miles et Brisbane, Qld (bentonite Na naturelle)	50 kt bentonite Na pour fonderie, TP, nourri- ture animale, boule- tage minerai de fer	
NOUVELLE-ZELANDE Canterbury Bentonite Ltd (filiale, Mintech NZ Ltd)	carrière et usine à Coalgate, Canterbury Plains	(20 kt, 4 kt) pour forage, fonderie TP	
INDONESIE Perusahaan Daerah Kerta Pertambangan (West Java Mining Entreprise)	carrière et usine à Tasikmalaya Karangnungall, Usine à Garut	(7 – 8 kt) bentonite Ca	