

# Fiches détaillées

## Les Feldspaths\* <sup>1</sup>

**Marcel Pouliquen**  
Géologue



Mégacristal d'orthose  
[source Ecole des Mines d'Alès]

Constituants majeurs des roches magmatiques et de nombreuses roches métamorphiques, les feldspaths ont été utilisés pour établir leur classification. En revanche leur faible résistance à l'altération superficielle contribue à leur moindre abondance dans les formations sédimentaires. C'est à leur observation sous forme de prismes centimétriques dans des arènes granitiques en Allemagne et en Suède qu'ils doivent leur dénomination : *feldt* (champ labouré) *spat* (cristal).

Bien qu'elle avoisine les 20 Mt par an, leur utilisation industrielle comme fondant dans les céramiques (70 %) et dans les verres (25 %) ou comme charges minérales (5 %) reste méconnue.

\* Les syénites à néphéline, un feldspathoïde proche des feldspaths, ne seront pas traitées ici. Très utilisées en verrerie et en céramique (les émaux en particulier) elles devraient faire l'objet d'une fiche technique spécifique.

### D'un point de vue minéralogique...

Les feldspaths sont des silicates d'alumine à structure cristalline de type tectosilicate caractérisée par un assemblage tridimensionnel de tétraèdres  $\text{SiO}_4$  et  $\text{AlO}_4$  dont l'équilibre de charge électrique est assuré par l'adjonction de cations alcalins (Na et K) ou alcalino-terreux (Ca plus rarement Ba).

Parmi les propriétés les plus spécifiques, on notera une dureté Mohs de 6 à 6,5, une densité variant de 2,55 à 2,76 pour les espèces les plus courantes, une fusibilité comprise en fonction de la composition entre 1 100 et 1 400 °C et une cristallisation dans les systèmes monoclinique ou triclinique.

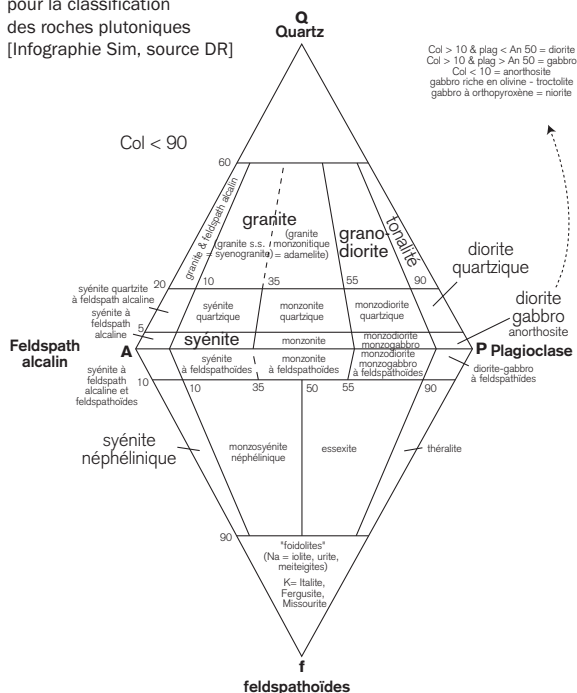
Les formes cristallines sont souvent caractérisées par l'association géométrique de deux (macle simple) ou plusieurs cristaux (macle polysynthétique) ; les plus fréquemment observées étant la macle simple de Carlsbad et celle polysynthétique de l'albite.

Leur composition chimique permet de distinguer deux grandes familles :

- les feldspaths alcalins : série polymorphe discontinue avec une lacune de miscibilité à basse et moyenne température entre un pôle potassique (K  $[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ) et un pôle sodique (Na  $[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ) dont l'orthose et le microcline, potassiques, sont les variétés les plus fréquentes dans les roches plutoniques et la sanidine dans les roches volcaniques;
- les feldspaths calco-sodiques ou plagioclases : série isomorphe continue allant d'un pôle sodique, l'albite (Na  $[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ) à un pôle calcique, l'anorthite (Ca  $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ ).

Les propriétés optiques en lame mince, l'analyse chimique ou la diffraction des rayons X permettent de les caractériser et montrent une teneur en silice qui décroît de 68,5 % à 44,5 % alors que l'alumine augmente de 19,5 % à 36 %. La fusibilité est corrélée positivement à la teneur en Ca.

Figure 1 - Diagramme de Streckeisen pour la classification des roches plutoniques [Infographie Sim, source DR]



### De la caractérisation des roches...

Présents dans la majorité des roches magmatiques, ils ont servi de base, avec le quartz et l'olivine, à l'établissement de leur classification comme l'illustre le diagramme de Streckeisen (**figure 1**). Leur proportion dépasse 40 % dans les roches les plus acides qu'il s'agisse de roches plutoniques, à texture grenue (granites, diorites quartziques et granodiorites...) ou de leur équivalent volcanique à texture microlitique (rhyolites, dacites...) et peut atteindre 90 % dans les roches type anorthosites et autres plagioclases. Dans les roches saturées (syénites alcalines, monzonites, diorites, gabbros, andésites, trachytes, basaltes) et les roches sous-saturées comme les syénites néphéliniques, les feldspaths alcalins et les plagioclases sont les principaux constituants.

Leur développement dans certaines roches métamorphiques (gneiss, amphibolites) issues de la transformation de séquences sédimentaires argileuses et calcaréo-argileuses est un indicateur à la fois de chimisme de la roche originelle et du degré de métamorphisme général subi par celle-ci, qui peut être moyen (mésozone) à fort (catazone).

Des processus hydrothermaux peuvent conduire à l'augmentation de la teneur en feldspaths de certaines roches, c'est le cas de l'albitisation dont l'origine est à rechercher dans la circulation de fluides riches en Na, responsable d'une transformation à l'état solide qualifiée de métasomatose sodique.

Facilement altérables dans les conditions superficielles, les feldspaths sont beaucoup moins abondants dans les formations sédimentaires.

Les feldspaths potassiques, plus résistants, peuvent subsister dans certains horizons détritiques grossiers comme les arkoses et les sables feldspathiques ou bien être préservés dans des altérites peu ou pas déplacées.

### ...à l'identification des gisements

Leur abondance dans l'écorce terrestre étant reconnue, la définition de leur gisement est basée sur des critères essentiellement économiques comme l'existence de marchés, les distances de transport et techniques en relation avec les applications envisagées.

Parmi les propriétés recherchées, les plus déterminantes sont :

- **la fusibilité** qui est grossièrement liée à la somme des alcalins (Na+K) mais aussi aux teneurs en Ca, Mg, Li, F, Fe... avec un minimum de 6 % de  $K_2O+Na_2O$  pour les feldspaths commercialisés, à l'exception des arkoses et altérites feldspathiques ;
- **la blancheur** des produits après cuisson (céramiques) ou fusion (verres) qui est corrélée aux teneurs en fer et titane dont la somme ne doit excéder 0,50 à 0,60 % ; mais elle dépend aussi du degré d'oxydation et de la fusibilité des minéraux colorés présents dans les mélanges industriels ;
- **l'apport d'alumine** associé aux feldspaths. Il est déterminant pour les usages en verrerie avec une teneur minimale de 16 % d' $Al_2O_3$ .

Dans la pratique les analyses chimiques sont complétées par des tests de cuisson ou de fusion dans les conditions industrielles.

Sur la base de ces critères, les environnements géologiques susceptibles de receler des gisements se réduisent à 6 familles :

- les pegmatites granitiques et les aplites ;
- les granites et autres roches magmatiques alcalines ;
- les roches métamorphiques ;
- les albitites ;
- les altérites feldspathiques ;
- les arkoses et sables feldspathiques.

**Les pegmatites sensu stricto** sont des roches magmatiques silicatées caractérisées par la taille exceptionnelle de leurs cristaux, de quelques centimètres à plus d'un mètre, qui permet une sélection manuelle. Premiers gisements identifiés, leur exploitation tend à diminuer compte tenu de leurs dimensions limitées et de leur nature le plus souvent potassique.

Elles se présentent sous forme d'amas ou de filons en périphérie des massifs granitiques avec des compositions tout aussi variées que celles de ces derniers. Les principaux constituants sont : quartz, feldspaths (microcline, albite, plagioclase) et micas (muscovite) auxquelles peut être associée une minéralogie accessoire diversifiée (tourmaline, spodumène, lépidolite, pétalite...) et parfois précieuse (émeraude, béryl, topaze...)

Les plus répandues sont les pegmatites potassiques ou sodi-potassiques à quartz, microcline, perthite et/ou albite, muscovite, généralement pauvres en minéraux titanifères.

*Un gisement de ce type est exploité pour quartz et microcline à La Chapelle-Agnon, près d'Ambert (63).*

Les pegmatites restent la principale source de feldspaths potassiques de haute qualité (10 à 12 %  $K_2O$ ), obtenue soit par sélection manuelle (Inde, Brésil, Egypte, Afrique du Sud), soit par traitement (Lillesand en Norvège, Finlande, Etats-Unis, République tchèque, Carélie, Kola et Oural en Russie).

**Les aplites** sont des roches magmatiques très finement grenues, d'aspect saccharoïde de même composition granitique et de mêmes gisements que les pegmatites auxquelles elles sont fréquemment associées. Constituées pour l'essentiel de quartz, microcline et oligoclase et accessoirement de muscovite et tourmaline. Ce sont des roches claires dont la texture fine ne permet pas une sélection directe. Elles sont utilisées brutes avec des teneur en alcalins faibles ( $\approx 8\%$ ) et peu d'alumine (14 à 16 %). Malgré leur faible fusibilité et une teneur en fer moyenne (0,3 à 0,8 %  $Fe_2O_3$ ), elles peuvent constituer un appoint intéressant dans une masse céramique. Les gisements les plus remarquables sont en Italie (Campiglia, île d'Elbe) et aux Etats-Unis (Virginie).

**Les granites et les roches magmatiques intermédiaires** comme les syénites constituent d'abondantes sources de fondants feldspathiques à condition de satisfaire aux critères de blancheur et de fusibilité, sans nécessiter des traitements élaborés.

Ces roches magmatiques silicatées, présentes sous forme de vastes massifs dans les ceintures orogéniques, offrent des conditions d'accessibilité aisées et des ressources considérables ; mais le critère de blancheur à un coût économiquement supportable réduit le nombre de gisements exploitables.

*In fine* le nombre de roches susceptibles de convenir à cette application reste limité. On compte parmi elles : les granites alcalins, les granites spécialisés à métaux rares, certains granites calco-alcalins ou monzonitiques, les syénites alcalines et les anorthosites.

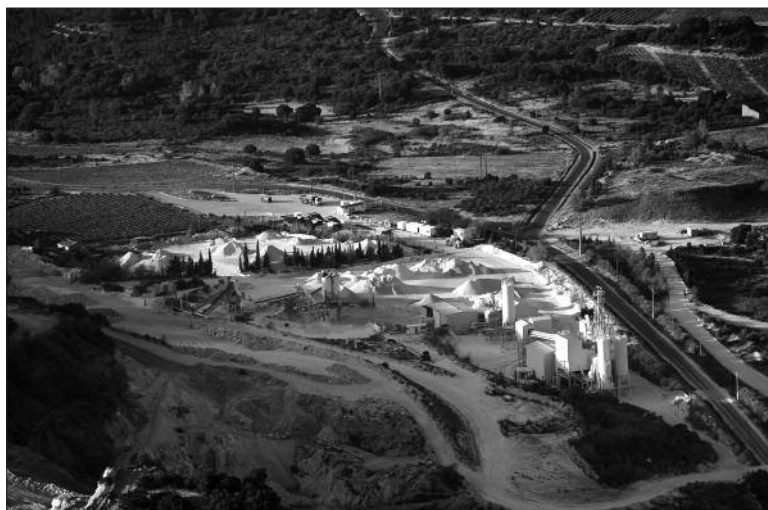
- **Les granites alcalins** ou **leucogranites** plus connus dans les massifs hercyniens européens (Massif central, Pyrénées, NW ibérique, Piémont italien, Bohême, Silésie) sous le vocable "granites à muscovite



Figure 2 : Les gisements de feldspaths français [Source Sim]. En France, Imerys possède cinq unités de production de feldspaths issus :

- de syénites alcalines et d'albitites, sur les carrières des Feldspaths du Sud dans les Pyrénées-Orientales [1] et l'Aude [2] ;
- d'un granite à albite et topaze très blanc, à Montebbras [3] (Soumans, Creuse) pour les marchés français et italien du carrelage (grès porcelainé) ;
- d'un leucogranite à deux micas arénisé, à Etang-sur-Arroux [4] (Saône-et-Loire) où, par tamisage et séparation magnétique en voie sèche, un feldspath mixte est produit pour le marché local du verre et du carrelage ;
- d'une pegmatite à La Chapelle-Agnon [5] (Puy-de-Dôme) donnant quartz (applications décoratives) et feldspath potassique triés mécaniquement à l'extraction.

L'unité de production de Lansac dans les Pyrénées orientales [Source Imerys]



ou à 2 micas" peuvent, lorsqu'ils sont suffisamment clairs, être utilisés directement. Sinon ils nécessitent un traitement visant à éliminer les phases colorées (micas noirs, ilménite, tourmaline, zircon, oxydes et hydroxydes de fer) et à concentrer les feldspaths par élimination du quartz.

Les gisements les plus notables sont ceux d'alaskite de Spruce-Pine en Caroline du Nord, de Sobotka en Pologne et d'Etang-sur-Arroux en France.

Situé dans le Morvan, ce dernier est constitué par un granite à 2 micas qui a subi une muscovitisation tardive, puis une altération météorique responsable d'une libération des grains, sans kaolinisation. Ce processus d'arénisation s'étend sur 15 à 30 m d'épaisseur. Le criblage et la séparation magnétique (SMHI) permettent d'obtenir un concentré en sables 0-0,8 mm à 11-12 %  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  et 16 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pour le verre et un produit broyé pour le sanitaire, ainsi que des concentrés de mica blancs (muscovite). La capacité annuelle est de 90 kt de feldspaths et de 6 kt de micas.

Des équivalents éruptifs de ces granites alcalins, à texture microgrenue ou microlitique, peuvent aussi être valorisés ; c'est le cas des rhyolites de Sarre, de Sardaigne et du Mexique.

En France les rhyolites faiblement albitisées de Treilles dans les Pyrénées Orientales ont été exploitées. La finesse de leur grain rend difficile tout traitement classique.

- **Les coupoles de granites spécialisés à métaux rares, Sn-Ta-Nb-W-Li et albite** représentent un cas particulier, tant par leur blancheur que par leur comportement céramique. Indépendamment de leur intérêt pour les métaux rares, ce sont des gisements feldspathiques importants utilisables en céramique après un simple gravillonnage. Leur valorisation peut être freinée par des teneurs trop élevées en fluor.

En France, le site de Montebbras dans la Creuse, est exploité pour la céramique depuis 1930. Il correspond à une lame de granite à albite-étain-tantale, épaisse d'une trentaine de mètres, formant une coupole entre une intrusion de microgranite au mur et le granite de Chanon encaissant, bien plus ancien. Sa composition moyenne est de 40 % de quartz, 26 % d'albite, 18 % de microcline et 15 % de muscovite avec une minéralogie accessoire variée (apatite, montébrasite, topaze, cassitérite et colombo-tantalite). La teneur en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  est inférieure à 0,20 %. Les ressources en feldspath atteignaient 10 Mt en 1995, avec un ratio de découverte de l'ordre de 1. La production est de 270 kt/an.

- **Les granites calco-alcalins et les granites monzonitiques** (granodiorites, diorites quartziques, monzogranites) riches en minéraux ferro-magnésiens ne conviennent généralement pas aux applications céramiques ou verrières. Seul le développement de textures particulières comme celles des granites porphyroïdes peuvent se prêter à un traitement simple. Les feldspaths potassiques, sous forme de cristaux automorphes pluri-centimétriques, peuvent être extraits par criblage lorsque la roche est arénisée et purifiés par SMHI après broyage.

Le gisement de Minalca, près du barrage d'Alcantara en Espagne, est un exemple de ce type avec une capacité de 70 kt de concentrés de feldspaths potassiques à 8 %  $\text{K}_2\text{O}$ , 2,5 %  $\text{Na}_2\text{O}$  et 16 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

- **Les roches magmatiques intermédiaires, saturées** (syénites, monzonites, diorites, gabbros), riches en alumine mais aussi plus chargées en ferro-magnésiens, ne sont pas exploitées pour les feldspaths ; seules exceptions, les syénites alcalines et les anorthosites, dont l'aspect leucocrate reflète une certaine richesse en feldspaths et une absence de minéraux colorés.

Les syénites alcalines à albite dominante, microcline, biotite et hornblende, avec accessoirement de l'augite, peuvent être soumises à un traitement magnétique, après broyage, pour extraire les minéraux colorés et concentrer les feldspaths. L'intérêt d'une telle opération dépend de son rendement.

Le gisement de Castillet, à Lansac dans les Pyrénées-Orientales, est un cas très exceptionnel de ce type de gisement. Il est constitué d'une syénite blanche à grisâtre formant un dôme d'une centaine de mètres de diamètre prolongé sur 500 m vers le NNE par un dyke irrégulier d'une dizaine de mètres de puissance moyenne. L'encaissant est le granite sombre de Lansac. La composition, à microcline et albite dominante, avec une faible quantité de biotite et chlorite, convient à la fabrication de verre d'emballage et de céramique. Le produit est livré soit en brut gravillonné, soit en sables 0-1 mm, dépoussiérés et traités par SMHI. La production avoisine les 150 kt/an.

Les anorthosites, roches leucocrates composées à 80-90 % de plagioclases basiques (andésine, labrador) et de faibles proportions de pyroxènes (hypersthène, augite), amphiboles, ilménite et titano-magnétite peuvent constituer une source de feldspaths, après traitement pour extraire les phases magnétiques. Les gisements de ce type sont présents sous forme de massifs dans les

boucliers très anciens (Précambrien). L'exemple type est l'anorthosite de Røgaland dans la région d'Egersund au sud de la Norvège.

**Les roches métamorphiques** peuvent présenter des compositions minéralogiques valorisables en céramique. C'est le cas des leptynites : roches leucocrates à grain fin et structure souvent rubanée, constituées essentiellement de quartz et de feldspaths alcalins, avec des minéraux colorés comme le grenat, les micas et l'amphibole, qui peuvent être facilement éliminés par SMHL. Ces roches abondent dans les socles anciens : Sud de l'Inde, Scandinavie, Canada, Brésil..., mais elles sont aussi présentes dans les séries métamorphiques hercyniennes : Saxe, Bohême, Péninsule ibérique, Massif central.

*Un exemple de ce type est fourni par les leptynites de Pont-de-Labaume en Ardèche, exploitées par le passé.*

**Les albitites** sont devenues d'importants gisements de feldspaths ces trente dernières années avec l'utilisation de plus en plus massive de feldspaths sodiques (jusqu'à 40-50 % de la masse) dans le carrelage. Le processus à l'origine de leur formation, qualifié d'albitisation, correspond à la destruction des principaux minéraux d'une roche silicatée (biotite, feldspaths potassiques, plagioclases, quartz...) par des fluides riches en F, Cl, Na, CO<sub>2</sub> et S et leur remplacement par de l'albite néoformée ou, plus rarement, par de l'oligoclase. Cette interaction roches-fluides a pour conséquences un enrichissement en Na et Al et un appauvrissement en K, Ca, Ba, Si et Fe.

L'intensité de l'albitisation est fonction de la nature et de la température des fluides, de la fracturation qui contrôle leur circulation et de la composition minéralogique de la roche-mère. Le contrôle est donc à la fois structural et pétrographique.

La blancheur en cru comme en cuit dépend de la composition de la roche-mère et notamment de sa richesse en minéraux ferro-magnésiens (biotite, amphiboles, pyroxènes, ilménite, titano-magnétite, allanite, monazite).

La morphologie des albitites est, en raison du contrôle structural, souvent filonienne ou lenticulaire avec des gisements alignés de manière discontinue sur les grandes directions tectoniques régionales.

L'exploitation de Salvezines dans l'Aude [Source Imerys]



*Un exemple de ce type de structuration régionale nous est fourni, dans le sud de la France, par l'alignement Agly - Salvezines - Bessède sur une direction pyrénéenne à N100°E. Dans cet ensemble, le gisement de Salvezines est exploité depuis 60 ans dans une boutonnière de terrains paléozoïques ouverte au sein d'une couverture de calcaires mésozoïques. Le massif d'environ 4 km sur 2 km est principalement constitué de granites hercyniens à muscovite et à muscovite-biotite, encaissés dans des gneiss, des schistes et des calcaires dévoniens. Un pointement de granodiorite à Puch-Séguy, quelques pegmatites et des enclaves de roches vertes complètent la pétrographie. Trois bandes d'albitites orientées N95-100°E recoupent ces formations paléozoïques. Celle de la carrière de Puch Seguy est encore activement exploitée, avec une production annuelle de 80 kt d'un feldspath à basse teneur en titane (0,10-0,15 % TiO<sub>2</sub>, comparé aux 0,35 % à 0,50 % du district). L'albitite se présente sous forme de filon redressé et zoné, d'une puissance de 10 à 20 m.*

**Les altérites feldspathiques** peuvent présenter un intérêt local ou régional, en appoint de produits plus riches. Ce sont des roches feldspathiques plus ou moins colorées qui

par altération (kaolinisation, séricitisation) perdent une partie du fer, mais conservent suffisamment d'alcalins pour avoir un intérêt en céramique. Parmi les gisements les plus remarquables on peut citer : les *cornish stones* (leucogranites kaolinisés) en UK, la *pegmatitsand* (pegmatite kaolinisée) en Bavière, les rhyolites kaolinisées de Boca en Italie, les *pottery stones* de Chine, les phyllites du Brésil et les kaolins alcalins d'Ukraine.

**Les arkoses ou sables feldspathiques.** A la différence des précédents gisements, qualifiés de résiduels, ces gisements ont subi un transport durant leur genèse et sont donc franchement sédimentaires. Compte tenu de la fragilité des plagioclases, ce sont essentiellement les feldspaths potassiques qui s'accumulent dans les séquences détritiques grossières avec le quartz, nettement dominant, la muscovite et des minéraux accessoires (tourmaline, ilménite, rutile, zircon, monazite...).

Dans les bassins sédimentaires, les arkoses apparaissent sous forme de niveaux relativement continus et réguliers, en position marginale, mais également de lentilles décamétriques à hectométriques dans des contextes deltaïques ou des fossés d'effondrement.

Les ressources sont considérables mais les gisements mis en production restent assez rares compte tenu des faibles teneurs (10 à 15 % de feldspaths) et des contraintes de blancheur qui doivent être élevées pour être économiques. Les arkoses peuvent être utilisées soit directement dans l'industrie du carrelage, comme celles du bassin de Cuencas-Teruel en Espagne et celles du Piémont en Italie, soit sous forme de concentrés obtenus par flottation, pour les industries du verre, des frites et des émaux. On peut citer dans ce cas les gisements de la région de Ségovie en Espagne (Incusa et Rio Piron) et ceux des rivières Jilhava et Luznice en République tchèque.

## Exploitation et traitement

**L'extraction** des feldspaths est, à de rares exceptions près, réalisée à ciel ouvert. Les méthodes et les matériels utilisés sont adaptés à la très grande diversité des gisements, en privilégiant la sélectivité dans les pegmatites et les albitites, d'allure filonienne ou les coûts moindres dans les gisements de plus grande taille et à faible teneur.

L'abattage est le plus souvent effectué à l'explosif. Outre la fragmentation, les tirs contribuent à la libération des minéraux.

**Les traitements** varient suivant la nature du minerai et les applications industrielles envisagées. Dans la plupart des cas, ils consistent en réductions granulométriques afin de faciliter une bonne dispersion et une relative homogénéité dans les masses céramiques et verrières.

Les premières étapes comprennent un concassage primaire et secondaire, réalisés respectivement avec des concasseurs à mâchoires, à percussion ou à impact. Ces opérations peuvent être mises à profit pour enrichir le minerai par criblage, triage manuel (scheidage) ou triage optique dans des environnements plus industrialisés.

L'opération suivante est le gravillonnage à l'aide de concasseurs giratoires ou à axe vertical (Barmac). Le produit gravillonné entre 5 et 10 mm peut être directement vendu aux industries du carrelage, qui procède au broyage final après mélange avec l'argile.

Le séchage des sables et des gravillons est le préalable à tout traitement complémentaire. Il est effectué dans un tube rotatif alimenté en combustibles variés (gaz, fioul ou bois). Les sables (0,1-1 mm) obtenus par criblage peuvent être directement utilisés dans les industries céramiques et verrières.

Le broyage associé à une classification est souvent l'étape finale de fragmentation. Il est réalisé dans des broyeurs à boulets, soit d'alumine, soit de silicium et revêtements de même nature dans le cas de produits destinés aux applications céramiques. La classification se fait aux moyens de tamis, de sélecteurs à air, statiques ou dynamiques ou de cyclones. L'industrie du sanitaire, la vaisselle, les émaux et les frites nécessitent des produits broyés à 60 ou 80 µm. Le broyage ultrafin, ou micronisation, est destiné à l'obtention de poudres inférieures à 25 µm, destinées aux charges minérales.

Dans certains cas, ces procédés de fragmentation peuvent être complétés par des opérations ayant pour objectif d'épurer et/ou d'enrichir le minerai afin d'obtenir les spécifications physico-chimiques requises par l'application. Parmi les traitements les plus courants, nous citerons :

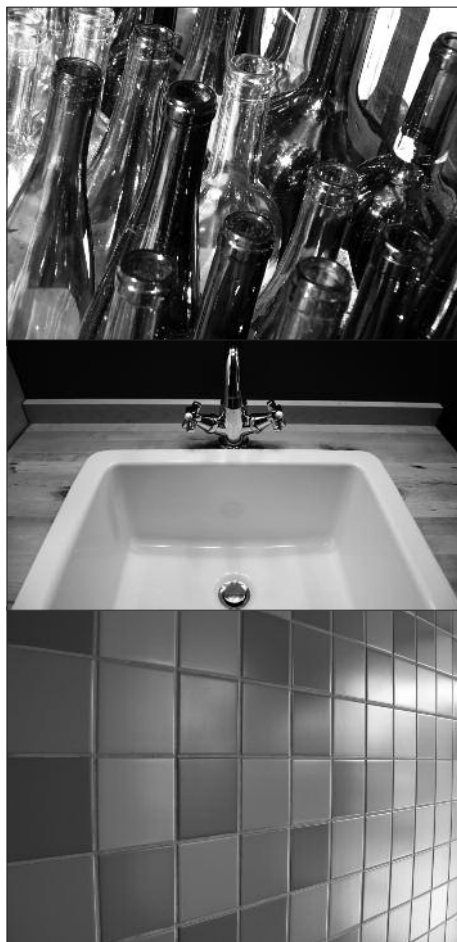
- la séparation magnétique à haute intensité (SMHI) utilisée pour éliminer les minéraux colorants contenant Fe, Ti, Mn et Mg. Dans la pratique cette séparation est réalisée en deux étapes : La première, en basse intensité, permet d'éliminer la fraction la plus magnétique (magnétite, hématite, goethite, ilménite et oxydes de Mn), puis la haute intensité pour traiter la fraction paramagnétique (biotite, muscovite, tourmaline, grenats, pyroxènes, amphiboles et chlorites). Les rotors à aimants permanents remplacent de plus en plus les séparateurs électriques à rouleaux induits. La SMHI convient bien aux applications verrières et constitue une étape de purification importante pour la céramique et les charges. En revanche, il n'est pas possible d'éliminer des phases colorantes peu magnétiques (épidote, sphène, anatase).
- dans ce dernier cas, il est nécessaire d'avoir recours à la flottation, qui permet de surcroît de concentrer les feldspaths par élimination de la fraction quartzreuse dans les minerais à quartz comme les granitoïdes, pegmatites et arkoses. Dans ce cas l'acide fluorhydrique est employé classiquement pour déprimer le quartz, les feldspaths étant flottés avec un collecteur cationique, puis des amines pour une séparation des plagioclases et des orthoclases. Des solutions sans HF, très nocif, sont activement mises au point. Pour les minerais sans quartz, la flottation est plus classique car il s'agit d'éliminer les oxydes colorants (hématite, goethite, rutile) et/ou les micas et autres silicates ferromagnésiens dans un contexte moins agressif. Le broyage en voie humide jusqu'à la maille de libération des minéraux et la présence d'ultrafines qui nécessite le déschlammage du minerai induisent des coûts qui ne peuvent être compensés que par des utilisations à haute valeur ajoutée (frites, émaux, verre blanc).
- la séparation électrostatique, basée sur la différence de conductivité électrique du quartz et des feldspaths, permet de séparer ces deux minéraux. Elle est particulièrement intéressante pour concentrer des sables traités par SMHI, déjà dépoussiérés. Mais dans la pratique, la productivité reste faible et la méthode est peu utilisée.

## Les applications industrielles

Dans les industries céramiques et verrières, qui représentent les principaux débouchés pour respectivement 70 % et 25 %, les feldspaths ont un rôle de fondant en contribuant à former la phase vitreuse à relativement basse température (1 180 à 1 400 °C). Dans les charges, outre la blancheur, la dureté et la résistance aux agents chimiques sont les propriétés recherchées.

**Dans le domaine céramique, le carrelage** est le principal débouché depuis le passage à la monocuisson à environ 1 200 °C. Les feldspaths sont devenus, avec les argiles, les constituants essentiels

de la masse des grès cérames, à faible porosité (<0,5 %) et à pâte blanche, où la phase vitreuse est importante et le pigment incorporé dans tout ou partie de la masse. Les carreaux émaillés traditionnels à pâte rouge, en forte régression, n'en consomment pas. Pour les carreaux de sol, il faut distinguer : les *grès cérames porcelainés*, blancs, à très faible porosité et grande résistance



Principaux secteurs d'applications  
[Sources Andrew Beierle, Angel Norris & Ginny Warner]

mécanique (40 à 60 % de feldspaths), polis ou émaillés, les *grès cérames ordinaires* (30 à 40 % de feldspaths), le plus souvent émaillés et les *grès traditionnels*, étirés ou pressés, poreux (5 à 15 % de feldspaths) mais très résistants. Les revêtements muraux se partagent, en fonction de leur porosité et de leur résistance aux chocs et aux agressions chimiques, entre les *grès cérames* et la *faïence feldspathique* plus poreuse (10 à 15 % de feldspaths) et fragile.

Pour le **sanitaire**, on peut à partir de la formulation distinguer deux familles : les *grès fins sanitaires* (ou grès chamottés), poreux et lourds, constitués d'argiles grésantes et de chamottes réfractaires, avec un peu de feldspath (5-15 %) pour assurer la vitrification et la *porcelaine sanitaire* vitrifiée (ou vitréous) dont la composition est intermédiaire entre la porcelaine et les grès cérames avec 20 à 25 % de feldspaths, des argiles, du kaolin et de la silice.

Dans le cas de la **vaisselle**, la formulation et la technologie mise en œuvre évoluent suivant le type de produits fabriqués : *faïences de table*, *grès culinaires*, *porcelaines et vitréous*.

A l'exception du *vitréous*, tous les types de vaisselle subissent une double cuisson avec un premier cycle généralement à haute température (1 200 à 1 350 °C) pour obtenir un biscuit blanc et un second cycle, à plus faible température, après couverture par la glaçure ou l'émail.

- **Les faïences fines**, à pâte blanche, légèrement poreuses se divisent en *faïences calcaires*, où le fondant est du calcaire, surtout utilisées en poterie et décoration, et *faïences feldspathiques*, plus résistantes. Pour celles-ci une composition classique est 25 % d'argiles, 25 % de kaolin, 35 % de silice et 15 % de feldspaths potassiques ou mixtes.

- **Les grès culinaires**, peu poreux et très résistants, sont surtout utilisés pour les récipients (plats à four, plat à micro-ondes, etc.). Leur composition est voisine de celle des grès fins sanitaires où le mélange d'argiles joue un rôle essentiel et le feldspath (10 à 15 %) est un appoint de grésification.

- **Les porcelaines**, sont les produits céramiques les plus blancs, translucides. Elles sont caractérisées par l'abondance de la phase vitreuse (70 à 80 %) et un squelette de mullite qui leur confère imperméabilité et dureté. Elles sont composées de 50 % de kaolin, 25 % de feldspaths potassiques et 25 % de quartz. En complément des usages domestiques et décoratifs, certaines porcelaines techniques sont utilisées comme isolants électriques pour leur forte conductivité thermique, leur faible coefficient de dilatation et leur grande résistance électrique. Leur emploi, réservé aux très hautes tensions en raison de leur coût, est de plus en plus concurrencé par des céramiques à base d'alumine et des composites.

- **Les vitréous**, compositions céramiques proches des faïences feldspathiques mais entièrement vitrifiées, sont utilisées en vaisselle d'usage courant. Leur teneur en fondant feldspathique représente 25 à 30 % de la masse.

**Les frites** sont des verres broyés qui entrent dans la composition des **émaux**, vernis de revêtement des produits céramiques servant à masquer la porosité (faïences, pièces sanitaires, terres cuites) et la texture. **L'émail** a aussi un but décoratif avec l'addition de pigments. La composition de l'émail dépend du mode (à sec, en suspension) et de la température de mise en œuvre. Les glaçures de basses températures sont à base de minéraux alcalins et d'oxydes métalliques (sel, borax, plomb) ; les frites sont à base de silice, de feldspaths alcalins (25 à 35 %), d'alumine sous forme de kaolin, de colorants et d'opacifiants.

**Dans l'industrie verrière**, les proportions des diverses matières employées dépendent dans une large mesure du type de verre produit. Les feldspaths ont un rôle à la fois de fondant (apport de Na et K), de stabilisant (apport d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et de colorants en fonction de leur teneur en fer. Des notions de coût des mélanges interfèrent avec celles de rendements des fours. La composition moyenne des *verres silicatés calcosodiques*, qui représentent le type le plus répandu (80 %) dans l'emballage, le verre plat et le flaconnage est la suivante : 72 % SiO<sub>2</sub> ; 13 % Na<sub>2</sub>O ; 11 % CaO ; 2 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ; 1 % MgO ; 0,5 % K<sub>2</sub>O et 0,03 à 0,5 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> selon la couleur. L'usage de plus en plus développé de verre recyclé sous forme de calcin tend à réduire la consommation de matières premières, dont le feldspath. L'industrie verrière représente actuellement 25 à 30 % de la consommation totale de feldspaths.

**Comme charges minérales**, les feldspaths épurés et finement broyés présentent une bonne blancheur, une bonne résistance aux agents chimiques et à l'abrasion. Leur aptitude à la dispersion du fait d'une faible surface spécifique et la faible viscosité en pulpe en font d'excellentes charges dans les peintures, les plastiques, le caoutchouc, les adhésifs et les mastics. Concurrencés par les carbonates, les kaolins et le talc dans les usages courants, ils s'imposent pour des conditions extérieures plus sévères, sans présenter les risques sanitaires liés à la silice libre micronisée. Encore peu développées dans l'Union européenne, ces applications comme charges le sont beaucoup plus en Amérique du Nord.

## Quelques données économiques mondiales et françaises

Compte tenu de la diversité géologique des sources et de leur large distribution dans près de 70 pays différents, il n'est pas toujours aisé d'obtenir des chiffres fiables de production comme de consommation. La confusion entre produits bruts, produits élaborés, concentrés est fréquente. Les dernières statistiques globales publiées par l'USGS pour 2009 font état d'une production mondiale de 19 millions de tonnes en repli de 14 % par rapport à celle de 2008 (22 Mt).

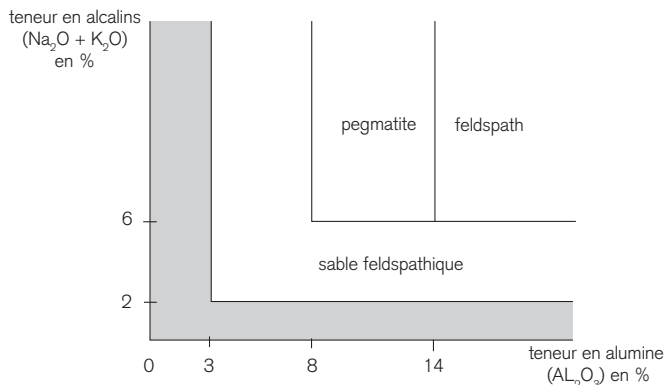


Figure 3 - Terminologie des matières premières feldspathiques [Source IMA]



La carrière de Montebbras dans la Creuse [Source Imerys]

A noter enfin une production de 30 kt /an de phonolite à Roche-en-Régnier (43) assurée par la société Samin, filiale de Saint-Gobain.

En tête des pays producteurs, on trouve la Turquie (5 000 kt en 2009) suivie de près par l'Italie (4 200 kt), puis la Chine (2 000 kt). La France est au 7<sup>e</sup> rang mondial avec une production totale de 550 kt en 2009. Les productions de pays tels que la Russie (150 kt), l'Inde (340 kt) et l'Ukraine (70 kt) paraissent fortement sous-évaluées.

En terme de consommation, la Chine qui dispose d'argiles peu grésantes, est au premier rang avec près de 10 000 kt /an de minerais feldspathiques, y compris les "pottery stones", "china stones", arkoses et kaolins alcalins.

Malgré la forte position de certains pays qui disposent de réserves exceptionnelles, comme la Turquie pour le carrelage, une situation de monopole est difficilement envisageable. Le feldspath reste une commodité assez bien répandue et toute augmentation de prix suscite rapidement l'émergence de nouvelles sources et l'adaptation des utilisateurs qui reformulent leurs compositions.

Malgré une grande dispersion de la production, quelques grandes compagnies se sont constituées : grupo Minerali en Italie (capacité de 3 Mt), Katun (1,4 Mt), Ciné Akmaden du groupe Unimin-Sibelco (1,4 Mt) et Esan Eczasibaci (1,2 Mt) en Turquie, Imerys en Europe, Etats-Unis et Inde (1,0 Mt) et Unimin-Sibelco (1,0 Mt) en Europe, Etats-Unis, Malaisie, Inde et Brésil. En Chine, la société Conghua Xingfa traite environ 1,0 Mt de produits feldspathiques.

**La production française** de 550 kt en 2009 (**figure 2**) est entièrement assurée par Imerys Ceramics France à partir de 3 centres : Felspaths du Sud à Salvezines (11) et Lansac (66), Montebbras (23) et Etang-sur-Aroux (71). Les exportations ont atteint 230 kt en 2009, principalement pour le carrelage vers l'Italie depuis Montebbras et vers l'Espagne depuis Felspaths du Sud. La production d'Etang-sur-Aroux est essentiellement destinée au marché français du verre d'emballage et du sanitaire. Les importations françaises, entre 25 et 60 kt suivant les années, correspondent principalement aux besoins en feldspaths potassiques des secteurs vaisselle et décoration.

## Références bibliographiques

- AUBERT G. (1969). Les coupoles granitiques de Montebbras et Echassières (Massif Central) et la genèse de leurs minéralisations en Sn-W-Li-Be. BRGM, Mém. 46.
- CERNY P. & ERCIT T. S. (2005). The classification of granitic pegmatites - The Canadian mineralogist, 43.
- CLAVIERES V. (1990). Muscovitisation et feldspathisation hydrothermales dans le massif de Millas (Pyrénées Orientales). Thèse doct. Université Paris VI.
- DEMANGE M., LIA-ARAGNOUET F., POULIQUEN M., PERROT X., SAUVAGE H. (1999). Les syénites de Castillet (Pyrénées-Orientales), une roche exceptionnelle dans les Pyrénées. C.R. Académie des Sciences, vol. 329,5 - Paris.
- DEMANGE M. & PASCAL M.L. (1979). Structure du massif nord-pyrénéen de Salvezines (Aude). C.R. Académie des Sciences - Paris - vol.289, 711-714.
- GRUND Editions - La grande encyclopédie des minéraux.
- HARBEN P. & KUZVART M. (1996). Industrial Minerals, A global geology. Ed. IMIL - London.
- HAUSSONE, CARRY, BOWEN et BARTON. Traité des matériaux, Tome 16, Céramiques et verres. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne.
- IMA-Europe / EUROFEL. Le feldspath.
- LAPADU-HARGUES P. (1964). Précis de minéralogie. Ed. Masson.
- LE DOUSSAL & VOUILLEMET (1997). Techniques de l'ingénieur/Matériaux/Céramiques de bâtiment- Carreaux et produits sanitaires.
- LEHMANN. - Techniques de l'ingénieur / Matériaux / formulation du verre et produits verriers.
- MEDENBACH O. & SUSSIECK-FORNEFELD C. (1983). Les minéraux - Ed. Solar.
- PAGANELLI M. (1991). Raw material preparation and forming of ceramic tiles. Revista cerâmica industrial brasileira.
- PASCAL M.L. (1979). Les albitites du massif de l'Agly (P-O et Aude); Thèse doct. E.N.S.Mines, Paris.