

MINISTÈRE DE DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL ET SCIENTIFIQUE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

74, rue de la Fédération, 75 Paris (15^e) – Tél.: (1) 783.94.00

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 – 45 Orléans (02) – Tél.: (38) 66.06.60

PRINCIPALES MATIÈRES PREMIÈRES UTILISÉES DANS L'INDUSTRIE CÉRAMIQUE

**Cours de perfectionnement pour les techniciens et
agents de maîtrise des industries céramiques**

C. JAVEY



**Département GÉOTECHNIQUE
Service substances minérales utiles**

71 SGN 028 BGA

Orléans, décembre 1970

R E S U M E

=====

Ce cours a été établi à la demande de l'Institut de céramique française pour contribuer au perfectionnement des techniciens et agents de maîtrise des industries céramiques.

Dans la première partie, les différentes matières premières utilisées (matériaux plastiques, fondants, dégraissants, réfractaires) sont étudiées aux points de vue minéralogique, génétique et gîtologique.

Dans la deuxième partie sont exposées les étapes successives d'une prospection, depuis les études documentaires à l'amont jusqu'à l'étude détaillée d'un gisement à l'aval, et les méthodes employées.

Dans la troisième partie, enfin, sont décrites les principales méthodes d'exploitation à ciel ouvert et souterraine.

Ce cours ne contient que des notions assez simples et élémentaires: il ne s'adresse pas à des spécialistes mais peut intéresser les techniciens du BRG dans le cadre de leur formation professionnelle.

Peut-être, aussi, les ingénieurs et géologues qui se sont spécialisés dans d'autres disciplines y trouveront-ils un rappel de notions lointaines ou même oubliées.

S O M M A I R E

	Pages
<u>1ère PARTIE</u> : MINÉRALOGIE, GÈNESE ET CONDITIONS DE GISEMENT, LOCALISATION.....	1
1 - MATÉRIAUX PLASTIQUES.....	2
1.1. MINÉRAUX ARGILEUX.....	2
1.2. FORMATION DES GISEMENTS D'ARGILES.....	4
1.3. LOCALISATION DES GISEMENTS D'ARGILES.....	4
2 - MATÉRIAUX FONDANTS.....	6
2.1. MINÉRALOGIE.....	6
2.2. GISEMENTS.....	6
3 - MATÉRIAUX DÉGRAISSANTS.....	7
4 - MATÉRIAUX RÉFRACTAIRES.....	8
4.1. MINÉRAUX MAGNÉSIENS.....	8
4.2. SILICATE D'ALUMINE.....	9
<u>2ème PARTIE</u> : PROSPECTION.....	10
1 - ÉTUDE DOCUMENTAIRE.....	11
2 - RECONNAISSANCE GÉOLOGIQUE SUR LE TERRAIN.....	12
3 - PROSPECTION PROPREMENT DITE.....	13
3.1. MÉTHODES GÉOPHYSIQUES.....	13
3.2. FORAGES MÉCANIQUES.....	15
4 - ÉTUDE DÉTAILLÉE DU GISEMENT.....	18
5 - CONCLUSION.....	20

	Pages
<u>3ème PARTIE : METHODES D'EXPLOITATION.....</u>	21
1 - EXPLOITATION A CIEL OUVERT.....	22
1.1. DECOUVERTURE.....	22
1.2. EXTRACTION DES FORMATIONS UTILES.....	22
1.3. REPRISE - CHARGEMENT - TRANSPORT.....	23
2 - EXPLOITATION SOUTERRAINE.....	25

1ère P A R T I E

MINÉRALOGIE, GÈNESE ET CONDITIONS DE GISEMENT, LOCALISATION

Pour la confection de ses pâtes, l'industrie céramique fait appel à des matières premières très variées qui peuvent être classées en quatre catégories :

- matériaux plastiques,
- matériaux fondants,
- matériaux dégraissants,
- matériaux réfractaires.

1 - MATERIAUX PLASTIQUES

Ce sont essentiellement les argiles. Les argiles sont des roches constituées de minéraux essentiels qui sont les minéraux argileux, associés à des minéraux accessoires et à des impuretés diverses.

1.1. MINERAUX ARGILEUX

Du point de vue minéralogique, les minéraux argileux sont des silicates d'alumine hydratés, parfois plus ou moins magnésiens ou ferriques, parfois légèrement calciques et même alcalins. Ils sont classés en plusieurs groupes dont deux seulement nous intéressent, car ils contiennent les principaux constituants des argiles utilisées couramment dans l'industrie céramique.

1.1.1. Groupe de la kaolinite qui comprend :

- la kaolinite : $(Si_2)(Al_2)O_5(OH)_4$ - blanche quand elle est pure ;
- la dickite et la nacrite - Ces minéraux sont rares. Ils ont la même formule que la kaolinite et ne diffèrent de celle-ci que par la structure de leur réseau ;
- l'halloysite : $(Si_2)(Al_2)O_5(OH)_4 + H_2O$. Elle renferme une molécule d'eau supplémentaire.

Ces minéraux sont donc alumineux. Ils possèdent une structure en feuillets à deux couches, les feuillets étant séparés par des couches d'eau dans le cas de l'halloysite.

Ils proviennent de l'altération météorique mais surtout hydrothermale (d'origine profonde) de divers silicates alumineux, en particulier, les feldspaths des roches granitiques acides.

1.1.2. Groupe des micas parmi lequel on ne retiendra que les illites appelées aussi quelquefois bravaisites.

Ce sont des minéraux alumino-magnésiens, potassiques et parfois calciques et ferreux. La formule structurale est une formule variable, c'est pourquoi on parle des illites. Ils sont surtout caractérisés par la présence de potassium. Ils ont une structure en feuillets à 3 couches et la formule générale peut s'écrire : $(\text{Si}_{3,6} \text{Al}_{0,4} \text{O}_{10}) \text{Al}_2 \text{K}_{0,4} (\text{OH})_2$.

Les illites sont les minéraux argileux les plus répandus dans la nature et caractérisent surtout les milieux marins.

1.1.3. Citons enfin, pour mémoire, le groupe de la montmorillonite qui renferme des minéraux alumineux, magnésiens et ferreux et qui sont souvent associés aux précédents dans les roches argileuses.

On désigne généralement les argiles du nom du minéral argileux essentiel qui les constitue. On distingue ainsi :

- les kaolinites ou argiles kaolinitiques. Le type en est le kaolin, argile constituée uniquement de kaolinite ;
- les illites, argiles illitiques ;
- les montmorillonites (ou bentonites), argiles montmorillonitiques.

Mais, dans la nature, les argiles sont le plus souvent constituées d'un mélange de plusieurs minéraux argileux. On parlera alors d'argiles mixtes, par exemple kaolino-illitiques ou illito-kaolinitiques, suivant que la kaolinite ou l'illite constitue le minéral dominant.

Du point de vue de l'industrie céramique, on distingue :

- les argiles réfractaires, utilisées dans la fabrication des réfractaires silico-alumineux. Ce sont des argiles essentiellement kaolinitiques, riches en alumine (25 à 45 %) et renfermant peu d'alcalins. Elles peuvent prendre des colorations diverses.

- Argiles pour produits blancs (porcelaine, faïence fine, vitreous). La nécessité de cuire blanc impose des teneurs en Fe_2O_3 inférieures à 1 % ce qui est très rare dans la nature. Ce sont des argiles généralement kaolinitiques, mais moins riches en alumine et plus riches en silice que les précédentes. On les utilise en mélange avec le kaolin. Leur rôle est surtout d'augmenter la plasticité de la pâte, le kaolin seul étant peu plastique.

- Argiles pour produits grésés elles doivent être naturellement grésantes, c'est-à-dire renfermer des fondants (alcalins et alcalino-terreux) et de préférence plastiques, la coloration étant indifférente. Ce sont le plus souvent des argiles mixtes, illito-kaolinitiques.

- Argiles pour produits de terre cuite et faïences communes. Ce sont des argiles de type extrêmement varié, généralement impures, mais renfermant le plus souvent un fort pourcentage d'illites.

1.2. FORMATION DES GISEMENTS D'ARGILES

La genèse des argiles fait appel à des processus variés et souvent complexes.

1.2.1. Certaines argiles résultent de la simple désagrégation mécanique de roches argileuses préexistantes (schistes ou marnes par exemple).

1.2.2. D'autres constituent le résidu d'une altération chimique sous l'action des agents atmosphériques (altération météorique) ou sous l'action de solutions hydrothermales. On peut y trouver des minéraux argileux hérités de la roche mère et non transformés, associés à des minéraux argileux transformés et à des minéraux argileux néoformés, c'est-à-dire, synthétisés à partir des éléments libérés par l'altération. La nature des produits argileux formés dépend de la nature de la roche mère et des conditions climatiques et de drainage :

L'altération des roches silico-alumineuses donnera des argiles résiduelles à base d'illite et de montmorillonite en climat aride et milieu mal drainé, alors que la kaolinite prédominera en climat tropical et milieu bien drainé.

Les roches carbonatées donnent, dans les pays méditerranéens, des argiles de décalcification essentiellement kaoliniques (argiles à silex du B.P.).

1.2.3. Les argiles d'origine résiduelle qui se sont formées au cours des temps géologiques ont été érodées à différentes reprises, transportées par les eaux courantes et sont venues s'accumuler sur le fond des lacs et des mers. Ces dépôts constituent les argiles sédimentaires détritiques.

1.2.4. Quelquefois, les minéraux argileux peuvent prendre naissance par précipitation chimique à partir des éléments dissous apportés dans les bassins de sédimentation par les rivières. Il s'agit alors d'argiles sédimentaires de néoformation.

1.2.5. Enfin, des transformations et des néoformations de minéraux argileux peuvent encore se produire postérieurement au dépôt des sédiments, au cours de leur diagenèse (transformation en roche des sédiments nouvellement déposés). Il s'agit des argiles de diagenèse.

1.3. LOCALISATION DES GISEMENTS D'ARGILES

1.3.1. Kaolins : Les kaolins proviennent essentiellement de l'altération, dans certaines conditions, des feldspaths contenus dans les roches granitiques acides. Deux types de gisements se rencontrent :

- gisements "*in situ*" : la roche est altérée sur place, sur une épaisseur parfois considérable. La masse altérée est friable

bien que la structure de la roche originelle soit encore conservée. Le kaolin doit être séparé des restes des minéraux qui constituent la roche. Pour que l'opération soit rentable, il faut qu'on puisse extraire de la roche altérée au moins 25 % de fraction kaolinique inférieure à 40 microns.

De tels gisements existent et sont exploités en France dans le Massif Central : Mouhet-Lourdoueix (Indre), St-Yrieix (Haute-Vienne), Echassières (Allier), Haute-Rivoire (Rhône), Douévas-Larnage (Drôme) ; aussi et surtout dans le Massif Armoricain : Berrien (Finistère), Quessoy, Plémet (Côtes-du-Nord), Séverac, Châteaubriant (Loire-Atlantique), Ploemeur (Morbihan).

- Gisements sédimentaires : les roches granitiques kaolinisées ont été érodées. Leurs éléments constitutifs ont été balayés, transportés par les eaux courantes et se sont déposés dans des bassins fluviaux, lacustres ou fluviolacustres, au voisinage des massifs précédents. Quelquefois, le kaolin, au cours de son transport, a subi une lévigation naturelle, ce qui a permis le dépôt de kaolins-sédimentaires d'une grande pureté : Neuvic, Les Eyzies (Dordogne). Mais, le plus souvent, on le trouve associé dans les gisements sédimentaires avec d'autres minéraux détritiques (quartz, micas etc.) l'ensemble formant des sables kaoliniques. De tels gisements existent en bordure du Massif Central à Tournon-St-Martin (Indre), Decize, Livry, Fleury (Nièvre), Hostun, Barbières, Beauregard (Drôme).

Argiles kaoliniques-Argiles réfractaires. Ce sont des argiles généralement d'origine détritique et leur mode de formation est tout à fait comparable à celui des kaolins sédimentaires. Elles apparaissent dans les séries sédimentaires lorsqu'un massif ancien altéré est soumis à une érosion intense (due à un soulèvement par exemple). La kaolinite est entraînée et va s'accumuler dans les eaux calmes de cuvettes lacustres ou lagunaires avoisinantes pour donner des gisements de qualités variables suivant la nature et l'importance des impuretés : Bassin de Provins, Bassin des Charentes. C'est donc en bordure des mères anciens, dans le prolongement des zones de drainage, qu'il convient de rechercher les argiles kaoliniques.

Argiles illitiques. Elles se rencontrent dans les séries sédimentaires de caractère lagunaire, en association avec des dolomies, du gypse, du sel (Trias par exemple). Elles caractérisent également le milieu de sédimentation marin au sein duquel elles peuvent en outre, se former directement par précipitations chimiques. C'est dire qu'on peut les rencontrer dans presque toutes les formations géologiques sédimentaires où elles forment des séries parfois très épaisses (marnes du Lias par exemple).

Les argiles mixtes. Ces dépôts se constituent lorsque les rivières apportent dans les vallées ou les bassins de sédimentation des matériaux argileux d'origine cosmopolite. Ils renferment à la fois kaolinite, illite, montmorillonite et d'autres minéraux phylliteux (micas). Les argiles marines les plus communes et les argiles d'alluvions quaternaires sont de ce type. Les gisements sont donc extrêmement nombreux dans tout le domaine des terrains sédimentaires.

2 - MATERIAUX FONDANTS

Ce sont des matériaux ayant un point de fusion assez bas. Leur rôle est d'allonger le palier de vitrification de la pâte céramique en abaissant son point de vitrification sans abaisser son point de fusion.

L'industrie céramique utilise des fondants de nature variée. Nous n'insisterons que sur le fondant le plus employé et le plus recherché : le feldspath.

2.1. MINERALOGIE

Les feldspaths sont des aluminosilicates alcalins ou alcalino-terreux comprenant de nombreuses variétés. Tout feldspath est constitué par trois composants bien définis, constituant les pôles d'un diagramme triangulaire et qui sont :

l'orthose $(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8\text{K}$

l'albite $(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8\text{Na}$

l'anorthite $(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8\text{Ca}$.

L'industrie céramique recherche surtout les feldspaths potassiques : orthose, microcline : $(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8\text{K}$ qui possèdent un palier de viscosité assez large (1 200-1 400°). Mais l'albite $(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8\text{Na}$ peut être également utilisée. En fait, dans la nature, on a presque toujours affaire à des feldspaths potassico-sodiques ou sodo-potassiques et plus rarement aux espèces pures.

2.2. GISEMENTS

Le feldspath est un des constituants essentiels des roches cristallines et cristallophylliennes. La plupart du temps, on le rencontre en cristaux de dimensions modestes, noyé au milieu des autres constituants de la roche (quartz, micas, ferromagnésiens). Son extraction nécessite alors un traitement délicat et très onéreux dont la mise au point n'est pas encore suffisante pour en envisager l'application au stade industriel. Cependant, certaines roches éruptives, telles que les granites, alcalins et les pegmatites sont constituées de cristaux bien individualisés et souvent de grande dimension. Certaines sont particulièrement riches en feldspath et pauvres en minéraux ferromagnésiens. Ce sont ces roches qui fournissent l'essentiel du feldspath produit en France.

Elles se présentent en filons ou en amas d'extension variable, encaissées dans les séries cristallophylliennes.

On trouve des granites alcalins et des pegmatites dans toutes les régions granitiques mais, actuellement, les exploitations sont localisées essentiellement dans le Massif Central et dans les Pyrénées.

Les feldspaths sodiques sont abondants surtout dans les Pyrénées : Louhossoa (Basses-Pyrénées), St-Paul-de-Fenouillet (Pyrénées-Orientales), Salvezines (Aude) ; dans le Massif Central, ce sont les feldspaths potassiques qui prédominent notamment dans la Lozère, l'Aveyron, l'Ardèche, la Creuse etc.

Dans le Massif Central, à Douevas et Larnage (Drôme), on exploite des sables kaoliniques particulièrement riches en feldspath.

Autres fondants

Syénites néphéliniques. Ce sont des roches de profondeur, composées d'un magma cristallin de néphéline (feldspathoïde), de feldspaths potassiques et sodiques et de minéraux accessoires micacés et ferrugineux. Leur pouvoir fondant est supérieur à celui du feldspath.

Elles sont exploitées depuis quelques années au Canada, mais leur emploi est limité à cause de leur teneur en minéraux ferromagnésiens.

Craie, calcaires purs, marbre. Le minéral essentiel de ces roches est le carbonate de calcium ou calcite CaCO_3 . Les roches calcaires affleurent sur des surfaces considérables et aucun problème d'approvisionnement ne se pose dans notre pays.

Dolomies. Elles seront étudiées avec les matériaux réfractaires.

Citons enfin pour mémoire : le talc, hydrosilicate de magnésie dont le plus important gisement se trouve à Luzenac dans les Pyrénées, la wollastonite, silicate de calcium (SiO_2, CaO) présent parfois dans les calcaires métamorphiques, au contact des roches éruptives, ou dans des débris de projections et de certaines laves volcaniques. Sa concentration est rarement suffisante pour qu'on puisse envisager l'exploitation industrielle. On n'en connaît pas de gisement exploitable en France.

3 - MATERIAUX DEGRAISSANTS

Ce sont des matériaux inertes qui, convenablement pulvérisés, ont un coefficient de retrait très faible. Leur rôle est de pallier les inconvénients occasionnés par une plasticité excessive des argiles. Ils fournissent un squelette à la pâte, augmentent la porosité, aident au séchage et diminuent le retrait.

Les principaux dégraissants sont constitués par de la silice SiO_2 ou quartz qu'on trouve dans la nature sous différents aspects :

- sables quartzeux détritiques issus du démantèlement des roches cristallines et des roches sédimentaires siliceuses lors des périodes d'érosion. Ils sont fréquents dans les formations sédimentaires, les plus connus étant les sables de Fontainebleau, très purs, qui affleurent dans la région d'Etampes à Nemours, des gisements sont exploités également dans le Nord (Haumont), dans le Sud-Est (régions de Carpentras, Cassis, Martigues). Dans le Sud-Ouest (Lavardac, Marcheprime), on utilise également les sables siliceux récupérés au cours du traitement des sables kaoliniques ou des pégmatis :

- grès quartzeux : ce sont des sables quartzeux qui ont été consolidés par un ciment siliceux ;

- quartzites : ce sont des roches compactes constituées de cristaux de quartz jointifs. On admet qu'à l'origine on avait affaire à un sable détritique quartzeux, et que les grains de quartz ont été "nourris" au contact des solutions riches en silice qui les imprégnaient. La silice a cristallisé autour des grains dont la taille s'est progressivement accrue, en occupant tous les vides du sable initial ;

- quartz filonien : le quartz se présente quelquefois en filons de dimensions variables encaissés dans les roches des séries cristallophylliennes. En raison de la dureté et de la résistance du quartz, ces filons affleurent très bien et forment des arêtes au milieu des terrains encaissants. Comme les pégmatis, on les rencontre dans les massifs anciens ;

- galets siliceux et silex : le démantèlement des formations crayeuses du Bassin Parisien, a libéré une grande quantité de silex qui, lorsqu'ils ont été concentrés et débarrassés des particules fines par les eaux de ruissellement, donnent localement des gisements exploitables.

On utilise également les galets de mer siliceux qu'on trouve en quantité sur les plages du Pays-de-Caux. Les silex et les galets siliceux sont calcinés à 1350-1400°C, et broyés ensuite, opération rendue aisée par la désagrégation due à la cuisson (étonnement).

Un dégraissant fréquemment utilisé est la chamotte qui n'est autre qu'une argile cuite et broyée à une granulométrie déterminée. Il est possible d'employer comme chamotte l'une des argiles figurant par ailleurs dans la composition de la pâte.

4 - MATERIAUX REFRACTAIRES

La gamme des matériaux réfractaires utilisés en céramique est également très étendue.

4.1. MINERAUX MAGNESIENS

4.1.1. La dolomite

C'est un carbonate double de calcium et de magnésium : $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, avec des teneurs théoriques de 54,35 % en CaCO_3 et 45,65 % en MgCO_3 . La dolomite est le constituant essentiel de certaines roches appelées dolomies. Mais les dolomies sont rarement pures et renferment le plus souvent des impuretés (CaCO_3 libre, silice, fer etc.).

Les dolomies ont pu se former selon deux processus différents :

- par précipitations directes de dolomites primaires dans des dépôts lagunaires. Les couches sont généralement peu épaisses et associées à d'autres dépôts lagunaires (gypse, anhydrite, sel gemme). Ces dolomies ont généralement un grain très fin. De tels gisements sont rares ;

- par transformation de roches calcaires au contact de solutions magnésiennes, par voie métasomatique. La dolomite se substitue progressivement à la calcite et finit par envahir toute la roche : c'est le phénomène de dolomitisation. Il s'agit donc d'accidents magnésiens en milieu calcaire. De ce fait, les gisements sont irréguliers, tant en volume, qu'en qualité, mais ils peuvent parfois, constituer des masses considérables. Ces dolomies sont dites secondaires par opposition aux précédentes qui sont primaires. Ce sont des roches compactes, à toucher rugueux, à structure grenue, microgrenue ou vacuolaire.

La dolomie, décarbonatée vers 900-1 000°C, devient un excellent matériau réfractaire, fritté à haute température, mais qui s'altère au contact de l'humidité atmosphérique.

Les dolomies sont assez largement répandues en France. Elles se rencontrent dans la plupart des niveaux stratigraphiques, depuis le Primaire, jusqu'au Tertiaire. Elles sont exploitées surtout, dans le Nord, le Pas-de-Calais, le Languedoc, dans le Midi-Pyrénées, en Provence-Côte d'Azur.

4.1.2. La giobertite ou magnésite

C'est le carbonate de magnésium MgCO_3 : (47,6 % de MgO). La giobertite peut avoir trois origines :

- altération de certains silicates magnésiens (olivine, serpentine) ;
- substitution dans les calcaires, au contact de solutions magnésiennes (comme pour la dolomite) ;
- précipitation directe dans les lagunes : giobertite sédimentaire.

En céramique, on utilise la giobertite sous forme calcinée caustique, c'est-à-dire calcinée à un degré tel qu'il subsiste 2 à 10 % de CO_2 , et que la magnésie obtenue montre des capacités d'absorption et d'activité.

Dans l'industrie des réfractaires, la giobertite est utilisée sous la forme calcinée à mort, à une température supérieure à $1\ 500^\circ$.

La giobertite est un minéral rare et on ne connaît aucune exploitation en France bien que des indices aient été découverts assez récemment dans les Basses-Pyrénées, et dans les Pyrénées-Orientales, au Sud-Est de Céret.

4.2. SILICATES D'ALUMINE

Ce sont les minéraux du groupe de la sillimanite qui comprend : la sillimanite, l'andalousite, le disthène ou cyanite. Ces trois minéraux ont la même formule : $\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3$. Ils présentent la propriété caractéristique de se transformer par calcination prolongée à haute température en mullite ($2\text{SiO}_2\ 3\text{Al}_2\text{O}_3$) substance hautement réfractaire.

La transformation en mullite se fait avec une certaine augmentation de volume. Toutefois, celle-ci est pratiquement négligeable en ce qui concerne la sillimanite et l'andalousite, si bien que ces minéraux peuvent être utilisés sans calcination préalable.

Les silicates d'alumine se rencontrent dans les roches métamorphiques alumineuses (schistes, micaschistes, gneiss) associés à d'autres minéraux.

Il existe plusieurs types de gisements exploitables :

- gisements de roches massives, lorsque celles-ci sont suffisamment riches en silicates d'alumine et peuvent être traitées industriellement dans des conditions économiques ;

- dans d'autres cas la roche mère a pu être profondément altérée et donner, comme dans le cas du kaolin :

- des gisements "*in situ*",
- des gisements sédimentaires (sables riches en silicates d'alumine) après érosion et transport.

En France, on ne connaît pas de gisement dont la teneur en silicate d'alumine soit suffisante pour qu'on puisse en envisager l'exploitation industrielle.

2ème P A R T I E

PROSPECTION

Quelle que soit la nature du matériau à rechercher, la prospection s'effectue toujours en plusieurs phases successives, le but de chacune d'elles étant de cerner le problème de plus en plus près :

- étude documentaire,
- reconnaissance géologique sur le terrain,
- prospection proprement dite,
- étude détaillée du gisement.

1 - ETUDE DOCUMENTAIRE

Elle consiste à faire le recensement et la synthèse de toutes les connaissances acquises sur la géologie régionale. Les documents consultés sont les suivants :

- cartes géologiques à 1/80 000 (ou à 1/50 000 si elles existent), qui mettent en évidence les limites d'affleurements des couches géologiques et permettent au spécialiste de déterminer leur architecture d'ensemble dans le sous-sol ; la légende technique et la notice explicative donnent parfois, des renseignements sur la qualité des matériaux ;
- photographies aériennes qui permettent de préciser le modelé du relief, de localiser les exploitations anciennes ou actuelles, les zones de végétation etc. ;
- les données bibliographiques : thèses, diplômes, articles spécialisés, notes, etc. ;
- le BRGM dispose en outre des coupes de forages, puits, galeries déclarés au titre du code minier ; ces renseignements peuvent être exploités dans la mesure où ils ne sont pas confidentiels.

Toutes ces données sont reportées sur une carte topographique à 1/50 000 ou, mieux, à 1/25 000.

Cette première phase de dégrossissage permet d'orienter les travaux ultérieurs en mettant en évidence les zones géologiquement favorables. Parmi celles-ci, on pourra, dès ce stade, procéder à une première sélection en fonction des critères géographiques et économiques :

- accessibilité des carrières,
- lieu d'utilisation des matériaux,
- emplois envisagés,
- tonnage approximatif des besoins.

2 - RECONNAISSANCE GEOLOGIQUE SUR LE TERRAIN

Le géologue va maintenant contrôler sur le terrain et, si possible, préciser les données précédentes. C'est une reconnaissance de surface qui s'effectue avec le matériel léger classique : cartes, photographies, boussole, marteaux, pelles, éventuellement tarière à main, réactifs chimiques, sacs à échantillons. Le travail consiste à étudier tous les affleurements, exploitations en cours, carrières abandonnées. Il peut être complété par des grattages ou des trous superficiels à la tarière à main. Pour chaque point d'observation, il faut noter, dans la mesure du possible :

- la nature et l'épaisseur de la découverte,
 - la nature et l'épaisseur de la ou des couches utiles avec les variations de faciès éventuelles, latérales ou verticales,
 - la nature et l'épaisseur des intercalations stériles,
 - la profondeur et la nature du substratum... enfin,
- tous les renseignements qui permettent d'établir des coupes stratigraphiques détaillées.

Des échantillons représentatifs sont prélevés pour être soumis en laboratoire à des analyses et essais d'identification.

A l'issue de cette reconnaissance et compte tenu des résultats des premiers essais, le géologue sélectionne les secteurs qui lui paraissent les plus intéressants, mais qui peuvent être encore très vastes.

3 - PROSPECTION PROPREMENT DITE

Dans les secteurs choisis au terme de la phase précédente, il faut maintenant délimiter des panneaux susceptibles de contenir des réserves suffisantes et, à l'intérieur de ceux-ci, préciser la nature des matériaux.

Les surfaces à prospector sont généralement couvertes par des formations superficielles qui masquent les formations utiles sous-jacentes. Il faut donc "chercher à voir" ce qui se passe sous ces formations : c'est le but de la phase de prospection s.str. Pour la mener à bien, on dispose d'un certain nombre de moyens d'investigation qui peuvent être classés en deux grandes catégories :

- procédés indirects : ce sont les méthodes géophysiques,
- procédés directs : ce sont les sondages mécaniques.

3.1. METHODES GEOPHYSIQUES

La géophysique appliquée recherche des substances utiles en étudiant les anomalies qui existent dans la répartition des propriétés physiques à la surface du globe.

Certaines méthodes sont directes et consistent à mesurer des grandeurs existant réellement dans la nature :

- gravimétrique → pesanteur
- magnétique → champ magnétique
- radioactive → radioactivité
- géothermique → variations de θ dans l'écorce terrestre.
- électrique - mesure des courants telluriques

D'autres sont indirectes, et consistent à mesurer des grandeurs physiques artificielles, créées au moment même où on veut les utiliser :

- méthodes électriques,
- méthodes sismiques.

Ce sont ces méthodes qui sont utilisées dans la recherche de gisements de substances utiles et plus particulièrement les méthodes électriques.

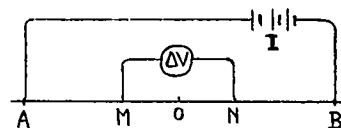
3.1.1. Prospection électrique

Elle est basée sur le fait que les roches ont une conductibilité ionique variable, c'est-à-dire, qu'elles présentent une résistance plus ou moins grande à la propagation des courants électriques. Cette résistance des roches par unité de volume s'appelle résistivité et s'exprime en ohms/m² (ohms/m³).

Dispositif (quadripôle) : le principe consiste à injecter un courant d'intensité donnée par l'intermédiaire de deux électrodes A et B, fichées dans le sol et à mesurer la différence de potentiel entre deux autres électrodes M et N placées entre A et B.

La résistivité ρ est donnée par la formule

$$\rho = 2\pi \frac{AV}{I} \frac{1}{\left(\frac{1}{MA} + \frac{1}{MB}\right) - \left(\frac{1}{NA} + \frac{1}{NB}\right)}$$



En général on utilise un dispositif symétrique dans lequel les électrodes A et B d'une part, M et N d'autre part, sont équidistantes d'un point fixe O au point de mesure.

La plupart du temps les terrains ne sont pas homogènes comme le voudrait la théorie et ce qu'on mesure n'est pas la résistivité réelle des terrains, mais une résistivité apparente qui, en outre, est fonction de la forme et des dimensions du quadripôle.

La profondeur d'investigation est sensiblement égale au quart de la distance séparant les électrodes A et B.

Il y a deux façons de procéder :

3.1.1.1. M et N restant fixes, on écarte progressivement les électrodes A et B. La profondeur d'investigation augmente également et on réalise ce qu'on appelle un sondage électrique.

3.1.1.2. On adopte une longueur de ligne A.B déterminée et on fait des séries de mesures suivant des lignes parallèles dans une direction ou dans deux directions (quadrillage). C'est le procédé des traînées de résistivité qui donne des profils de résistivité pour une certaine profondeur d'investigation. On peut aussi effectuer des traînées de résistivité avec 2, 3 ou 4 longueurs de ligne AB différentes, et obtenir ainsi des profils à des profondeurs d'investigation différentes. Ce procédé supprime l'influence des terrains superficiels lors de l'interprétation.

Les résultats obtenus sont synthétisés sous forme de cartes de résistivité. Il suffit de joindre les points à résistivité apparente égale, pour obtenir les courbes d'équirésistivité. Celles-ci délimitent des surfaces équirésistantes ou à résistivité apparente peu différentes.

Avantages de la prospection électrique :

- les mesures sont simples et rapides et ne nécessitent qu'un matériel léger. Une équipe composée de 3 ou 4 hommes (1 opérateur et 2 ou 3 aides) peut faire 2 km de profil par jour en moyenne ;

- elle permet d'étendre la prospection à de grandes surfaces ;
- en mettant en évidence l'allure du substratum, elle donne, avec une précision satisfaisante, la géométrie du gisement et conduit à une meilleure étude volumétrique des réserves ;
- elle limite le nombre des sondages mécaniques nécessaires en permettant leur implantation judicieuse ;
- la méthode est d'autant plus intéressante que l'épaisseur des terrains est grande.

Inconvénients de la prospection électrique :

- cette méthode ne donne aucun renseignement sur la qualité des matériaux ;
- l'interprétation des mesures est parfois très délicate et demande de la part du géophysicien beaucoup d'expérience et de finesse ;
- pour les deux raisons précédentes, elle ne peut se passer des sondages mécaniques qui sont nécessaires, non seulement pour prélever des échantillons, mais également pour étalonner les mesures géophysiques et permettre leur interprétation géologique ;
- la prospection électrique n'est pas valable dans tous les cas, cependant, elle donne de bons résultats dans la recherche de gisements d'argiles, de sables, ou de roches altérées (roches kaolinisées par exemple).

3.1.2. Prospection sismique

Elle est basée sur la mesure des vitesses de propagation des ondes de choc à l'intérieur des roches. C'est un procédé coûteux, rarement utilisé dans la recherche de gisements de substances utiles.

Une variante est utilisée quelquefois pour la reconnaissance de gisements peu profonds : c'est la sismique choc (≠ sismique explosion). Les ondes sont provoquées par le choc d'un marteau ou d'une dame qui frappe le sol violemment. Mais les mesures se faisant au voisinage de la surface, avec des appareils sensibles, sont souvent brouillées par des interférences variées et sont difficiles à interpréter.

D'autre part, ces méthodes sismiques ne sont utilisables que si les vitesses respectives des différents terrains superposés croissent avec la profondeur ($V_1 < V_2 < V_3$) ce qui n'est pas toujours le cas.

3.2. FORAGES MECANIQUES

C'est, de toute évidence, le procédé qui, en un point donné, donne le maximum de renseignements, non seulement sur la succession exacte des terrains traversés, mais également sur la nature de ceux-ci, grâce aux échantillons qu'il permet de recueillir. Mais le caractère ponctuel des renseignements fournis, nécessite un grand nombre de forages pour reconnaître avec précision un gisement. Or, si le prix de revient des forages mécaniques varie suivant la nature

des terrains et la technique utilisée, il augmente rapidement avec la profondeur. C'est pourquoi, dans la phase de prospection s.str., il faut en limiter le nombre au maximum et il importe qu'ils soient alors judicieusement implantés.

La gamme des engins utilisés est très vaste et va de la simple tarière à main, aux sondeuses rotatives perfectionnées à carottage continu. L'utilisation de tel ou tel procédé est déterminée d'après la nature des terrains, la profondeur du gisement et le degré de représentativité qu'on souhaite obtenir pour les échantillons.

- Il n'est pas utile de s'attarder ici sur la description de ces procédés.

Signalons qu'à côté des sondeuses classiques, des engins tels que la benne BENOTO ou certaines pelles mécaniques, sont capables d'effectuer rapidement des excavations de grand diamètre dans les formations meubles, jusqu'à des profondeurs dépassant 10 mètres. Pour les gisements peu profonds, ces techniques sont avantageuses, car elles permettent, d'une part de récupérer l'intégralité des matériaux sans perte de certaines fractions, d'autre part, de recueillir des échantillons volumineux à partir desquels on pourra effectuer des traitements expérimentaux et faire des prévisions sur les méthodes d'exploitation les plus rentables. (Dans certains cas, on peut envisager également le fonçage de puits, le creusement de tranchées ou de galeries).

Nous venons d'examiner les moyens dont dispose le prospecteur pour poursuivre les recherches. Rappelons qu'il s'agit de délimiter des étendues de terrain homogènes et de procéder ensuite à l'identification des matériaux à l'intérieur de ces zones, afin de se rendre compte si le gisement paraît économiquement valable. Pour cela, on combine l'emploi de la géophysique électrique et des sondages mécaniques :

- dans un premier temps, quelques sondages électriques sont réalisés. Ils permettent de déterminer la longueur de ligne AB la plus favorable pour la réalisation des profils de résistivités. Ces derniers sont ensuite réalisés avec une maille lâche de façon à couvrir la totalité de la surface choisie. Parallèlement quelques sondages mécaniques sont effectués. Ils permettent d'étalonner les mesures géophysiques et de recueillir les premiers échantillons. Au terme de ces travaux, on peut dresser une première carte de résistivité sur laquelle apparaît le ou les secteurs intéressants ;

- sur ces secteurs intéressants, on réalise ensuite une campagne géophysique complémentaire à maille serrée, contrôlée par quelques sondages mécaniques supplémentaires. Les résultats obtenus permettent de dresser une carte de résistivité précise du gisement et une première ébauche de carte isopaque ;

- enfin, les échantillons récoltés dans les sondages mécaniques sont étudiés au laboratoire .

. Au terme de cette phase de prospection, le prospecteur dispose d'indications générales quantitatives et qualitatives sur la valeur du gisement. La conclusion à tirer peut revêtir trois formes :

1) le gisement paraît économiquement valable ;

2) compte tenu des conditions économiques et de leur évolution possible, le gisement ne pourra être exploité qu'en limite de rentabilité. C'est à l'exploitant d'évaluer alors les risques et de prendre une décision pour la poursuite éventuelle de l'étude ;

3) l'exploitation du gisement découvert n'est pas rentable financièrement.

Pour aboutir à ces conclusions, il faut se livrer à un calcul d'estimation de rentabilité d'exploitation dans lequel entrent en jeu, de nombreux paramètres :

- coefficient de recouvrement : l'épaisseur limite des stériles varie suivant leur nature, l'épaisseur et la valeur économique de la couche utile ;
- achat des terrains ;
- équipement du chantier ;
- transports etc.

4 - ETUDE DETAILLEE DU GISEMENT

Si l'exploitation a été jugée financièrement saine, une étude approfondie est nécessaire pour conduire les travaux avec le minimum d'aléas, et valoriser au mieux les matériaux extraits.

Pour dresser un bilan exact de la valeur économique du gisement, il convient d'étudier au plus près plusieurs paramètres :

- les paramètres définissant la géométrie du gisement :
 - . variations d'épaisseur des morts-terrains ;
 - . présence éventuelle de stériles intercalés dans la formation utile ;
 - . volume total des morts-terrains à enlever ;
 - . variations d'épaisseur des couches exploitables ;
 - . volume total des matériaux exploitables ;
- les paramètres définissant la qualité des matériaux bruts :
 - . caractéristiques pétrographiques, minéralogiques, chimiques ;
 - . nature et proportion des impuretés etc. ;
- éventuellement les paramètres hydrologiques :
 - . variations du niveau de la nappe et sens d'écoulement.

L'étude détaillée du gisement doit fournir des résultats très précis que la géophysique n'est pas capable d'apporter. C'est pourquoi, à ce stade de la recherche, on a recours essentiellement aux sondages mécaniques.

Pour se faire une idée la plus exacte possible du gisement, les sondages sont implantés suivant un réseau à maille régulière en tenant compte des renseignements fournis par les cartes de résistivité. La maille sera d'autant plus serrée que ces cartes présenteront des anomalies traduisant des hétérogénéités dans le gisement. L'échantillonnage méthodique et les essais en laboratoire permettent de vérifier la régularité dans la qualité des matériaux ou au contraire, mettent en évidence les hétérogénéités.

Présentation des résultats

Les résultats peuvent être présentés de différentes façons. L'une des plus pratiques consiste en un jeu de cartes superposables à grande échelle (1/5 000 ou plus) comprenant :

- une carte topographique de la surface du sol, en courbes ;

- une carte topographique du toit de la formation utile, en courbes ;
- une carte topographique du substratum, en courbes.

Par soustraction graphique on peut alors dessiner :

- une carte des isopaques de la découverte ;
- une carte des isopaques de la formation utile.

La superposition de ces deux dernières permet, par exemple, de déduire immédiatement, en chaque point, le coefficient de recouvrement.

A partir de ces éléments, il est alors aisé de calculer les volumes de la découverte et de la formation utile.

Les résultats de cette étude peuvent être aussi rassemblés dans un bloc diagramme du gisement où seront délimités les bancs à mettre en stérile et les zones homogènes contenant chacune un matériau connu du point de vue qualité et volume. Le bloc diagramme servira de guide pendant toute la durée de l'exploitation du gisement. Il aidera le carrier à choisir une méthode et à dresser un plan d'extraction sélectif de façon à obtenir des lots de matériaux les plus homogènes possibles.

Enfin, il permettra de prévoir les caractéristiques des installations éventuellement nécessaires pour amener la qualité des matériaux dans les normes voulues.

5 - CONCLUSION

Nous venons d'exposer les différentes étapes de la prospection qui préparent à la mise en évidence d'un gisement exploitable. Mais c'est un schéma général qu'il convient d'adapter à chaque cas particulier.

Par exemple, il peut arriver qu'au terme des deux premières phases (étude documentaire, reconnaissance géologique sur le terrain), on dispose d'éléments suffisants pour que la phase suivante devienne inutile. On passera alors directement à l'étude détaillée du gisement.

Dans certains cas, il ne sera pas possible d'employer les méthodes géophysiques. Il faudra se contenter alors des sondages mécaniques.

D'autres fois, les conditions de gisement seront telles, qu'il faudra faire appel à des méthodes particulières. C'est ainsi que la reconnaissance de roches en filon (quartz, pegmatite) nécessitera souvent des travaux miniers : puits, galeries de reconnaissance etc., ou des forages mécaniques obliques ou horizontaux.

Il faut signaler enfin, que certains gisements, reconnus inexploitable dans les conditions actuelles, représentent des réserves potentielles qu'il ne faut pas négliger. Il est fort possible que, grâce aux progrès rapides de la technique, l'intérêt de ces gisements s'affirme un jour ou l'autre.

3ème P A R T I E
METHODES D'EXPLOITATION

En fonction de l'épaisseur et de la nature des formations stériles qui recouvrent généralement les matériaux que l'on veut exploiter, deux types d'exploitation peuvent être envisagés :

- l'exploitation à ciel ouvert,
- l'exploitation souterraine, lorsque le recouvrement est trop important.

Pour de nombreuses raisons, l'exploitation à ciel ouvert est préférable à l'exploitation souterraine, notamment lorsqu'il s'agit de matériaux n'ayant pas, à l'état brut, une grande valeur comme c'est le cas pour la plupart des matières premières utilisées en céramique. Cependant il arrive que la qualité exceptionnelle de certains matériaux permette leur exploitation en galeries, dans des conditions rentables : en France, les seules exploitations souterraines encore en activité sont localisées dans le Bassin de Provins (argiles réfractaires) et dans la Nièvre (sables kaolinitiques).

1 - EXPLOITATION A CIEL OUVERT

1.1. DECOUVERTURE

Avant d'extraire la formation utile, il est nécessaire de dégager les morts-terrains (recouvrement ou découverte) : c'est ce qu'on appelle la découverte.

Lorsque le recouvrement est peu épais et constitué de terrains meubles, la découverte consiste en un simple décapage au moyen de bulldozers ou de scrapers qui travaillent par passes successives jusqu'à mettre à jour, proprement, le toit de la couche exploitable.

Lorsque la découverte est importante, on utilise pratiquement les mêmes techniques et le même matériel que ceux utilisés pour effectuer l'extraction proprement dite.

1.2. EXTRACTION DES FORMATIONS UTILES

1.2.1. Matériaux meubles (argiles, sables)

On emploie des engins qui assurent le prélèvement direct au front de taille et le chargement : pelles mécaniques ou hydrauliques, excavateurs à godets qui peuvent travailler soit en butte, soit en fouille.

D'autres engins sont conçus pour travailler essentiellement en fouille, lorsque la topographie est plate ou que l'extraction doit se faire dans l'eau : il s'agit de grues équipées en dragline ou en benne preneuse.

1.2.2. Matériaux très compacts et/ou durs

Ils nécessitent un abattage à l'explosif. L'explosif est placé dans des trous préalablement forés à l'aide de foreuses pneumatiques à percussion ou de sondeuses rotatives, lorsqu'on veut faire des tirs puissants. Après chaque tir, les blocs accumulés au pied du front de taille sont repris et évacués vers l'usine. Les blocs très volumineux doivent subir parfois un débitage secondaire qui se fait, soit par pétardage, soit par masse tombante à l'aide d'une grue spécialement équipée.

Une technique bien particulière est utilisée pour l'abattage des roches naturellement désagrégées. Vieille de plus d'un siècle, elle n'est utilisée en France que depuis quelques années seulement pour extraire le kaolin en Bretagne. Il s'agit de l'abattage hydraulique : la roche kaolinisée est désagrégée par un jet d'eau extrêmement puissant qui sort d'une lance appelée "monitor", braquée sur le front de taille. L'eau qui entraîne le kaolin et les particules les plus fines, est canalisée et dirigée vers les bacs de décantation. Les éléments grossiers s'accumulent au pied du front de taille et sont dégagés périodiquement avec un bulldozer.

1.3. REPRISE - CHARGEMENT - TRANSPORT

Ces opérations s'effectuent avec des engins variés qui sont utilisés aussi bien pour les roches meubles que pour les roches dures préalablement abattues. Le choix de tel ou tel type d'engin est déterminé par la puissance de la couche exploitée, l'importance de l'exploitation, la distance de la carrière à l'usine etc.

Lorsque la formation utile est très épaisse ou comporte des bancs de qualités différentes, il est nécessaire d'exploiter en plusieurs gradins.

Selon la topographie, il existe deux sortes d'exploitation à ciel ouvert :

- exploitation en butte : elle réunit les conditions les plus favorables aussi bien pour le démarrage de l'exploitation que pour l'exhaure qui peut se faire aisément par gravité ;

- exploitation en fouille : les eaux qui circulent toujours plus ou moins dans les roches s'accumulent au fond de la carrière, et leur évacuation pose parfois des problèmes difficiles à résoudre économiquement.

Le tableau ci-dessous donne, selon la nature des terrains, les principaux engins utilisés pour effectuer les différentes opérations d'une exploitation à ciel ouvert.

OPERATIONS TECHNIQUES ENGINES	DECOUVERTURE				COUCHE UTILE		
	FAIBLE		IMPORTANTE		RCD	ARGILE	SABLE
	RCD*	RM**	RCD	RM			
<u>DECAPAGE</u>							
bulldozer		x					
scraper		x					
<u>ABATTAGE</u>							
marteau pneumatique à main	x		x				
wagon-drill			x				
sondeuse rotative			x				
explosif	x		x				
<u>DEBITAGE SECONDAIRE</u>							
pétardage			x				
grue équipée d'une masse tombante			x				
<u>EXTRACTION-REPRISE-CHARGEMENT</u>							
pelle mécanique			x	x	x	x	x
pelle hydraulique			x	x	x	x	x
escavateur à chaîne à godets				x		x	
escavateur à roue à godets				x		x	
grue équipée en dragline						x	x
grue équipée en benne preneuse						x	x
chargeur hydraulique (sur roues ou chenilles)			x	x	x	x	
<u>TRANSPORT</u>							
camion benne			x	x	x	x	x
dumper			x	x	x	x	x
wagonnet ou berline sur rail			x	x	x	x	x
bande transporteuse				x		x	x
*RCD = 'roche compacte et/ou dure **RM = roche meuble							

2 - EXPLOITATION SOUTERRAINE

Elle présente de nombreux inconvénients qui, compte tenu des puissants moyens actuels d'exploitation à ciel ouvert, ont conduit à l'abandon progressif de nombreuses carrières souterraines :

- c'est un procédé d'extraction coûteux qui nécessite, en terrain meuble, un boisage important. L'exhaure est souvent difficile à réaliser ;
- les conditions de travail sont parfois pénibles, l'exiguïté des galeries ne permettant pas, en général, l'utilisation de moyens hautement mécanisés ;
- il est nécessaire de conserver des piliers ce qui conduit à abandonner une partie des réserves du gisement.

Lorsque la formation utile affleure à flanc de coteau, les galeries partent de l'affleurement et progressent en suivant la couche. Si la couche n'affleure pas, on creuse un puits à travers les formations de couverture jusqu'au niveau que l'on veut exploiter ; les galeries partent alors du fond du puits.

L'abattage des roches dures et compactes se fait à l'aide de marteaux pneumatiques et d'explosifs. Celui des roches meubles avec des bèches pneumatiques sur lesquelles on peut adapter des outils de formes diverses.

Dans le Bassin de Provins, on utilise une machine automatique à commandes hydrauliques, adaptée aux dimensions des galeries. Cet appareil, appelé "mineur continu d'argile" assure l'abattage et le chargement. Il comporte un bras mobile qui supporte, à son extrémité avant, une tête d'abattage constituée d'une chaîne porte-couteaux, entraînée par deux tambours dentés. La partie arrière du bras est équipée d'un convoyeur à bande, qui recueille les copeaux d'argile découpés par les couteaux, et les déverse sur un convoyeur d'évacuation à bande qui assure le chargement des berlines.

Dans les carrières souterraines, l'évacuation des matériaux se fait généralement par bandes transporteuses et par wagonnets ou berlines sur rail. Des treuils sont utilisés lorsqu'il faut remonter les matériaux par des puits. Cependant, dans les roches compactes, dures et peu fissurées, il est possible de percer des galeries suffisamment larges et hautes pour permettre la circulation et les manoeuvres d'engins encombrants tels que pelleteuses, bulldozers, camions.