



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

mémento roches et minéraux industriels

feldspaths et roches à feldspathoïdes

B.E. Odent

décembre 1994
R 38221

numéro de référence P10480002



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

BRGM
DIRECTION DE L'EXPLORATION ET DES PROCÉDES
Département Procédés et Analyses
B.P. 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX 2 - France - Tél. : (33) 38 64 34 34

Mots clés : Marché mondial, Marché français, Feldspath, Feldspathoïde, Syénite néphélinique.

© Ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	5
1. MARCHE.....	7
1.1. Le marché mondial des feldspaths	7
1.1.1. <i>La production mondiale</i>	7
1.1.2. <i>Les flux commerciaux</i>	11
1.2. Le marché des feldspaths en France et dans la CEE.....	12
1.3. Le marché mondial de la syénite néphélinique.....	14
1.4. Le marché de la syénite néphélinique en France et dans la CEE	15
1.5. Le bilan économique français.....	16
2. PRIX	19
2.1. Le prix des feldspaths	19
2.2. Le prix de la syénite néphélinique.....	20
3. STRUCTURE DE LA PROFESSION FRANCAISE	21
3.1. Les exploitants	21
3.2. Les carrières.....	23
3.3. Le négoce des produits feldspathiques	23
4. GEOLOGIE.....	25
4.1. Minéralogie des feldspaths.....	25
4.2. Minéralogie des feldspathoïdes.....	26
4.3. Gîtologie	27

5. UTILISATIONS	31
5.1. L'industrie du verre.....	31
5.2. L'industrie des céramiques	33
5.2.1. Les pâtes céramiques	33
5.2.2. Emaillage - engobes.....	33
5.3. Autres usages	33
6. SPECIFICATIONS.....	37
6.1. Utilisation en verrerie	37
6.2. Utilisation en céramique	38
6.3. Autres usages	40
7. METHODES D'EXPLOITATION ET TRAITEMENT DES FELDSPATHS	43
7.1. Exploitation.....	43
7.2. Traitement.....	43
8. CRITERES D'EXPLOITABILITE DES GISEMENTS.....	45
8.1. Critères généraux	45
8.2. Gisements de feldspaths.....	45
8.3. Gisements de syénite néphélinique.....	45
9. PRODUITS DE SUBSTITUTION.....	47
Remerciements	47
Bibliographie	49
Liste des figures	51
Liste des tableaux.....	51

INTRODUCTION

Les industries du verre et de la céramique utilisent les plus importantes quantités de feldspaths et de roches feldspathoïdes, à la fois pour leur propriété de fondant et pour leurs apports en alumine et en éléments alcalins (potassium et sodium).

Feldspaths et feldspathoïdes sont également utilisés dans d'autres industries, jouant le rôle de produits de charge, d'abrasifs, de minerai d'aluminium, etc.

Nota :

1) La syénite néphélinique est la roche à feldspathoïde la plus fréquemment utilisée car elle possède des propriétés voisines de celles des feldspaths. Etant donnée cette concurrence directe pour certaines utilisations, ces deux minéraux industriels seront étudiés dans des chapitres séparés.

2) Bien que roche feldspathique, l'aplite est classée à part. Le principal producteur mondial est le Japon avec une production annuelle supérieure à 500 000 t. Ne répondant pas aux spécifications de l'industrie céramique, l'aplite peut être utilisée en verrerie lorsque la teneur en fer est suffisamment faible. Moins recherchée que les feldspaths traditionnels et la syénite néphélinique, son prix de vente est généralement faible, aux environs de 26 US\$/t pour une qualité verrerie, en vrac, FOB Montpellier - USA.

1. MARCHE

Les données des tableaux illustrant les paragraphes qui suivent, sont issues de statistiques des organismes professionnels, du service des Douanes ou de revues spécialisées. Les estimations que nous avons réalisées sont toujours identifiées par un astérisque.

1.1. LE MARCHE MONDIAL DES FELDSPATHS

1.1.1. La production mondiale

La constante progression constatée dans la production mondiale de feldspaths depuis 1975, s'est poursuivie jusqu'à maintenant, même si un ralentissement certain se manifeste depuis quelques années, comme le montrent les chiffres ci-après :

	1980	1984	1986	1988	1991
Tonnage (Mt)	3,6	4,1	4,6	4,85	5,2
Progression (%)	n.c.	+ 13,8	+ 12,2	+ 5,5	+ 7,2

Le tableau 1 détaille, pays par pays, l'évolution de la production de feldspaths de 1987 à 1992.

Durant cette décennie, l'Italie a renforcé sa place dominante sur le marché mondial, passant de 18 % de la production mondiale en 1980 (640 000 t) à 30 % en 1991 (1 590 000 t).

Dans un registre nettement moindre, les autres pays qui avaient une production significative en 1991, étaient dans l'ordre décroissant : les USA (650 000 t), la France (400 000 t), l'URSS et la RFA (environ 330 000 t chacun), la Thaïlande (passant de 24 000 t en 1980 à 515 000 t en 1989, stabilisée à 320 000 t actuellement), la Corée du Sud (230 000 t), le Mexique (190 000 t), la Turquie (175 000 t), l'Espagne (150 000 t) (voir tabl.1).

• Principales sociétés productrices en 1990 (hors France)

En 1990, les principales sociétés productrices de feldspath dans le monde étaient Unimium Canada Ltd avec environ 600 000 t, Feldspath Corp., USA avec 390 000 t et Commercial Minerals Ltd, Australie avec 200 000 t.

En Italie, le principal producteur de feldspaths est *Maffei SpA*, filiale d'un des plus importants producteurs de carrelages *IRIS Ceramica SpA*, avec 200 000 t de feldspaths sodiques provenant de la carrière de Pinzola, dans le Trentin.

Un autre producteur, basé à Milan, est *Miniera di Fragne SpA*, qui possède une carrière à ciel ouvert à Mud di Mezzo. *Societa Esercizio Cave Feldspato SrL (SECF)* et *Italminieraria SpA* exploitent des carrières dans le gisement de feldspaths de Dervio, près du lac de Côme. *Sabbie Silicee Fossanova SpA* traite des dunes de sable feldspathique potassique dans le Latina.

Mémento roches et minéraux industriels : feldspaths et feldspathoïdes

Pays	1987	1988	1989	1990	1991	1992*
Argentine	29 282	39 469	23 688	24 000	23 000	
Australie	11 499	15 877	15 000	16 000	16 000	
Autriche	4 692	8 222	7 251	8 788	10 429	11 059
Brésil	118 608	109 534	120 000	120 000	95 000	115 000
Burma	5 619	4 938	1 812	2 476	2 500	
Chili	705	4 569	8 081	2 980	3 000	
Colombie	33 760	37 136	40 850	34 800	35 000	
Equateur	1 558	5 000	21 814	10 000	9 000	
Egypte	15 963	6 131	27 731	9 894	27 000	
Finlande	51 632	56 200	54 581	52 630	53 000	50 000
France	274 000	322 000	360 000	420 000	400 000	400 000
Allemagne (RFA)	310 447	308 776	332 638	337 572	328 788	385 000
Guatemala	7 669	8 959	7 000	11 895	12 000	
Hong-Kong	22 853	11 050	5 152	3 820	3 500	
Inde	49 663	57 656	56 690	54 000	55 000	
Iran	16 226	14 781	20 458	30 000	30 000	
Italie	1 188 700	1 367 776	1 350 733	1 605 421	1 304 203	1 330 000
Japon	33 754	29 465	43 137	57 877	92 201	63 000
Kenya	-	-	1 112	1 290	1 300	
Corée du Sud	180 269	241 511	232 607	237 447	235 000	282 000
Mexique	106 490	83 170	121 978	163 011	194 506	200 000
Maroc	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	
Nigéria	485	190	945	714	700	
Norvège ¹	90 000	90 000	90 000	90 000	90 000	100 000
Pakistan	6 675	9 026	7 703	10 249	10 000	
Pérou	64 749	2 378	10 000	10 000	10 000	
Philippines	11 996	9 199	36 803	46 102	45 000	
Pologne	55 000	50 000	50 000	45 000	40 000	45 000
Portugal	40 729	51 903	65 854	43 954	45 000	95 000
Roumanie	82 000	65 000	59 960	45 000	50 000	27 715
Afrique du Sud	50 930	61 440	72 934	56 124	70 308	
Espagne ²	161 631	195 668	198 274	214 152	192 000	150 000
Sri Lanka	7 442	6 345	6 656	9 698	9 500	
Suède	34 226	38 180	38 437	41 197	32 000	35 000
Taiwan	28 116	19 101	9 806	7 321	7 000	
Thaïlande	168 881	293 678	515 206	311 249	320 000	523 000
Turquie	30 336	82 225	90 751	155 000	175 000	200 000
URSS (Russie 1991-92)	330 000	330 000	330 000	300 000	105 000	100 000
Royaume-Uni	5 692	6 267	6 470	6 500	6 417	8 000
USA	655 000	650 000	655 000	630 000	580 000	696 000
Uruguay	3 016	2 787	2 680	3 000	3 000	
Venezuela	43 546	96 500	97 000	91 000	95 000	95 000
Yougoslavie	44 912	35 615	44 246	43 490	40 000	
Zambie	45	120	20	60	80	
Zimbabwe	2 962	3 730	2 697	2 197	2 200	
Total	4 382 758	4 842 727	5 244 755	5 269 262	5 022 295	5 433 000*

* Pour l'année 1992, valeurs estimées ou non-communiquées

¹ Excluant la syénite néphélinique

² Incluant pegmatites

Tabl. 1 - Production mondiale de feldspaths (en tonnes)
(source : Mineral Yearbook, US Bureau of Mines).

Aux Etats-Unis, les feldspaths sont exploités dans six états, la Caroline du Nord étant le principal producteur avec 71 %, suivie par le Connecticut, la Californie, la Géorgie, l'Oklahoma et le Dakota du Sud.

Le gisement de Kings Mountain, Tennessee, appartient à la société *Cyprus Foote Mineral Co*, qui l'exploite pour le spodumène (lithium), avec pour sous-produit des sables feldspathiques dont la capacité atteint 100 000 t/an.

Pacer Corporation exploite un gisement de feldspath potassique à Custer, dans le Dakota du Sud depuis 1970.

Feldspar Corporation qui est le plus important producteur des USA, a déplacé récemment son siège à Asheville, en Caroline du Nord, en même temps que la société *Zemex Corporation* qui appartient au même groupe.

Cette société exploite quatre carrières à ciel ouvert et quatre usines de traitement :

- Spruce Pine, Caroline du Nord, qui a une capacité de 163 000 t/an de feldspath sodique ;
- Middletown, Connecticut, ayant une capacité de 90 000 t/an de feldspath sodique ;
- Montpelier, Virginie, produisant 163 000 t/an d'aplite (seul producteur US) ;
- Monticello, Géorgie, ayant une capacité de 45 000 t/an de feldspath potassique.

KMG Minerals Inc. exploite une carrière à Kings Mountain, en Caroline du Nord, ayant une capacité de 30 000 t/an de feldspath potassique.

Corona Industrial Sand Co à Corona, en Californie, produisait 300 000 t/an d'un mélange feldspath-silice en 1988. La capacité a été portée à 450 000 t/an en 1990.

Unimin Corp. exploite à Emmet, dans l'Idaho, une carrière d'un mélange feldspath-silice, ainsi qu'une carrière de feldspath sodique à Spruce Pine, en Caroline du Nord.

Indusmin, principal producteur mondial de la syénite néphélinique, exploite aussi une carrière de feldspath à Spruce Pine.

US Silica Co., une filiale de *US Borax*, produit du sable feldspathique à Oceanside, en Californie. Filiale de *Ogelbay Norton, California Silica Products* a une usine à Mission Viejo pour traiter un tout-venant feldspath-silice.

En RFA, *Amberger Kaolinwerke GmbH (AKW)* était le premier producteur national de feldspaths et de kaolin et le leader européen pour les feldspaths potassiques extraits dans des carrières à ciel ouvert. Cette société exploite un gisement de 4,5 x 0,6 km à Hirschau-Schnaittenbach, produisant 1,2 Mt par an de kaolin, feldspath et sable quartzeux, correspondant à 150 000 t de feldspaths traités.

Gebrüder Dorfner GmbH & Co Kaolin-und Kristallquarzsand-Werke KG exploite une carrière à ciel ouvert dans la même ville pour une capacité de production de 40 000 t/an. Dans la même région, *Hutschenreuther AG. Keramische Rohstoffe und Massen* exploitent deux carrières totalisant 30 000 t/an.

Au Mexique, *Vitro Group* est le principal producteur du pays avec deux carrières. La première est exploitée par *Materias Primas Minerales de San José* dans l'état de Guanajuato, à San José Iturbide, qui produit à la fois du sable siliceux. et du feldspath potassique. Ce dernier, produit au rythme de 80 000 t/an (capacité de 160 000 t/an), est utilisé dans deux verreries locales et en partie exporté en Californie. La seconde carrière, appartenant à *Materias Primas Minerales de*

Ahuazotepec SA, est localisée près de Ahuazotepec, dans la province de Puebla, et sa capacité de broyage est de 36 000 t/an.

En Turquie, la production est actuellement modeste (de 45 000 à 100 000 t/an) mais en croissance rapide. Les feldspaths sodiques sont exploités dans le district de Cine-Milas de la Province de Mugla. Les producteurs les plus importants sont : *Esan Eczacibasi AS*, *Seramik AS*, *Armaden Ltd Cine*, *Toprak Seramik AS* et *Matel Hammadde Sanayi ve Ticaret AS*. Cette dernière société produit des "ball-clays", du kaolin, des feldspaths et de la syénite néphélinique. Elle exploite plusieurs petites carrières de feldspath potassique dans le massif de Mendares, dans la région de Milas. La capacité annuelle est de 100 000 t, mais la production ne dépassait pas 40 000 t/an en 1988. Celle-ci devrait rapidement progresser car la volonté d'exporter est forte. Ainsi, pendant le premier semestre 1990, les exportations vers l'Italie ont atteint 22 000 t.

En Espagne, *Llansa SA*, une filiale de *Miner SA*, est le principal producteur espagnol. Elle exploite trois carrières de feldspaths sodiques et deux carrières de feldspaths sodico-potassiques à quelques kilomètres de la ville de Llansa, dans la province de Gerona. La capacité des deux usines est de 80 000 t/an.

Avant 1988, *Industrias del Cuarzo SA* était le plus important producteur de la province de Ségovia. Il a été ensuite remplacé par la *Compania Minera de Rio Piron SA (CMRP)* qui exploite une carrière à Navas de Oro, dans la Province de Ségovia, et dont la capacité de production est de 40 000 t/an de feldspaths potassiques et de 60 000 t/an de sable siliceux. Cette société prévoit dans un futur proche de doubler ces deux capacités. Un autre producteur significatif est *Basazuri & Sulurak SL*, une filiale de *Silicatos Minerales SL* qui produit du feldspath près de Foz, dans la province de Lugo.

Le Brésil a produit 140 000 t de feldspaths en 1989. La production se répartit pour 50 % dans l'Etat de Minas Gerais, 25 % dans l'état de San Paulo, 10 % dans l'état de Rio de Janeiro et le reste dans la Province du Nord-Est. Les quatre principales compagnies sont *Metamig* et *Arqueana de Minerios* dans l'Etat de Minas Gerais, *Sandspar Minerios* et *Fiorelli Peccicacco* dans l'Etat de Bahia. *Mineracao Matheus Leme Ltd* est propriétaire d'un gisement dans l'Etat de Goiás, non loin de Brasilia.

En Norvège, *Norfloat A/S*, une filiale de H.Bjorum de Oslo, est le seul producteur notable de feldspaths avec 27 000 t/an de feldspaths potassiques et 43 000 t/an de feldspaths sodiques, exportés à 90 % vers l'Allemagne et le Royaume-Uni.

En Afrique du Sud, la production était encore modeste en 1990, atteignant 73 000 t dont 98 % de feldspaths sodico-potassiques. Trois carrières à ciel ouvert sont exploitées dans la province du Cap :

- *Kamgab Minerale* exploite la carrière de Swartkop, et la production est commercialisée par Boland Base Minerals ;
- la carrière de feldspath potassique de Kakamas est exploitée par *JTC* et les produits sont commercialisés par *J. Trading Corp* ;
- la production de la carrière appartenant à *Kernhardt Base Minerals* est commercialisée par *Ceramic Minerals (Pty) Ltd*.

Trois carrières sont également exploitées dans la Province du Transvaal, à l'intérieur de la région de "Mica" :

- la carrière de Morelag près de Palabora (Phalaborwa), exploitée par *Freddies Minerals* ;
- celle de Marble Bath, exploitée par *Gelletich Mining Industries* ;

- une autre exploitée par *Pegmin (Pty) Ltd*, qui est une filiale à part entière de *Rand London Corporation Ltd*.

En Suède, *Berglings Malm & Mineral AB* a prévu le début de la production de feldspaths sodiques pour le début de l'année 1993. Le gisement et l'usine de traitement sont situés à Bäckegruvan, au centre du pays, avec une capacité de traitement de 100 000 t/an.

En Grèce, deux usines ont été récemment installées, l'une par *Mevior SA* à Assiros, près de Thessalonique qui produisait 16 000 t/an de feldspath sodique en 1993 (capacité de l'usine de 60 000 t/an), et l'autre par *Porcel SA* à Paranesti en Macédoine orientale, ayant une capacité de 18 000 t/an de feldspath potassique.

Le Canada est un petit producteur de feldspaths avec 2 500 t/an. *Brenda Mines*, appartenant au Groupe *Noranda* a un gisement de pegmatite renfermant autant de feldspaths sodiques que potassiques, dans le sud de la Colombie Britannique. *Bearcat Explorations* étudie un gisement de 20 km de long près du Kimberly, à Hellroaring Creek. A Bernic Lake, dans le Manitoba, *Tantalum Mining Corporation of Canada (Tanco)* attend des conditions économiques plus favorables pour exploiter les rejets riches en feldspaths potassiques de son usine de traitement du spodumène. Sa production de feldspaths pourrait atteindre alors 27 000 t/an. Au Québec, *Canspar Resources Inc.* a prévu de développer un gisement à l'est de Sept-Iles pour l'année 1992.

1.1.2. Les flux commerciaux

Les flux commerciaux des feldspaths (exportations-importations) au niveau mondial sont reportés dans le tableau 2.

Pays	Exports (en t)	Imports (en t)
Royaume-Uni	169	36 895
Benelux	52	16 385
Danemark	50	3 644
France	92 500	32 953
Allemagne	35 614	83 584
Italie	23 056	246 376
Pays-Bas	2 118	21 028
Autriche		3 588
Finlande *	31 401	64
Pologne		**** 9 944
Suède *	*** 19 549	*** 8 270
Suisse *	69	**** 11 890
USA	9 144	
Hong-Kong *	36 957	**** 21 842
Indonésie *		**** 13 522
Chine *	38 700	
Japon	31 770	**** 9 611
Corée du Sud	22 988	
Thaïlande	16 982	**** 1 054
Taiwan **		**** 110 482
TOTAL	361 125	631 132

* Incluant une partie de leucite et syénite néphélinique

** Incluant une partie de fluorine

*** Données 1991

**** Données 1984

Tabl. 2 - Exportations-importations mondiales de feldspaths en 1992. Source : British Geological Survey et Eurostat.

Les matériaux feldspathiques sont des matériaux pondéreux en grande partie vendus en vrac. Leur distance de livraison dépasse rarement plusieurs centaines de kilomètres. Seuls, les produits de qualité supérieure tels certains feldspaths pour céramique ou des poudres micronisées supportent un transport sur grande distance (plusieurs milliers de kilomètres).

En 1992, la France était le premier pays exportateur avec 92 500 t, suivie par la Chine (38 700 t), Hong-Kong (36 900 t), l'Italie et l'Allemagne (35 500 t). Le total des exportations avoisinait 330 000 t, dont 110 000 t (environ 1/3 des exportations mondiales) provenant de la Communauté Européenne. En 1993, la France restait parmi les premiers pays exportateurs avec 74 400 t (voir § 1.2).

Le principal pays importateur est l'Italie avec 246 300 t, suivie par l'Allemagne (83 500 t), le Royaume-Uni (36 900 t), Hong-Kong (21 800 t) et les Pays-Bas (21 000 t). Le total des importations mondiales était d'environ 400 000 t, dont 200 000 t (50 %) vers la Communauté Européenne.

1.2. LE MARCHÉ DES FELDSPATHS EN FRANCE ET DANS LA CEE

La production française de feldspaths a atteint un maximum de 484 000 t en 1991 (9,3 % de la production mondiale) pour redescendre à 369 000 t en 1993.

La France se plaçait en 1990-1991 au troisième rang mondial des producteurs de feldspaths avec plus de 450 000 t, et elle restait en 1993 le principal pays exportateur avec environ 74 000 t (tabl. 3).

Le tableau 3 regroupe les principales données depuis plus de 10 ans, les productions et les livraisons étant exprimées en tonnes, et les exportations-importations en milliers de francs.

Années	Production (en t)	Livraisons totales (en t)	Exportations (en kF)	Importations (en kF)
1981	195 629	191 428	20 917	23 193
1982	178 568	180 575	20 968	16 175
1983	168 216	171 049	22 252	30 298
1984	198 910	203 138	26 512	33 031
1985	214 579	222 862	26 848	33 446
1986	215 586	223 732	26 867	30 098
1987	274 025	208 580	32 826	33 455
1988	322 214	321 496	38 173	31 436
1989	416 935	417 299	51 752	32 251
1990	467 633	460 132	53 386	34 012
1991	484 042	474 583	48 314	37 150
1992	385 710	379 441	39 990	35 465
1993	369 295	361 615	32 897	29 298

Tabl. 3 - Marché des feldspaths en France de 1981 à 1993
(d'après le Syndicat National des Producteurs de Kaolin et de Feldspath Français,
15, avenue Victor Hugo - 75116 Paris - Téléphone : (1) 45.00.18.56).

Stabilisée aux environs de 200 000 t/an jusqu'en 1985, la production a fortement progressé ensuite, passant à 416 000 t en 1989, atteignant une valeur record de 484 000 t en 1991, pour décroître aux environs de 370 000 t en 1993.

Les valeurs des exportations ont progressé de 60 % de 1981 à 1993, elles sont passées de 20 MF en 1981 à un chiffre record de 53 MF en 1990, pour redescendre à 32 MF en 1993.

Les valeurs des importations sont relativement stables dans le temps, aux environs de 30 MF.

Dans le tableau 4 sont détaillées les origines et les destinations des flux commerciaux de la France en 1993 (source : Statistiques Eurostat, issues des statistiques douanières de la CEE).

	IMPORT		EXPORT	
	Quantité	Valeur	Quantité	Valeur
U.E.B.	2	159	10172	4723
Pays-Bas	7	7		
Allemagne	9229	3893	11779	6043
Italie	601	439	531	935
Roy.Unis			144	189
Danemark			19	113
Portugal	691	261	891	3766
Espagne	912	519	47377	12591
Norvège	1090	552	1	11
Suède	77	53		
Suisse			2487	903
Turquie	2000	509	1	6
Hongrie			61	368
Maroc	1081	414	310	283
Tunisie			238	787
Egypte			302	1631
Côte d'Ivoire			5	5
Vénézuéla			67	259
TOTAL	15690	6806	74390	32613
dont CEE	11442	5278	70915	28360

Tabl. 4 - Importations - exportations de feldspath en France en 1993.
Quantités en tonnes - Valeurs en milliers de francs français.

En 1993, les principaux pays fournisseurs de la France étaient l'Allemagne avec 9 200 t, la Turquie (2 000 t) et la Norvège (1 100 t), représentant, à eux trois, 78 % de nos importations. Les principaux clients de la France étaient l'Espagne avec 47 300 t, l'Allemagne (11 800 t) et le Benelux (10 100 t), qui représentaient, à eux trois, 93 % des exportations françaises de feldspaths.

Dans le secteur des feldspaths, la CEE est la zone d'échanges privilégiés de la France, avec 78 % des importations et 95 % des exportations françaises.

En France, les importations sont cinq fois plus faibles, en tonnage et en valeur, que les exportations de feldspaths.

1.3. LE MARCHÉ MONDIAL DE LA SYENITE NEPHELINIQUE

	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
URSS	2 500 000*	"	"	"	"	"	"	"	2 500 000*	"
Canada	523 249	520 640	467 186	467 491	506 000	540 000	555 700	536 000		
Norvège	219 565	225 731	227 465	218 421	240 000*	262 000	262 000	250 000	300 000	350 000

* Estimation

Tabl. 5 - Evolution de la production de syénite néphélinique dans le monde entre 1983 et 1992.
(en tonnes - Sources : British Geological Survey et US Mineral Year Book).

• Principaux producteurs mondiaux

→ Jusqu'en 1990, la situation mondiale de la production de syénite néphélinique était simple.

L'URSS est de loin le plus gros producteur avec environ 2,5 Mt/an mais utilise la quasi-totalité de sa production pour ses propres besoins, et n'intervient pas sur le marché ouvert mondial.

Au Canada, *Indusmin Division of Falconbridge Limited*, de Toronto, est le premier producteur mondial de syénite néphélinique du monde occidental et possède 2 carrières à Blue Mountain et à Nephton, dans l'Ontario. La capacité totale estimée est de 800 000 t/an de produits finis. Les livraisons ont atteint 556 000 t en 1989. Sa filiale américaine, *Indusmin Inc.* a une unité de production à Spruce Pine, en Caroline du Nord.

Falconbridge appartient à *Noranda Inc.* du Canada et à *Trelleborg AB* de Suède.

En Norvège, *Elkem Nefelin A/S* est le troisième producteur mondial de syénite néphélinique, avec une capacité annuelle (1990) de 270 000 t, soit la moitié de celle du Canada et le dixième de celle de l'ex-URSS. Extraite d'une carrière souterraine située dans l'île arctique de Stjernøy, la production se répartit généralement de la façon suivante : 220 000 t pour la verrerie et 30 000 t pour la céramique. Le principal client est l'Allemagne (25 % des exportations), suivie par le Royaume-Uni, la France, le Benelux...

→ En 1990, une société américaine *Unimin Corp.*, leader dans le domaine des sables siliceux et associée au Groupe belge *SCR-Sibelco NV*, a négocié le rachat avec *Falconbridge Limited* (Toronto) de sa filiale *Indusmin*, le premier producteur mondial de syénite néphélinique.

En 1992, *Unimin Corp* a demandé l'accord du gouvernement norvégien pour le rachat de *Elkem Nefelin*, le deuxième producteur occidental (hors ex-URSS) de syénite néphélinique. La prise de contrôle de ces deux sociétés devrait lui donner un quasi-monopole dans ce secteur (plus de 95 %), à la fois dans la production et dans la distribution.

En Turquie, la production de syénite néphélinique a débuté en 1988, atteignant 15 000 t en 1990. L'exploitation est située à l'ouest du pays, dans le massif de Uludag, dans la région de Bursa Orhaneli. Une usine d'une capacité de 200 000 t/an est en projet.

1.4. LE MARCHÉ DE LA SYENITE NEPHELINIQUE EN FRANCE ET DANS LA CEE

Dans le tableau 7 sont détaillées les origines et les destinations des flux commerciaux concernant le marché français de la syénite néphélinique en 1993 (source : Statistiques Eurostat, issues des données douanières de la CEE).

		IMPORT CUMULE		EXPORT CUMULE	
		Quantité	Valeur	Quantité	Valeur
002	U.E.B.			360	186
003	Pays-Bas	228	143		
004	Allemagne			55	36
011	Espagne			154	63
028	Norvège	25227	14166		
038	Autriche	40	55		
404	Canada	8958	7873		
412	Mexique	317	212		
	TOTAL	34770	22449	569	285
	Dont CEE	228	143	569	285

Tabl. 6 - Importations/exportations de leucite et syénite en France en 1993.
Quantités en tonnes - Valeurs en milliers de francs français.

En 1993, la France a importé environ 35 000 t, comprenant principalement de la syénite et, en de plus faibles proportions, de la leucite. Environ 25 000 t provenaient de Norvège (71 % des importations), et environ 9 000 t du Canada (25 % des importations), soit pour ces deux pays, 96 % des importations françaises.

Les exportations sont très faibles, voisines de 570 t.

Le tableau 7 regroupe les origines et les destinations des flux commerciaux concernant la leucite et la syénite néphélinique dans la CEE en 1993, ainsi que la situation de la France par rapport aux autres pays européens (source : Statistiques Eurostat, statistiques douanières de la CEE).

	Eur.12	Benelux	Danemark	Allemagne	Grèce	Espagne	France	Irlande	Italie	Pays-Bas	Portugal
France	613	227							384		2
Belgique Luxbourg.	36			36							
Pays-Bas	28 870	4 668	2	14 213			3 232		6 753		2
Allemagne	1 022	479	100			361	3		79		
Italie	475						429				46
Royaume- Uni	270							243		22	5
Espagne	150			25					8		117
Norvège	197 604	26 999	897	85 054	1 699	11 324	24 255	3 200	25 643	15 833	2 700
Russie	2 560	2 560									
Algérie	49									49	
USA	28						28				
Canada	84 628	108		229		5 593	6 941		22 880	48 751	126
TOTAL Monde	316 305	35 041	999	99 557	1 699	17 278	34 888	3 443	55 747	64 655	2 998
Intra-CEE	31 436	5 374	102	14 274		361	3 664	243	7 224	22	172
Extra-CEE	284 869	29 667	897	85 283	1 699	16 917	31 224	3 200	48 523	64 633	2 826
Classe 1	282 263	27 107	897	85 283	1 699	16 917	31 225	3 200	48 523	64 586	2 826
EFTA pays	197 606	26 999	897	85 054	1 699	11 324	24 255	3 200	25 643	15 835	2 700
USA+Canada	84 656	108		229		5 593	6 969		22 880	48 751	126
Maghreb	49									49	
MFA pays	282 263	27 107	897	85 283	1 699	16 917	31 225	3 200	48 523	64 586	2 826
Classe 4	2 560	2 560									

Tabl. 7 - Importations de leucite, néphéline et syénite néphélinique en Europe en 1992 (quantité en tonnes).

Négoce de la syénite néphélinique

Les principaux distributeurs de syénite néphélinique en France, producteurs ou pas, sont regroupés dans le tableau 8.

Nom de la société	Adresse	Téléphone
CMMP	45, rue de Saint-Pétersbourg, 75008 - Paris	(1) 43 87 45 75
Lambert Rivière	Rue Louison Bobet-94132 Fontenay-sous-Bois Cedex	(1) 49 74 80 80
North Cape Nefelin.	BP 43 52 - Torshov-0402 Oslo	22 45 02 50

Tabl. 8 - Principaux négociants de syénite néphélinique en France.

1.5. LE BILAN ECONOMIQUE FRANÇAIS

Pour les années 1990 à 1993, le tableau 9 dresse un bilan économique global du marché français.

	1990	1991	1992	1993
Production française feldspaths (t)	467 633	484 042	385 710	369 295
Importations feldspaths (t)	*78 100	*85 400	*81 500	15 690
Exportations feldspaths (t)	*122 700	*110 000	*91 900	74 390
Importations syénite (t)	34 594	33 983	34 888	34 770
Consommation apparente (t)	*457 600	*493 400	*410 200	345 365
Valeur totale importations (kF)	34 013	37 326	35 464	29 296
Valeur totale exportations (kF)	53 383	48 082	39 991	32 898
Balance commerciale (kF)	+ 19 370	+ 10 756	+ 4 527	+ 3 602

* Estimations

Tabl. 9 - Bilan économique du marché français des feldspaths et de la syénite néphélinique, (sources : Eurostat, Syndicat National Producteurs de Kaolins et Feldspaths Français).

De ce bilan couvrant quatre années, il est possible de constater :

- une décroissance du marché de feldspaths au sens strict, avec une nette diminution de la production (21 %), des importations (- 80 %) et des exportations (- 39 %) ;
- une stabilité remarquable des importations de syénite néphélinique à 34 000 t car ce produit feldspathique de haut de gamme a probablement une clientèle fidélisée ;
- une nette diminution de la consommation apparente sur quatre années (- 24 %), en relation directe avec la décroissance générale du marché des feldspaths s.s ;
- une stabilité de la valeur annuelle des importations pendant 3 ans à 35 000 t/an, puis une légère diminution en 1993 (- 13 %). Les exportations ont été en décroissance constante, totalisant moins de 38 % sur 4 années ;
- une balance commerciale toujours positive, mais en décroissance constante : - 44 %, - 57 % et - 20 % ;
- un ratio export/import nettement en diminution, en relation avec la diminution des exportations, de 1,56 en 1990 à 1,12 en 1993.

D'après une estimation des statistiques douanières, et sans précision sur la qualité des produits, le prix moyen des feldspaths était en 1993 de 435 F/t à l'importation, et de 438 F/t à l'exportation.

Une estimation du prix à la production réalisée par le Syndicat national des producteurs de kaolin et de feldspaths français montre une relative stabilité. Avec les effets de l'inflation, cela signifie que le prix des feldspaths en franc constant a donc constamment baissé.

Année	Chiffre d'affaire	Tonnage	Prix moyen estimé (F/t)
1993	74 814	369 295	202,59
1992	77 262	385 710	200,31
1991	105 166	484 042	217,26
1990	103 223	467 633	220,74
1989	92 689	416 935	222,31
1988	73 089	322 214	226,83
1987	60 598	274 025	221,14
1986	53 691	215 586	249,05
1985	50 213	214 579	234,01
1984	38 828	198 910	195,20

Tabl. 11 - Estimation des prix à la production de 1984 à 1993 (d'après le Syndicat national des producteurs de kaolin et de feldspaths français).

2.2. LE PRIX DE LA SYENITE NEPHELINIQUE

• Sur le marché international

Les prix de vente pratiqués sur le marché international peuvent varier très largement en fonction du type, de l'origine, la qualité, les quantités achetées et l'utilisation. Le tableau 12 est extrait des cotations publiées dans la revue mensuelle "Industrial Minerals".

L'unité de poids est la tonne métrique, et les prix mentionnés s'entendent généralement CIF-principaux ports européens.

Type de produit	Prix moyen relevé	Prix en FF/t
Canada, par lots sur camion, short ton :		
Qualité verrerie, 30 mesh, en vrac, faible teneur en fer	C\$ 30	135
Qualité verrerie, 30 mesh, en vrac, haute teneur en fer	C\$ 27-28	121-126
Qualité céramique, 200 mesh, ensaché, lot de 1 tonne	C\$ 85	382
Charge/ adjuvant, en sacs	C\$ 98-195	441-877
Norvège, CIF ports anglais :		
Qualité verrerie, 0,5 mm, en vrac	£ 87	783
Qualité verrerie, 45 µ , en vrac	£ 105	945
Qualité verrerie, 45 µ , en sacs	£ 135	1245

Tabl. 12 - Prix indicatifs des syénites néphéliniques sur le marché international (décembre 1994).

• Sur le marché français

Le prix de la syénite néphélinique est estimé, en 1993, à 645 F/t à l'importation, et à 500 F/t à l'exportation.

3. STRUCTURE DE LA PROFESSION FRANÇAISE

3.1. LES EXPLOITANTS

Le tableau 13 rassemble les 7 producteurs français de feldspaths, encore en activité en 1994.

Société (Groupe)	Département	Commune de la carrière	Production annuel (t)
Feldspaths du Midi (Harwanne)	Pyrénées-Orientales	Fenouillet Mosset Tarerach Argelès-sur-Mer	20 000 (92)
	Aude	Salvezines	147 000
Garrot-Chaillac	Aude	Treilles	15 000
Ets Baux	Pyrénées-Orientales	Saint-Arnac Lansac	125 000
Société Durruty	Pyrénées-Atlantiques	Saint-Esteben	300
Kaolins de Beauvoir	Allier	Echassières	25 000
SAMIN	Haute-Loire	Roche-en Régnier	55 000
Feldspaths du Morvan (Harwanne)	Creuse	Soumans	98 000
	Saône-et-Loire	Etang/Arroux	70 000
		TOTAL	555 208 *

* Cités par les producteurs, ces chiffres incluent le feldspath traité, mais aussi parfois le minéral feldspathique avant traitement.

Tabl. 13 - Producteurs français de feldspaths en 1991.

La figure 1 localise les départements français producteurs de feldspaths.

En terme de production, les statistiques "Producteurs" de 1991 montrent qu'avec 335 000 t soit 60 % de la production française, la Continentale d'Entreprises est la première société productrice de feldspaths en France. Filiale du groupe suisse Harwanne, elle regroupe les sociétés "Feldspaths du Midi" et "Feldspaths du Morvan".

Les Etablissements Baux ont une production importante (125 000 t), dont 20 % sont exportés. Fournissant des feldspaths sodiques et sodi-potassiques, cette société fournit 50 000 t pour la céramique, et 50 000 t pour la verrerie.

La SAMIN, filiale du groupe Saint-Gobain, exploite une carrière de phonolite en Haute-Loire pour ses besoins en verrerie (55 000 t/1991) et en isolation.

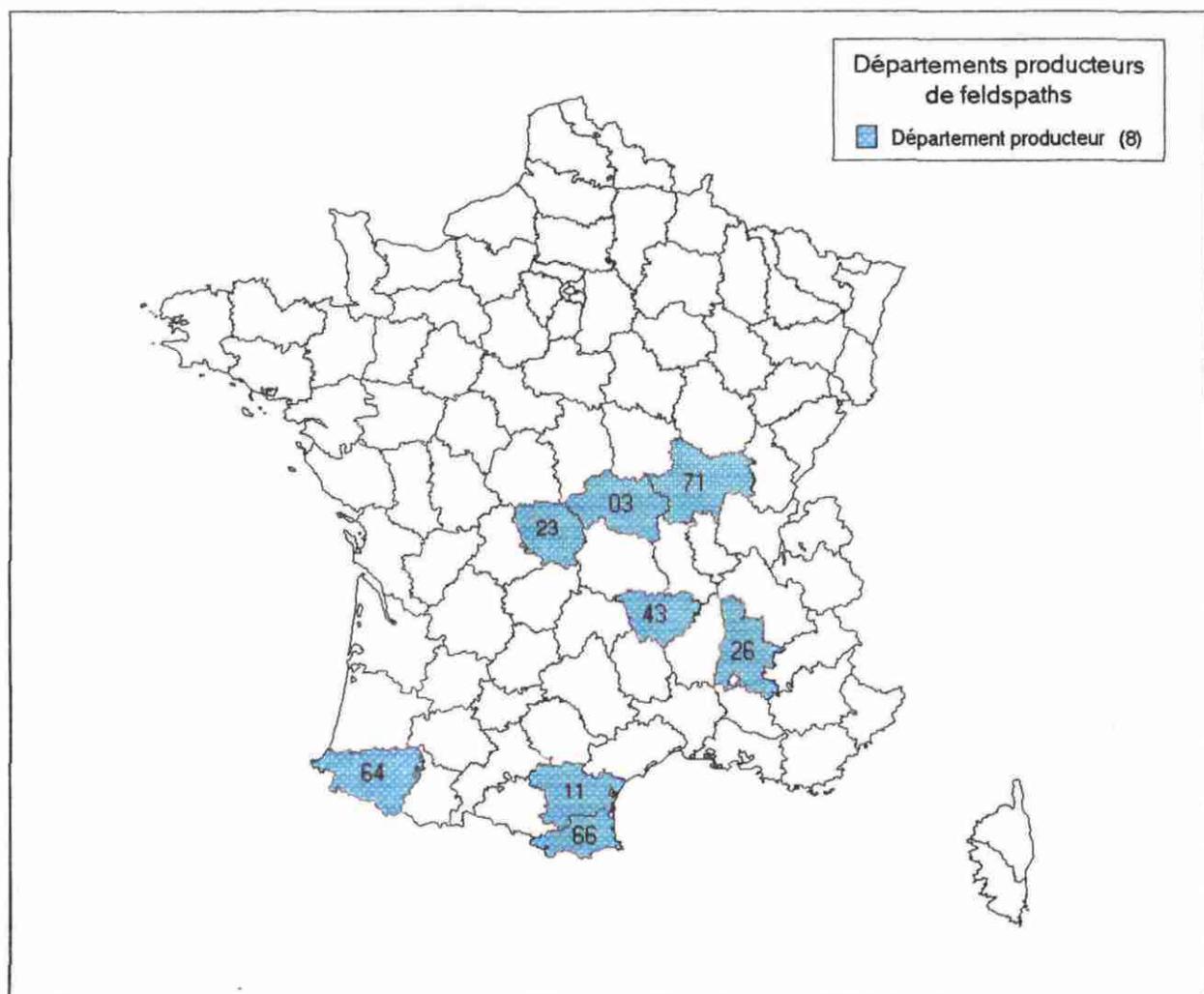


Fig. 1 - Départements français producteurs de feldspaths en 1994.

Le tableau 14 regroupe les coordonnées des principaux exploitants français de feldspaths.

Sociétés	Adresses	Téléphone
Ets Baux	66220 - Saint Paul de Fenouillet	68.59.03.79
Continentrale d'Entreprises - Société des feldspaths du Midi - Société des feldspaths du Morvan	Groupe Minéral Harwanne, 4, Avenue Velasquez - 75008 Paris Usine de Salvezines - 11140 Salvezines. BP 12 - 71190 Etang-sur-Aroux.	(1) 42.25.80.50 68.20.51.62 85.82.31.26
Entreprise Noël DURRUTY	CD 254 64200 Bassussarry (près de Cambo-les-Bains)	59.42.33.96
Ets Jacques Fayol	Terres Blanches Larnage 26600 Tain L'Hermitage	75.08.10.22
Garrot-Chaillac	Siège : 17, Bd Sarraill - 34027 Montpellier. Carrière : Linas-le-Village - 11510 Treilles	67.60.64.85 68.45.61.51
Kaolins de Beauvoir	SKB-Echassières - 03330 Bellenaves	70 90 42 20
SAMIN	9, square Watteau - BP 4 92403 - Courbevoie Cedex	(1) 46 91 98 46

Tabl. 14 - Coordonnées des principaux exploitants français de feldspaths.

3.2. LES CARRIERES

Si le fichier national des carrières recensait 22 carrières de feldspath et de phonolite en 1984, ayant une production significative (> 300 t), il n'en reste plus que 13 en 1994 (voir tabl. 13).

Une part importante de la production française de feldspath, soit plus de 50 %, provient de la région Languedoc - Roussillon, en particulier dans les départements des Pyrénées Orientales et l'Aude (voir fig. 1).

3.3. LE NEGOCE DES PRODUITS FELDSPATHIQUES

Le tableau 15 regroupe les principaux négociants français en produits feldspathiques. Ceux-ci se chargent de la fourniture de produits répondant aux spécifications précises des industries verrières et céramiques, dans des quantités adaptées à ce secteur.

Mémento roches et minéraux industriels : feldspaths et feldspathoïdes

Nom de la société	Adresse	Téléphone
Angelle Minéraux	11, rue Edouard Colonne - 92000 Nanterre	(1) 47 69 92 28
Baux	66220 - Saint-Paul -de-Fenouillet	68 59 03 79
Beauvoir (Kaolins de)	SKB-Echassières - 03330 Bellenaves	70 90 42 20
Blin (Ets A.)	25, rue Pradat, BP 323, 18 103 Vierzon Cedex	48 75 08 39
Ceramed	24, rue du Limas - 84000 - Avignon.	90 27 92 30
Ceratera	2 av. Pierre de Coubertin	54 08 55 00
CMMP	45, rue de Saint-Pétersbourg, 75008 - Paris	(1) 43 87 45 75
DAMREC	Tour Montparnasse, 33 av. du Maine-75755 Paris	(1) 45 38 28 92
Deltamat Paquet	5, Rue du Drapeau -B 1070 Bruxelles	02/521 00 70
Esan Eczacibas AS	Rahmanlar Kartal, TR-81410 - Istanbul.	90-1/353 83 35.
Huppert (Saarfeldspath)	51, Kotenhuttenweg-D-66123 Saarbrucken BRD	681 62293
Jan de Poorter	POB 15, NL-4930 AA Geertruidenberg	1621-86400
Lambert Rivière	Rue Louison Bobet-94132 Fontenay-sous-Bois Cedex	(1) 49 74 80 80
Midi (Feldspaths du)	Gr.Harwanne,4,Avenue Velasquez-75008 Paris	(1) 42 25 80 50
Reno SA	251 Bd Péreire. 75852 Paris Cedex 17	(1) 45 74 98 49
Richoux	Rue des Carrières, 94310 Orly.	(1) 45 60 52 00
Rominco France	6, Grande Rue. 57570 Berg-sur-Moselle	82 83 84 52
Samin	9, square Watteau - 92400 Courbevoie	(1) 46 91 98 46
SCR Sibelco	Quellinstraat 49, B-2018 Anvers.	03/2236611
Solargil	La Batisse-89520 Moutiers-en-Puisaye	86 45 50 00
Stephan Schmidt	Bahnhoftst.92. D-65599 Dornburg 2	06436/609 0
UD Ceram	17, rue de la Fonderie-87000 Limoges	55 79 01 80
Watts Blake Beame	Park House-GB-TQ12 4 PS.Newton Abbot (Devon)	0626 332345

Tabl. 15 - Fournisseurs de feldspaths pour les industries céramiques et verrières (d'après l'Industrie céramique et verrière, n° 895, 7-8/94).

4. GEOLOGIE

4.1. MINERALOGIE DES FELDSPATHS

Les feldspaths forment un ensemble de minéraux majeurs qui entrent dans la composition de la plupart des roches magmatiques et de certaines roches métamorphiques.

Ils se présentent en plaquettes ou en cristaux prismatiques de couleur très variable : transparent ou blanchâtre (porcelané, vitreux, laiteux) souvent grisâtre, parfois coloré en rose ou en vert (présence d'inclusions, défaut du réseau cristallin...) ou en noir. Ils montrent deux clivages et fréquemment des mâcles simples ou multiples. Dans de nombreux cas, une zonation apparaît. Leur classification et leur nomenclature sont liées aux compositions chimiques et aux arrangements des réseaux cristallins.

Les feldspaths sont des minéraux, formés de silice et d'alumine combinées en proportion variable avec du potassium, du sodium et du calcium.

Les feldspaths comportent trois pôles, potassique, sodique et calcique, correspondant à des espèces minérales bien définies entre lesquelles existent des séries continues ou discontinues de minéraux. Dans la nature, on rencontre assez rarement les espèces minérales correspondant aux pôles de ces séries mais plutôt des minéraux de composition chimique intermédiaire.

Les principales espèces minérales sont :

- les feldspaths potassiques : orthose et microcline (KAlSi_3O_8) ;
- les feldspaths sodi-potassiques : anorthose (KAlSi_3O_8 - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) ;
- les feldspaths sodi-calciques ou plagioclases.

L'orthose est le minéral le plus répandu dans la nature après le quartz.

Les plagioclases constituent une série de minéraux continus entre le pôle sodique de l'albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) et le pôle calcique de l'anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) ; entre ces deux pôles existe une série de minéraux dont la détermination repose sur la teneur en Na, et fixée par commodité par une grille de valeurs décimales (tabl. 16).

Famille	Formule	Minéral	Observations
Feldspaths potassiques	$K [Si_3AlO_8]$ (parfois très faible teneur en Na)	Microcline Orthose Sanidine	Se trouve dans de nombreuses roches magmatiques grenues (granites, pegmatite) ou métamorphiques (gneiss) Minéral très commun dans les granites, granitoïdes, pegmatites Se trouve dans les roches magmatiques effusives et acides de haute température
Feldspaths sodi-potassiques	$(K,Na) [Si_3AlO_8]$	Anorthose	Fréquemment associée à la sanidine
Feldspaths sodi-calciques ou plagioclases	$Na [Si_3AlO_8]$ $Ca [Si_2Al_2O_8]$	0-10 % An Albite 10-30 % An Oligoclase 30-50 % An Andésine 50-70 % An Labrador 70-90 % An Bytownite 90-100%An Anortithe	← Plagioclases acides Minéraux essentiels de nombreuses roches magmatiques, des laves et les roches métamorphiques. ← Plagioclases basiques
Feldspaths lourds	$Ba [Si_2Al_2O_8]$ $Ba [Si_2Al_2O_8]^+$ $K [Si_3AlO_8]$ (10 à 40 % + 60 à 70 %)	Celsiane Hyalophanes	Minéraux rares du métamorphisme de contact des calcaires et des dolomies

Tabl. 16 - Famille minéralogique des feldspaths.

4.2. MINERALOGIE DES FELDSPATHOÏDES

Les feldspathoïdes sont des minéraux des roches éruptives sous-saturées en silice ($SiO_2 < 51 \%$) mais très riches en soude et en potasse (tabl. 17). Lors de la cristallisation des roches, les feldspathoïdes réagissent avec le quartz pour donner des feldspaths et ces deux minéraux ne peuvent donc coexister dans la même roche.

Les différents feldspathoïdes sont souvent difficiles à distinguer. Les plus fréquents sont :

- la néphéline, minéral des roches sodiques, $Na_3K (SiAlO_4)$, qui se trouve principalement dans les roches magmatiques grenues de type syénite (syénite néphélinique) ou les roches volcaniques de type phonolite ;
- la leucite $K (Si_2AlO_6)$ présente seulement dans les laves riches en potassium (phonolite, téphrite).

Composition chimique	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO
Feldspaths					
Orthose-microcline	64,7	18,4	-	19,9	-
Albite	66,1 à 68,7	19,5 à 21,3	10,6 à 11,8	-	0 à 2,0
Oligoclase	61,0 à 66,0	21,3 à 24,7	8,3 à 10,6	-	2,0 à 6,0
Andésine	56,1 à 61,0	24,7 à 28,0	5,9 à 8,3	-	6,0 à 10,0
Labrador	50,9 à 56,1	28,0 à 31,5	3,5 à 5,9	-	10,0 à 14,1
Bytownite	45,8 à 50,9	31,5 à 34,9	1,2 à 3,5	-	14,1 à 18,1
Anorthite	43,2 à 45,8	34,9 à 36,7	0 à 1,2	-	18,1 à 20,1
Feldspathoïdes					
Leucite	55,0	23,5	-	21,5	-
Néphéline	46,2	39,3	9,2	5,3	-

Tabl. 17 - Composition chimique théorique des feldspaths et des feldspathoïdes (%).

4.3. GITOLOGIE

Les feldspaths sont très largement répandus dans l'écorce terrestre, mais d'un point de vue économique, seuls les feldspaths alcalins (potassique avec $K_2O > 10\%$ et sodique avec $Na_2O > 7\%$) sont recherchés dans le secteur industriel.

Dans la plupart des roches, la finesse des grains de feldspath ne permet pas une séparation aisée des autres constituants minéralogiques et celles-ci ne peuvent convenir comme source de feldspath.

Seules les roches dans lesquelles les feldspaths se présentent sous la forme de très gros cristaux ou celles contenant très peu d'impuretés nocives (notamment les minéraux ferrifères-biotite) sont utilisables.

Les roches éruptives susceptibles de constituer une source de feldspath pour l'industrie sont les suivantes :

- roches leucocrates de la famille des granites : leucogranite alcalin (appelé alaskite en Amérique), pegmatite, aplite (leucogranite à grain très fin), rhyolite...;
- roches sous-saturées en silice riches en alcalin : syénite néphélinique, phonolite ;
- roches issues de transformations deutériques ou hydrothermales, roches "feldspathisées" telles que albitite, épisyénite.

Les roches granitiques leucocrates (c'est-à-dire dépourvues de minéraux sombres ferromagnésiens) constituent deux types de gisements distincts :

- soit des massifs de granite à muscovite, le plus souvent associés aux grands massifs granitiques communs à biotite ;
- soit des lentilles ou des filons de pegmatite ou d'aplite.

Ces roches sont constituées par un assemblage de quartz et de feldspaths alcalins (albite, microcline, orthose) fréquemment accompagnés par des micas alumineux (muscovite, lépidolite...). La teneur en fer de ces minéraux est généralement faible, celui-ci étant contenu dans divers minéraux accessoires : tourmaline, grenat, biotite...

Les pegmatites peuvent constituer des amas atteignant plusieurs kilomètres de long, sur plusieurs centaines de mètres de large, souvent associés à la mise en place de granitoïdes ou de migmatite. Elles sont zonées avec une différenciation dans la texture et la composition minéralogique du cœur vers la périphérie.

L'aplite présente les mêmes modes de gisement que les pegmatites, formant souvent des filons recoupant les autres formations.

Bien que moins répandues que les roches granitiques, les roches alcalines leucocrates sous-saturées en silice, constituent cependant une source de matériaux feldspathiques particulièrement intéressante (absence de quartz, forte teneur en alumine et en alcalins) ; les syénites, et plus spécialement les syénites néphéliniques, font partie de ce groupe.

Les syénites néphéliniques forment des stocks ou de petits massifs intrusifs associés à des complexes intrusifs alcalins comportant une grande variété de roches sous-saturées et passant les uns aux autres de façon progressive ou brusque. Ce sont des roches grenues composées presque totalement de feldspaths potassiques et sodiques, de néphéline, et accompagnés de quelques minéraux ferromagnésiens : biotites, pyroxènes et amphiboles sodiques.

Les gisements de syénite peuvent être classés en plusieurs groupes selon leur origine :

- roches à feldspathoïdes associées aux roches volcaniques sous-saturées ;
- complexes circulaires différenciés souvent associés à des carbonatites, avec métasomatose de bordure ;
- sills intrusifs, en relation possible avec des complexes circulaires ;
- massifs de bordures ou satellites associés à des syénites ou des granites ;
- gneiss néphélinisés, liés habituellement à des pegmatites néphéliniques.

Les gisements sont, en général, de petites dimensions, habituellement quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres carrés. Pour présenter un intérêt économique, la syénite néphélinique doit renfermer une proportion de néphéline au minimum de l'ordre de 20 % avec une faible proportion de ferromagnésiens faciles à éliminer.

Ces complexes se sont mis en place à des époques les plus diverses dans les zones en extension des bordures de continent ceinturant les océans en cours de formation. De nombreux gisements ont été répertoriés dans le monde entier, sur le pourtour de l'Atlantique où l'on rencontre des syénites d'âge triasique à crétacé, en Ecosse, au Portugal, aux îles de Los, en Angola, dans le Sud-Ouest africain, au Brésil, au Canada. Les réserves les plus importantes ont été trouvées en URSS (Péninsule de Kola, Goryachegorsk...), (cf. fig. 3).

Bien qu'assez largement répandues, les syénites néphéliniques ne sont exploitées que dans quelques pays (Canada, Norvège, URSS, USA). Le tableau 18 en donne la composition chimique moyenne.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Canada								
Methuen Township	58,8	23,0	0,8	1,4	0,82	0,04	9,4	5,2
Norvège								
St Jernoy	52,37	23,22	1,1	1,14	3,11	0,25	6,87	8,30
URSS								
Khibiny	54,01	21,50	2,60	1,80	1,80	0,77	9,50	5,30
Congo								
Kirumba	55,44	23,59	0,44	1,42	1,56	0,14	10,20	6,26

Tabl. 18 - Composition chimique moyenne de quelques syénites néphéliniques brutes.

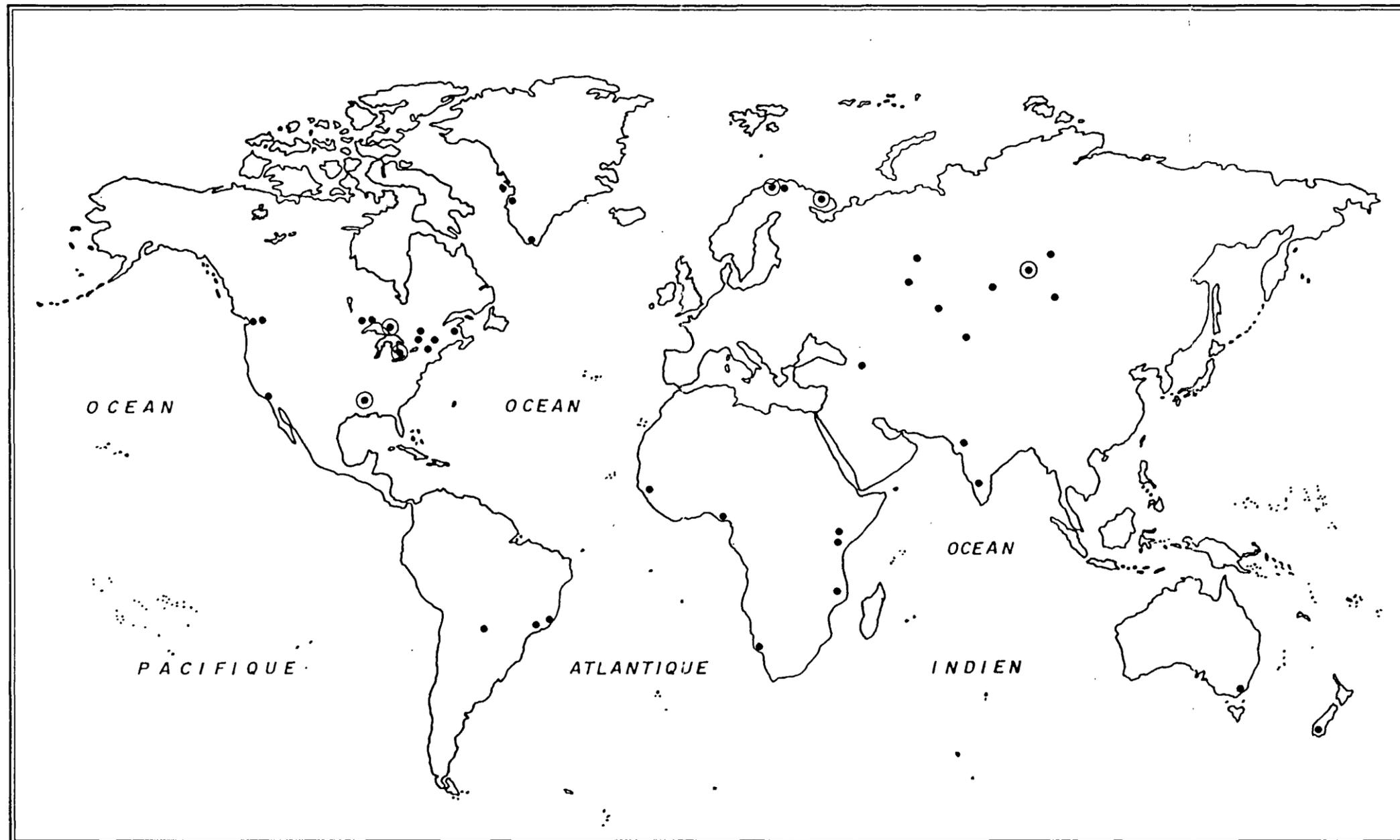


Fig. 3 - Localisation des principaux gisements de syénite néphélinique dans le monde (d'après Industrial Minerals and Rocks).

Les roches feldspathiques issues de transformation métasomatiques se forment aux dépens des roches magmatiques ou métamorphiques existantes. Elles sont liées à des circulations de fluides associés à la mise en place des roches magmatiques. Cette transformation pneumatolitique ou deutérique post-magmatique peut aboutir, dans certains cas, à une métasomatose alcaline (le plus souvent sodique, mais parfois potassique) très poussée de la roche-mère, donnant des matériaux presque exclusivement formés de feldspaths : épisyénite, albitite. Ces métasomatoses peuvent s'effectuer sur des roches d'origine et de nature très diverses (roche magmatique : granite, pegmatite, roche métamorphique : gneiss, micaschiste), mais ce sont dans les roches quartzo-feldspathiques leucocrates qu'elles montrent les plus grands développements ; elles se propagent, généralement, à la faveur d'accidents structuraux qui favorisent la circulation des fluides, et respectent le plus souvent la texture et la structure de la roche-mère. Cette transformation, qui s'accompagne d'un lessivage intense de la silice et des ferromagnésiens, donne naissance à des roches particulières comme les épisyénites issues des granites dont le quartz et les ferromagnésiens ont été éliminés et comme les albitites où l'ensemble des minéraux de la roche-mère sont épigénisés par de l'albite.

Les roches effusives microlitiques leucocrates, équivalent volcanique des roches feldspathiques grenues telles les rhyolites (équivalent des granites) et les phonolites (équivalent des syénites néphéliniques), peuvent, lorsqu'elles sont riches en alcalins et en alumine et qu'elles contiennent peu de fer, fournir des matériaux feldspathiques utilisables par l'industrie (rhyolites de la Sarre, phonolites de Haute-Loire, Eifel : carrière de Brenk).

Enfin, les formations dérivant de l'altération des roches feldspathiques d'origine magmatique ou métamorphique, qu'elles aient subi (roches sédimentaires) ou non (altérites) un transport, contiennent parfois une forte proportion de feldspaths qui peut justifier leur exploitation (sables de Californie).

De même, certains sables issus de l'extraction du kaolin sont parfois traités afin d'en extraire les feldspaths potassiques en sous-produits connus en Bavière (RFA) et en Cornouailles (GB). Les leucogranites à grain grossier ou porphyroïdes arénisés où les feldspaths sont situés dans une fraction granulométrique supérieure à celle des autres minéraux de la roche, peuvent, si le taux de récupération est suffisant, être exploités.

Toutefois, les principaux types de roches susceptibles de fournir du feldspath restent les pegmatites, roches magmatiques dont les cristaux sont de grande taille (un à plusieurs centimètres ou décimètres, exceptionnellement voisine du mètre).

Dans les pegmatites, l'exploitation du feldspath est souvent associée à celle d'autres minéraux particuliers : quartz, béryl, lépidolite, etc.

Cependant, l'épuisement des gisements de pegmatites exploitables conduit les industriels à s'intéresser de plus en plus aux autres roches riches en feldspaths (ou feldspathoïdes).

5. UTILISATIONS

L'anorthite et les plagioclases très calciques sont d'importance commerciale limitée. Autrefois, seuls les feldspaths à haute teneur en potassium étaient considérés comme intéressants pour la plupart des usages industriels. Actuellement, les feldspaths alcalins, potassiques et sodiques ou plus rarement le mélange des deux, sont en général utilisés par l'industrie selon des préférences reposant principalement sur des critères économiques.

Les feldspaths alcalins et la syénite néphélinique sont utilisés principalement et concurremment dans les industries du verre et de la céramique. Ces deux domaines se partagent plus de 95 % de l'utilisation des feldspaths.

Le tableau 19 regroupe les principales utilisations.

Feldspath	Chimisme (%)	Utilisations
Feldspath sodique	Na ₂ O (8-10)	Fondant en verrerie (influence de Fe ₂ O ₃ sur la coloration) et en céramique
Feldspath potassique	K ₂ O (8-9)	Emaillerie, électro-porcelainerie (isolateurs électriques ordinaires)
	Na ₂ O (2-3)	
	K ₂ O (10-12)	Porcelainerie, céramique ; isolateurs électriques spéciaux
	Na ₂ O (< 2)	
	K ₂ O (8-9)	
Feldspath sodi-potassique	Na ₂ O (2-3)	
	K ₂ O (4-5)	Verrerie et céramique
	Na ₂ O (4-5) Al ₂ O ₃ (15-20)	

Tabl. 19 - Nature feldspathique et principales utilisations.

Le coût de la matière première et de son transport peut influencer sur le choix de l'un ou l'autre des matériaux. La teneur élevée en oxydes ferriques constitue l'obstacle majeur à l'utilisation industrielle de certaines syénites néphéliniques et de certains feldspaths.

5.1. L'INDUSTRIE DU VERRE

Les industries de la verrerie utilisent plus de la moitié de la production de feldspath, et environ les 3/4 de la production de syénite néphélinique.

Dans la fabrication du verre, les feldspaths et la syénite néphélinique peuvent se substituer en fonction de la considération du coût.

En verrerie, le feldspath apporte de l'alumine dans les charges des fours, en même temps que de la silice et de la soude qui confère de la fusibilité (le degré de fusion de l'albite est inférieur à 1200 °C, alors que celui de l'anorthosite atteint 1500 °C).

A masse de matériau égale, c'est la syénite qui apporte la plus forte proportion d'alumine (23-24 % d'Al₂O₃), suivie par le feldspath sodique (19-20 %), puis potassique (18 %). On utilise donc de préférence pour la fabrication du verre, le feldspath sodique ou la syénite néphélinique qui sont aussi les plus fusibles.

En 1989, une forte augmentation du prix du carbonate de soude (supérieur à 1 000 F/t), qui entre pour 15 à 20 % dans la fabrication du verre, a entraîné un regain d'intérêt pour le feldspath sodique et pour la syénite néphélinique.

La phonolite est employée comme fondant dans les matériaux vitreux où la teneur en fer est élevée : verre à bouteille, et surtout laine et fibre de verre, laine de roche.

Les quantités de feldspath, entrant dans la fabrication du verre, varient de 2 à 20 % (65 à 90 kg pour une tonne de verre plat).

L'alumine confère une meilleure stabilité (ralentit la dévitrification) et une meilleure ouvrabilité. Elle augmente aussi la résistance mécanique et chimique, facilitant notamment la fabrication des récipients en verre avec des machines automatiques.

	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	BaO	PbO
Verre de vitrage	71-73	-	0,5-2	0,05-0,15	13-15	0-1	0-3,5	8-14	-	-
Verre de flaconnage et gobeletterie extra-blanc	71-72	0-1	0,5-2	0,02-0,04	12-15	0-1	1-4	8-12	0-2	-
Verre de bouteillerie	68-72	-	1-4	1,05-3,50	12-15	0-1	1-4	8-12	0-2	-
Verre cristal au plomb	50-65	-	0,5-1	0,02-0,04	0-15	0-12	-	-	-	25-38
Verre neutre pour ampoules pharmaceutiques	69,5	5,5	7	0,05	11	2	-	5	-	-
Verre de laboratoire (exemple)	81	12	2,5	0,05	4	0,5	-	-	-	-
Verre de fibrage - isolation	55-65	0-5	3-6	0,5	11-14	0-1	3-4	5-9	0-2	-
Verre de fibrage - textile (exemple)	55	9	15	0,5	0,5	-	5	15	-	-
Borosilicate crown (exemple)	72	12	-	0,02	16	-	-	-	-	-
Flint dense (exemple)	41	-	0,5	0,02	0,6	0,9	-	-	-	56

Tabl. 20 - Composition chimique des principales catégories de verres.

	Verre blanc	Verre à bouteille	Verre à vitre
	(%)	(%)	(%)
Sable	54	50,4	44
Feldspath	8	3,6	1
Dolomie	4	2,9	9
Calcaire	15	8	4
Carbonate de soude	18	15,8	13

Tabl. 21 - Matériaux entrant dans la confection de différents types de verre.

5.2. L'INDUSTRIE DES CERAMIQUES

Les feldspaths ont un rôle de fondant et entrent dans les pâtes céramiques à raison de 0 à 10 % dans les faïences, 5 à 25 % dans les grès communs et sanitaires, 20 à 40 % dans les grès fins, les vitreous et les porcelaines dures.

La présence d'alcalins abaisse la zone de température de frittage et de la fusion (1 200 - 1250 °C). La chaux apporte une fusibilité plus franche tandis que la potasse étale la frange de température de la fusion pâteuse.

5.2.1. Les pâtes céramiques

La proportion de feldspaths utilisés est plus ou moins importante, selon les produits : un pourcentage de l'ordre de 5 à 25 % dans certains grès et jusqu'à 40 % dans les porcelaines dures et les vitreous. Dans les pâtes destinées aux carreaux de grès monocuisson, des matériaux feldspathiques riches en silice sont parfois très largement utilisés (jusqu'à 50 %). Ils jouent alors à la fois le rôle de fondant et de dégraissant (aplite de l'île d'Elbe en Italie, exploitée à raison de plus de 120 000 t pour cette fabrication) permettant d'obtenir un grésage rapide, avec une faible déformation des pièces, à une température de cuisson relativement basse (1 100 à 1 150 °C). Dans les mélanges céramiques, le feldspath fond à une température inférieure à celle de la plupart des autres constituants ; il agit donc comme un liant vitreux cimentant entre elles les particules plus réfractaires qui forment " le squelette " de l'objet lui permettant de garder sa configuration initiale.

5.2.2. Emaillage - engobes

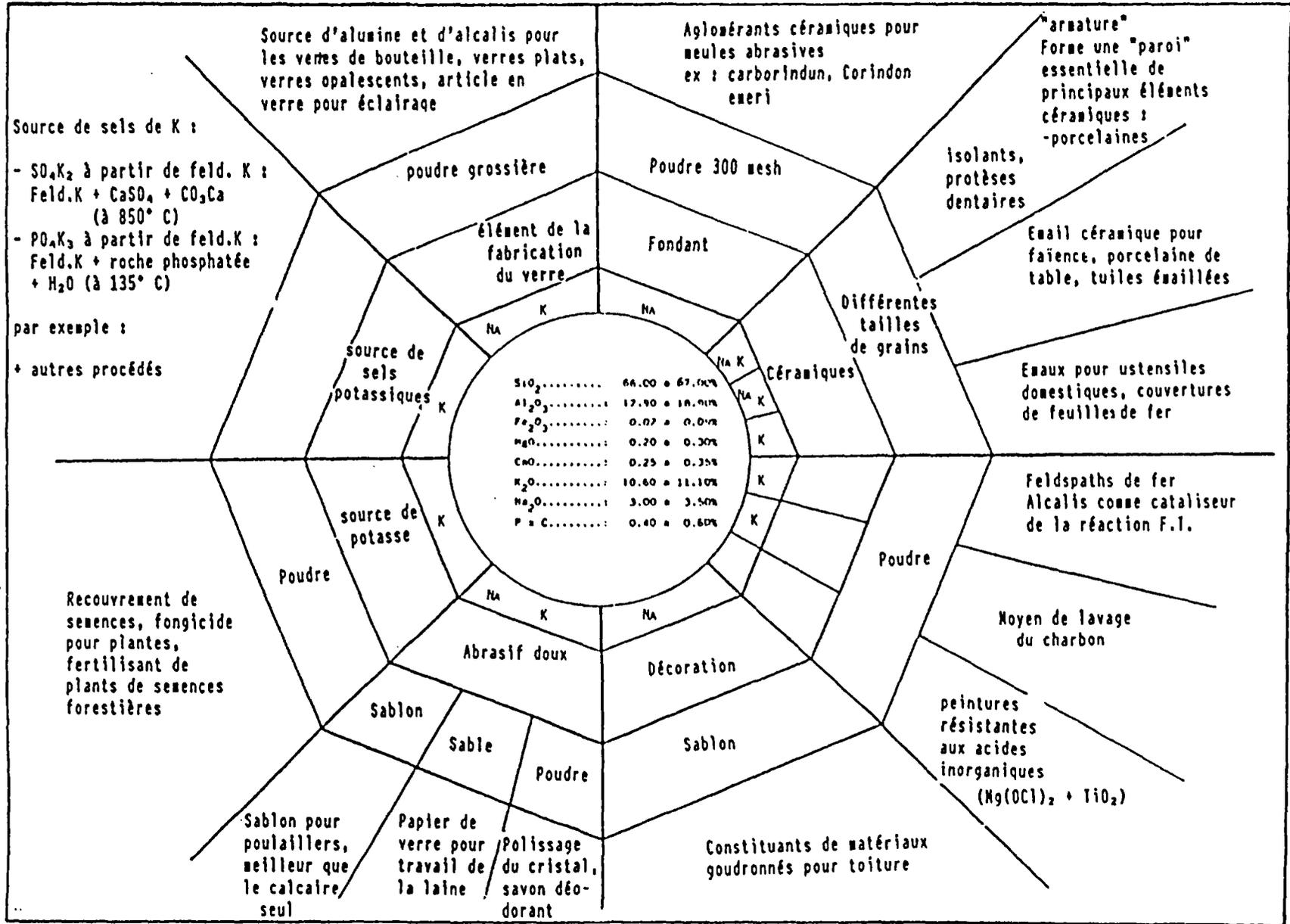
Le feldspath ou la syénite néphélinique entre également dans la composition des couches superficielles servant de couverture aux pièces céramiques ou aux métaux.

En conclusion, pour les utilisations céramiques et pour l'émaillage, les feldspaths sont souvent préférés à la syénite néphélinique. Les feldspaths potassiques sont surtout utilisés, car ils fondent moins brutalement que les feldspaths sodiques et que la syénite néphélinique, et ils gardent une viscosité élevée sur un large palier de température, ce qui permet à l'émail de ne pas couler et de s'adapter lors du refroidissement au retrait du tesson.

5.3. AUTRES USAGES

Les feldspaths sont également utilisés en petite quantité dans un grand nombre d'industries, comme :

- charge dans les caoutchoucs, les plastiques et peintures,
- abrasif doux dans certains savons et poudres à récurer,
- liant dans les réfractaires, vitrification des meules...,
- enrobage des baguettes pour soudure à l'arc,
- poudre de couverture, en sidérurgie sur les coulées continues,
- amendements siliceux, et potassiques pour les orthoclases.



Mémento roches et minéraux industriels : feldspaths et feldspathoïdes

Fig. 3 - Utilisation industrielle des feldspaths (in: Rocas y Minerales, 1987).

La syénite néphélinique trouve également des utilisations secondaires comme abrasif doux et filler colorant, en améliorant par ailleurs les propriétés mécaniques des produits auxquels elle est ajoutée.

En ex-URSS, la syénite est une source essentielle d'alumine, de soude caustique, de sulfate de calcium et, accessoirement, elle participe à la production de ciment Portland.

La figure 3 synthétise les différentes utilisations des feldspaths par nature chimique et granulométrique.

6. SPECIFICATIONS

6.1. UTILISATION EN VERRERIE

Pour cette utilisation, il est demandé aux matériaux feldspathiques d'avoir une teneur en alumine aussi élevée que possible (18 à 20 % Al_2O_3 pour les feldspaths, 20 à 25 % Al_2O_3 pour les syénites néphéliniques). La quantité de substances colorantes (fer, titane) doit être très faible.

La granularité du produit doit être inférieure à 1 mm (comprise entre 600 et 1 000 μm). Le sable est généralement dépoussiéré.

Les feldspaths sodiques sont les plus utilisés. Cependant, une teneur de quelques pour cents de CaO est acceptable, d'autant plus que les plagioclases sodiques ont une teneur en alumine supérieure à celle de l'albite (oligoclase : 21,3 à 24,7 %, et l'andésine : 24,7 à 28 % d' Al_2O_3).

En France, les teneurs maximales en Fe_2O_3 des feldspaths sont les suivantes :

- 1 % pour le verre coloré,
- 0,3 % pour le verre demi-blanc,
- 0,1 % pour le verre blanc.

Le matériau ne doit contenir ni minéraux réfractaires (sillimanite, disthène, andalousite, zircon, spinelles...), ni particules colorantes.

Pour les syénites néphéliniques, les spécifications courantes sont les suivantes :

- $\text{Al}_2\text{O}_3 > 23$ %,
- Alcalins > 14 %,
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,1$ % et quelquefois 0,08 %.

Le tableau 22 donne les compositions typiques de matériaux feldspathiques utilisés en verrerie.

Il n'existe pas de spécification standard acceptée de manière générale, mais un cahier des charges très strict qui lie le producteur de feldspaths à son client verrier.

Composition chimique (%)	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	68,91	65,03	67,90	67,70	68,70	56	55,9	60,08
Al ₂ O ₃	19,82	22,01	20,00	19,05	18,60	21,5	24,2	23,42
Fe ₂ O ₃	0,18	0,17	0,26	0,35	0,35	2,3	0,1	0,70
TiO ₂	0,06	0,31	0,21	0,20	0,08	-	-	-
CaO	1,25	2,24	1,2	1,05	0,30	-	1,3	0,4
MgO	0,04	Traces	Traces	0,15	0,21	16	Traces	0,1
Na ₂ O	7,64	8,31	9,05	9,50	8,63	-	7,9	10,3
K ₂ O	1,40	0,56	0,76	1,20	1,95	-	9,0	5,0
Perte au feu	0,66	0,79	0,62	1,20	0,97	-	1,0	0,3
% Quartz (RX)	1,0	1,5	Traces	-	-	0	0	0

- 1 - Saint-Arnac - massif de l'Agly (Pyrénées-Orientales) - Feldspaths sodiques
- 2 - Saint-Martin - massif de l'Agly (Pyrénées-Orientales) - Feldspaths sodiques
- 3 - Massif de Millas (Pyrénées-Orientales) - Episyénites sodiques
- 4 - Carrus - Salvezines (Aude) - Feldspaths sodiques
- 5 - Vareille - Saint-Chély-d'Apcher (Lozère) - Aplite sodique
- 6 - Phonolite de Roche-en-Régnier (Haute-Loire)
- 7 - Syénite néphélinique du cap Nord (Norsk Nephelin - Norvège)
- 8 - Syénite néphélinique du Canada (Indusmin).

Tabl. 22 - Exemples de matériaux feldspathiques utilisés en verrerie.

Le tableau 23 regroupe les caractéristiques des syénites après traitement pour une utilisation en verrerie.

6.2. UTILISATION EN CERAMIQUE

Les matériaux feldspathiques sont recherchés à cause de leur pouvoir fondant. Les feldspaths à tendance potassique sont préférés pour l'émaillage des céramiques et des métaux, la teneur en fer devant être basse (< 0,1 % pour les meilleurs qualités) et le matériau fondu donner un produit de couleur uniforme sans tache. La présence de titane, peu gênante en soi si la teneur en TiO₂ est inférieure à 1 %, a pour effet nuisible de renforcer considérablement la coloration liée au fer, et quelques ‰ de TiO₂ "font cuire jaune" un feldspath contenant 0,1 à 0,3 % de Fe₂O₃. Les feldspaths sodiques et sodi-potassiques entrent dans la composition de pâtes céramiques, car leur point de fusion est relativement peu élevé (1 100 à 1 200 °C).

La granularité requise est nettement plus fine que pour la verrerie, elle est habituellement inférieure à 80 µm.

En France, les feldspaths sont utilisés en céramique de préférence à la syénite néphélinique. Aux USA et dans le Royaume-Uni, la syénite néphélinique concurrence les feldspaths.

Appellation commerciale	Indusmin		IMC		Norsk Nefelin	
	330	333	Summit	Ridge	North Cape	
	%	%	%	%	%	
Analyse chimique moyenne						
Silica	59,9	60,0	60,2	60,1	55,9	
Alumina	23,5	23,4	23,5	23,4	24,2	
Ferric Oxide	0,08	0,35	0,07	0,5	0,1	
Calcia	0,6	0,7	0,3	0,3	1,3	
Magnésia	0,1	0,1	Trace	Trace	Trace	
Soda	10,2	9,9	10,6	10,5	7,9	
Potash	5,0	4,8	5,1	4,9	9,0	
BaO	-	-	-	-	0,3	
SrO	-	-	-	-	0,3	
P ₂ O ₅	-	-	-	-	0,1	
L.O.I.	0,6	0,7	0,4	0,3	1,0	
Pourcentage de refus sur tamis AFNOR (µm)	%	%	%	%	Refus sur tamis TYLER (transposé en AFNOR (µm))	
710	0,0	0,0	0,0	0,0		
600	0,1	0,1	0,2	1,3	600 µ	0
425	14,5	14,0	15,7	19,5	500 µ	0,1
300	48,0	46,0	-	-	425 µ	4,9
250	-	-	50,8	43,3	300 µ	30,0
150	86,0	84,0	20,1	13,0	212 µ	52,0
106	-	-	6,3	10,2		
75	98,0	97,2	3,9	5,4	75 µ	
Reste	2,0	3,0	2,0	7,3	Reste	11,0

Tabl. 23 - Caractéristiques des syénites néphéliniques ayant subi un traitement pour être utilisées dans l'industrie du verre (source : Industrial Minerals & Rocks - 1983).

Les matériaux feldspathiques utilisés dans les pâtes céramiques peuvent contenir une proportion importante de quartz, comme c'est le cas pour les pegmatites ou les aplites, pouvant aller jusqu'à 30 % (pegmatite des Albères). De plus, la teneur en fer et en titane a moins d'importance lorsque le tessou est coloré et qu'on l'utilise en engobe (cas des grès monocuisson fabriqués avec des argiles riches en fer).

Le tableau 24 donne les compositions de matériaux feldspathiques utilisés pour les céramiques en France.

Composition chimique	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	76,81	70,51	75,92	65,43	73,15	67,7	67,4	72	76,03	62,7
Al ₂ O ₃	15,25	18,93	15,06	20,79	16,15	15,2	17,8	15-16	14,12	23,2
Fe ₂ O ₃	0,23	0,04	0,25	0,29	0,19	0,5	0,25	0,3	0,2	1,35
TiO ₂	Traces	0,34	0,28	0,42	0,10	Traces	0,02	-	0,01	0,5
CaO	0,56	0,75	0,56	0,62	0,70	1 à 2	0,12	-	0,6	0,6
MgO	0,08	0,08	0,08	0,16	0,10	0,5 à 1	0,14	-	0,15	0,3
Na ₂ O	3,79	8,50	6,53	6,43	7,40	-	2,7	6,0	2,37	0,7
K ₂ O	3,28	0,05	0,77	5,03	1,50	10 - 12	11,04	1,5	4,25	3,5
Perte au feu	-	0,41	0,29	0,83	0,80	-	0,48	-	2,27	7
% Quartz (RX)	33	7	20	3	-	-	Traces	-	-	-

- 1 - Argelès-sur-Mer - massif des Albères (Pyrénées-Orientales) - Pegmatites sodi-potassiques
- 2 - Saint-Arnac - massif de l'Agly (Pyrénées-Orientales) - Albite (émaillage, porcelaine)
- 3 - Lansac - massif de l'Agly (Pyrénées-Orientales) - Albitite (émaillage, céramique)
- 4 - Le Castillet - massif de l'Agly (Pyrénées-Orientales) - Albite semi-potassique
- 5 - Salvezines (Aude) - Albitite
- 6 - Les Martyrs - Montagne-Noire (Aude) - Pegmatite
- 7 - Lille - Saint-Chély-d'Apcher (Lozère) - Pegmatite potassique
- 8 - Montebas (Creuse)
- 9 - Larnage (Drôme) - Sables feldspathiques et kaoliniques.

Tabl. 24 - Exemples de matériaux feldspathiques utilisés dans l'industrie céramique française.

Le tableau 25 donne les compositions de syénites néphéliniques utilisés pour les céramiques en France.

Product designation Typical chemical analysis	Indusmin			IMC			Norsk Nefelin		
	A-200 %	A-270 %	A-400 %	Crest %	Park %	Apex %	North Cape %		
SiO ₂	60.7	60.7	60.7	60.2	60.2	60.2	56.0		
Al ₂ O ₃	23.3	23.3	23.3	23.5	23.5	23.5	24.2		
Fe ₂ O ₃	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.1		
CaO	0.7	0.7	0.7	0.3	0.3	0.3	1.2		
MgO	0.1	0.1	0.1	Traces	Traces	Traces	Traces		
Na ₂ O	9.8	9.8	9.8	15.3-0.4	15.3-0.4	15.3-0.4	7.8		
K ₂ O	4.6	4.6	4.6	15.3-0.4	15.3-0.4	15.3-0.4	9.1		
L.O.I.	0.7	0.7	0.7	0.4	0.4	0.4	1.0		
Sieve analysis US Sieve N°							Tyler Sieve N° On mesh		
On 70 mesh	0.01	0.0		-	-		32	-	
100	0.05	0.01		-	-		35	-	
140	0.20	0.05		-	-		48	-	
170	-	-		-	-		65	-	
200	0.70	0.15		0.3	0.3		200	0.1	
270	2.00	0.40		-	-		270	-	
325	5.25	1.75		4.7	2.9		325	0.5	
Pan	94.75	98.25		95.0	96.8		Pan	99.4	
Microns % finer than						Apex		% finer than:	
						400	700	30	-
30	70.0	78.0	98.0			98.0	90.0	20	-
20	55.0	65.0	90.0			60.0	90.0	10	50
10	33.5	42.0	65.0			35.0	60.0	5	-
5	19.0	23.0	33.5			18.0		2.5	-
2.5	10.0	12.5	16.0						

Tabl. 25 - Caractéristiques des syénites néphéliniques ayant subi un traitement pour être utilisées dans l'industrie de la céramique.

6.3. AUTRES USAGES

Les matériaux feldspathiques utilisés comme charge ou abrasif ne doivent pas contenir de silice libre (quartz). C'est le cas, en particulier, des roches sous-saturées en silice, comme les syénites néphéliniques et les fillers provenant des dépoussiérages des sables de feldspath destinés à la verrerie.

Les propriétés de la syénite néphélinique, utilisée comme charge ou pigment, sont les suivantes :

- poudre blanche brillante,
- densité : 2,61 g/cm³,
- volume spécifique : 0,38 cm³/g,
- dureté (Mohs) : 5,5 à 6,
- indice de réfraction : 1,53,
- pH (cf. ASTM D-1208) : 9,9,
- forme des particules : nodulaire,
- brillance à sec : 94 à 98, selon finesse,
- absorption d'huile : 21 + à 28 +,
- granularité :
 - . moyenne : 4,5 à 16 µm,
 - . maximale : 17 à 76 µm,
- surface spécifique : 0,55 à 1,45 m²/g, selon finesse.

Le tableau 26 détaille les caractéristiques de syénites qui ont été traitées pour une utilisation comme charges et pigments minéraux.

Product designation	Apex		Minex 2	Minex 3	Minex 4	Minex 7	Minex 10
	400	700					
Appearance				Bright White			
Density, g /cc				2.61			
Lb/US gal				21.7			
Bulking value, US gal/Lb				0.046			
Hardness, Mohs'scale				5.5 - 6.0			
Refractive index, composite				1.53			
pH value, ASTM D-1208:				9.9			
Particle shape				nodular			
Dry Brightness,% CIE Tristimulus	96	98	94	95	96	98	98
Oil Absorption*,ASTM D-281:	22+	28+	21+	21+	22+	28+	28+
Participle size, µm:							
mean	7.5	4.5	16	14	7.5	4.5	2.3
maximum	49	17	105	74	44	17	10
Specific surface area, sq.m/g: (Fisher Sub-Sieve Sizer)	0.95	1.45					
Specific resistance, Ohm-cm: ASTM D-2448	3600	3300		4000	3600	3300	
Hegman grind:	3.5-4.0	5.5-6.0		1.0	3.5-4.0	5.5-6.0	6.5-7.0
Screen Fineness:							
thru 200 mesh, %	100	100	99.3	99.9	100	100	
thru 325 mesh, %	98.9	100	95.8	98.3	99.9	100	
thru 400 mesh, %							100

* La syénite néphélinique tend à avoir une valeur inférieure à celle indiquée par sa valeur d'absorption d'huile.

Tabl. 26 - Caractéristiques des syénites néphéliniques ayant subi un traitement pour être utilisées comme charges et pigments minéraux (source : Industrial Minerals et Rocks, 1983).

Pour les feldspaths utilisés comme amendement siliceux, la préférence va aux feldspaths potassiques ou sodi-potassiques, qui apportent en plus de la potasse. Pour libérer plus rapidement leurs éléments, ils doivent être finement broyés.

Dans le tableau 27 sont résumées les caractéristiques de glaçures céramiques.

Substance	Composition (%)	Point de fusion C°
Eutectique albite-orthose	Na ₂ O : 6,8 K ₂ O : 7,1 Al ₂ O ₃ : 19,0 Si ₂ O : 67,1	environ 1160
Eutectique anorthite-néphéline	Na ₂ O : 15,6 CaO : 5,8 Al ₂ O ₃ : 36,0 Si ₂ O : 42,6	1130
2 orthoses + 3 quartz	K ₂ O : 14,5 Al ₂ O ₃ : 15,7 Si ₂ O : 69,8	1265
1 orthose + 6 quartz	K ₂ O : 10,2 Al ₂ O ₃ : 11,1 Si ₂ O : 78,7	1317
1 albite + 1 anorthite	Na ₂ O : 8,7 CaO : 5,2 Al ₂ O ₃ : 23,9 Si ₂ O : 62,2	1362 débutant 1175

Tabl. 27 - Exemples de constituants de glaçures céramiques avec leurs caractéristiques (source : Industrie Céramique, 1975).

7. METHODES D'EXPLOITATION ET DE TRAITEMENT DES FELDSPATHS

7.1. EXPLOITATION

Les techniques d'exploitation des matériaux feldspathiques dépendent des caractéristiques du gisement.

Les gisements de roches détritiques meubles (sables feldspathiques, arènes granitiques, pegmatites altérés...) s'exploitent nécessairement à ciel ouvert, à l'aide d'engins classiques de carrière : pelle hydraulique, bouteur, chargeuse...

Les gisements de roches massives consolidées (filon, coulée, batholite...) s'exploitent selon les cas en souterrain à l'aide de techniques minières, ou à ciel ouvert, et l'utilisation d'explosifs est nécessaire.

L'une des difficultés de l'exploitation des formations filonniennes est d'abattre la partie noble du gisement sans pollution par les épontes stériles.

7.2. TRAITEMENT

Dans le détail, les méthodes de traitement des matériaux feldspathiques varient avec la nature du minerai à enrichir. Toutefois, la chaîne générale de traitement des feldspaths est peu différente d'une usine à l'autre.

Le traitement réalisé par l'exploitant consiste d'une part à éliminer au maximum les minéraux indésirables (argile, quartz, mica, minéraux lourds, etc.) et, d'autre part, à réduire la roche en grains aux dimensions exigées par l'utilisateur, c'est-à-dire :

- pour l'industrie verrière : < 600 ou 800 μm ;
- pour l'industrie céramique : < 80 ou 100 μm .

De nombreuses installations disposent de chaînes de traitement parallèles qui fournissent les deux qualités de produits.

Le schéma de principe le plus classique pour le traitement d'une roche feldspathique massive est le suivant :

- dégrossissage primaire par concassage dans des concasseurs à mâchoires ;
- criblage (parfois précédé d'un lavage) permettant d'éliminer les particules argileuses et micacées ;
- broyage généralement réalisé dans des broyeurs cylindriques avec un blindage en pavés de silex, ou en matériaux électroréfractaires (porcelaine, alumine) ou en acier recouvert de caoutchouc. Les corps broyants (boulets) sont généralement en silex (galet de mer). Certaines chaînes de

traitement utilisent également des broyeurs biconiques revêtus de pavés de silex et chargés de billes d'alumine.

Le broyage est généralement précédé d'un séchage approprié car les broyeurs à boulets doivent être alimentés en produit sec.

• Criblage

Pour les fractions grossières destinées à la verrerie, la granulométrie est contrôlée par des cribles vibrants. Les fractions fines destinées à la céramique sont traitées par un sélecteur à air permettant un débit acceptable pour ce type de granulométrie.

• Epuration - Concentration

Différentes méthodes sont utilisables pour éliminer les minéraux indésirables (mica et quartz en particulier). Parmi celles-ci, on peut citer :

- la préconcentration par coupure granulométrique lorsque l'analyse fait apparaître une concentration préférentielle du feldspath dans une tranche granulométrique particulière ;
- la concentration par flottation assez peu utilisée en raison d'inconvénients d'ordre économique et pratique ;
- la concentration par triage électrostatique, procédé également coûteux, qui, après polarisation provoquée des particules minérales grâce à un réactif approprié, consiste à séparer les minéraux électropositifs (microcline par exemple) des minéraux chargés négativement (quartz et albite par exemple) ;
- l'épuration par séparation magnétique à haute ou basse intensité qui permet d'éliminer facilement la biotite. Ce procédé est utilisé d'une manière presque systématique dans toutes les unités de traitement des feldspaths.

Cette technique peut être également employée pour éliminer les oxydes et sulfures de fer ou de titane dans les syénites néphéliniques ou pour obtenir un produit de première qualité (< 0,10 % Fe_2O_3).

• Epuration gravimétrique

Exceptionnellement, lorsque le produit à traiter se situe dans une tranche granulométrique assez étroite, il est possible d'éliminer des éléments nettement plus denses que le feldspath ($d = 2,60$) en utilisant des spirales ou des tables à secousses. Actuellement, cette technique n'est pas utilisée en France.

8. CRITERES D'EXPLOITABILITE DES GISEMENTS

8.1. CRITERES GENERAUX

Feldspaths et syénite néphélinique sont des matériaux de valeur relativement peu élevée. Ils ne peuvent donc supporter des coûts d'exploitation ou de transport importants. Les utilisateurs peuvent toujours utiliser d'autres matériaux lorsque les prix deviennent trop élevés, notamment en verrerie. La seule exception est l'utilisateur qui ne peut employer que des feldspaths à haute teneur en potasse (émaux) et qui est prêt à supporter des prix élevés pour obtenir les produits dont il a besoin. Cependant les quantités de feldspath correspondant à ces usages spécifiques restent très faibles.

En général, les matériaux feldspathiques seront exploités à ciel ouvert et se trouveront bien situés par rapport au lieu d'utilisation.

8.2. GISEMENTS DE FELDSPATHS

Pour être exploitable, en roche, la proportion de feldspaths contenus doit être de l'ordre de 50 % et, ce qui est le plus important, la teneur en Fe_2O_3 et en impuretés colorantes doit être faible et susceptible d'être ramenée à moins de 1 % pour les qualités les moins nobles, et 0,1 % voire 0,08 % pour les variétés les plus nobles. Le matériau doit donc pouvoir être traité facilement : enrichissement en feldspath, élimination des minéraux ferrifères soit par triage en carrière (cas des exploitations françaises), soit par séparation magnétique ou par flottation (actuellement aux USA, en Norvège, en Finlande...). Dans ces deux derniers cas, il est nécessaire que les impuretés puissent être libérées à une dimension granulométrique compatible avec l'utilisation envisagée.

Sur le matériau raffiné, on pratique une analyse granulométrique, des tests de fusion (température de fusion, couleur du produit fondu) et une analyse chimique quantitative (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , perte au feu).

8.3. GISEMENTS DE SYENITE NEPHELINIQUE

Pour être exploitable en verrerie et en céramique, une syénite néphélinique doit pouvoir fournir des teneurs en Al_2O_3 et en alcalins comparables à celles des produits actuellement sur le marché, avec des teneurs en Fe_2O_3 aussi faibles que possible (0,05 % à 0,08 %).

Comme pour les feldspaths, il est nécessaire de pouvoir éliminer les impuretés colorantes de la manière la plus simple. Ceci est possible lorsque :

- la granularité de la roche n'est pas trop fine ;
- le gisement n'est pas trop complexe (composition, structure) ;
- les impuretés à éliminer ne sont pas trop finement disséminées à l'intérieur de la roche.

Pour la production de fillers, la blancheur du matériau est aussi importante que sa composition chimique.

Pour la fabrication de produits chimiques, les teneurs en Al_2O_3 doivent être très élevées, de l'ordre de 30 %, mais, en général, les autres éléments ne sont pas aussi pénalisants que dans les produits pour verrerie et pour céramique.

9. PRODUITS DE SUBSTITUTION

Compte-tenu du prix de revient relativement bas des feldspaths et des syénites néphéliniques, il n'existe pas de matériau de substitution économiquement comparable pour les produits utilisés en verrerie et céramique.

En réalité la concurrence industrielle s'exerce principalement entre les feldspaths et les roches à feldspathoïdes.

Pour les usages secondaires (produits chimiques, fillers, ciments), il existe de nombreux matériaux ou minéraux plus ou moins concurrents qui peuvent se substituer aux produits feldspathiques (kaolin, carbonate, bauxite...).

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos remerciements à Monsieur Pierre BOISAUBERT (Syndicat National des producteurs de Kaolin et de Feldspaths Français) qui a relu ce document avant sa publication.

BIBLIOGRAPHIE

- BERTON Y. (1979) - Mémento substances utiles : Feldspaths et feldspathoïdes. Rap. BRGM 79 SGN 162 MTX.
- CHAUMET C. (1970) - Exploitation et traitement des matières premières destinées à la Céramique. L'Industrie Céramique n° 625 (janvier 1970).
- COSSON J. (1974) - Quelques substances utiles du Massif central et de sa bordure en région Midi-Pyrénées. Rap. BRGM n° 74 SGN 384 MPY.
- EULRY M. (1987) - Les gisements de feldspaths et de syénite néphélinique en Languedoc-Roussillon. Rap. BRGM n° 87 SGN 666 LRO.
- GILLET G., HOUOT R. (1978) - Valorisation de syénites néphéliniques par procédés magnétiques. Industrie Minérale - minéralurgie (octobre 1978).
- MEDINA-GARCIA J., PIZZARO J., LOPEZ-GOMEZ F.A. (1984) - Situacion actual y perspectivas de los feldspaths en Espana Rocas y Minerales (novembre 1987).
- ODENT B.E. (1986) - Le marché mondial de la syénite néphélinique et les éléments technico-économiques préliminaires sur le gisement d'Eboundja (Cameroun). Rap. BRGM n° 86 GEO SED 44.
- POTTER M.J. (1986, 1988, 1989, 1990, 1991) - Feldspar, nepheline syenite and aplite. Minerals Yearbook.
- ROBBINS J. (1986) - Feldspar and nepheline syenite. Filling a need?. Industrial Minerals.
- ROBERT D. (1975) - Enrichissement et épuration des minerais feldspathiques. L'Industrie Céramique, n° 682.
- VIE G. (1972) - L'extraction et le broyage des feldspaths à Salvezines. L'Industrie Céramique, n° 649.
- VIE G. (1973) - Exploitation de pegmatites et feldspaths à Saint-Paul-de-Fenouillet (P.O.). L'Industrie Céramique, n° 666.
- WATSON I. (1981) - Feldspathic fluxes, the rivalry reviewed. Industrial Minerals (avril 1981).

Documents anonymes

- Équipement mécanique carrière et matériaux, n° 115, octobre 1972.
- L'Industrie Céramique, n° 798, octobre 1985.
- L'Industrie Céramique et Verrière, n° 895, 7-8/94.
- Statistiques EUROSTAT, de 1990 à 1993

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 - Départements français producteurs de feldspaths en 1994.
Fig. 2 - Localisation des principaux gisements de syénite néphélinique dans le monde (d'après Industrial Minerals and Rocks).
Fig. 3 - Utilisation industrielle des feldspaths (*in*: Rocas y Minerales, 1987).

LISTE DES TABLEAUX

- Tabl. 1 - Production mondiale de feldspaths de 1987 à 1992.
Tabl. 2 - Exportations et importations mondiales de feldspaths en 1984.
Tabl. 3 - Marché des feldspaths en France de 1981 à 1993.
Tabl. 4 - Importations-exportations de feldspaths en France en 1993.
Tabl. 5 - Evolution de la production de syénite néphélinique dans le monde entre 1983 et 1992.
Tabl. 6 - Importations-exportations de leucite et syénite en France en 1993.
Tabl. 7 - Importations de leucite, néphéline et syénite néphélinique en Europe en 1992.
Tabl. 8 - Principaux négociants de syénite néphélinique en France.
Tabl. 9 - Bilan économique du marché français des feldspaths et de la syénite néphélinique.
Tabl. 10 - Prix indicatif des feldspaths sur la marché international.
Tabl. 11 - Estimation des prix à la production de 1984 à 1993.
Tabl. 12 - Prix indicatif des syénites néphéliniques sur le marché international.
Tabl. 13 - Les producteurs français de feldspaths en 1991.
Tabl. 14 - Coordonnées des principaux exploitants français.
Tabl. 15 - Fournisseurs de feldspaths pour les industries céramiques et verrières.
Tabl. 16 - La famille minéralogique des feldspaths.
Tabl. 17 - Composition chimique théorique des feldspaths et des feldspathoïdes.
Tabl. 18 - Composition chimique moyenne de quelques syénites néphéliniques.
Tabl. 19 - Nature feldspathique et principales utilisations.
Tabl. 20 - Composition chimique des principales catégories de verre.
Tabl. 21 - Matériaux entrant dans la fabrication de différents types de verre.
Tabl. 22 - Exemples de matériaux feldspathiques utilisés en verrerie.
Tabl. 23 - Caractéristiques des syénites néphéliniques ayant subi un traitement pour être utilisées dans l'industrie du verre.
Tabl. 24 - Exemples de matériaux feldspathiques utilisés dans l'industrie céramique française.
Tabl. 25 - Caractéristiques des syénites néphéliniques ayant subi un traitement pour être utilisées dans l'industrie de la céramique.
Tabl. 26 - Caractéristiques des syénites néphéliniques ayant subi un traitement pour être utilisées comme charges et pigments minéraux.
Tabl. 27 - Exemples de glaçures céramiques avec leurs caractéristiques.

RÉALISATION BRGM

**impression et façonnage :
SERVICE REPROGRAPHIE**