

DOCUMENT PUBLIC

Mémento roches et minéraux industriels

La fluorine ou spath fluor

Étude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 99-G-185

décembre 1999
R 40825



DOCUMENT PUBLIC

Mémento roches et minéraux industriels
La fluorine ou spath fluor

Étude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 99-G-185

Rédigé sous la responsabilité de
J. Féraud

décembre 1999
R 40825



Mots clés : Fluorine, Fluorite, Spath Fluor, Filon, Stratiforme, Statistiques minières, Industrie minérale, Ressources, Extraction, Transformation, Production minière française, Mines, Carrières, Non-métalliques, Minéraux industriels, Roches et minéraux industriels, Sociétés minières françaises, Ministère de l'Industrie, Industrie métallurgique, Industrie chimique, Fluor, Aluminium, Acide fluorhydrique, Fondant, Hydrofluorocarbones, Chlorofluorocarbones, Hydrochlorofluorocarbones, Industrie du Verre, Optique, Soudure, Abrasifs, Economie minière.

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

Féraud J. (1999) – Mémento des roches et minéraux industriels : la fluorine ou spath fluor. Rap. BRGM R 40825, 102 p., 2 fig., 10 tabl., 2 ann., 1 carte h.t.

© BRGM, 1999, ce document ne peut être reproduit en totalité ou partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce document fait un point bibliographique sur la fluorine (ou spath fluor) dans le monde et en particulier sur la situation de l'industrie française début 2000. Il a été établi dans le cadre du programme de Service public du BRGM et avec le concours de la Profession française.

La fluorine a trois grands groupes d'utilisation, chacun demandant des spécifications techniques particulières :

- produit de base de la chimie des dérivés minéraux et organiques du fluor et de la fabrication de l'aluminium (qualité "spath acide" à plus de 97 % de CaF_2) ;
- fondant dans la métallurgie (qualité "spath métallurgique", à plus de 60 % de CaF_2) ;
- dans l'industrie du verre et des céramiques, en cimenterie et dans d'autres applications.

Les deux premiers groupes d'utilisation sont les plus importants et représentent plus de 90 % de la consommation.

La production mondiale (environ 4,5 Mt CaF_2 en 1999) est dominée depuis plusieurs années par la Chine (50 % du total en moyenne) suivie par le Mexique (13 %), la Mongolie (6 %), la Russie (6 %) et l'Afrique du Sud (5 %) qui semble monter en puissance. Groupés dans un peloton suivent la France (2,6 %), l'Espagne (3 %), l'Italie (2,5 %) et le Maroc (2,5 %).

La production européenne doit faire face à la concurrence des importations chinoises (mesures antidumping). Toutefois, la France maintient sa position en ce qui concerne la production de spath de qualité. La production française cumulée en minerai tout-venant est estimée, depuis 1861, à 10,3 Mt en CaF_2 , avec une production record de 370 kt en 1972. En 1999 comme en 1998 et 1997, la France a produit un peu plus de 100 000 t.

Nos mines en activité en 2000 sont : Montroc et Le Moulinal (Tarn), mines à ciel ouvert avec une production cumulée de 2,5 Mt de CaF_2 ; Le Burg, appelé aussi Le Burc (Tarn), mine souterraine avec une production cumulée de 1,5 Mt CaF_2 . Dans deux autres mines l'extraction est suspendue mais les réserves ne sont pas épuisées ; ce sont Le Rossignol-Chaillac (Indre) et Maxonchamp (Vosges). C'est la SOGEREM, filiale de Pechiney, qui exploite les mines de Montroc-Moulinal et Le Burg. Le minerai est traité sur les sites de production. C'est la Société Industrielle du Centre (SIC) qui commercialise les stocks de la mine du Rossignol-Chaillac, et les Mines du Haut-du-Them ceux de la mine de Maxonchamp.

D'autres gros gisements ont été exploités en France, à Escaro (Pyrénées-Orientales) avec plus de 2 Mt de CaF_2 , à Fontante (Var) avec 1 Mt CaF_2 , et à Langeac (Haute-Loire) avec plus de 1 Mt de CaF_2 . Parmi les réserves et ressources françaises, tout un district

estimé à 6 Mt de fluorine est en sommeil dans le Morvan : Antully (Saône-et-Loire), Pierre-Perthuis (Yonne), Courcelles-Fremoy (Côte-d'Or), Egreuil (Nièvre). Le niveau déprimé des prix internationaux ne permet pas d'envisager une mise en exploitation prochaine.

Avec des réserves en quantité importante, la France est assurée d'une autonomie pour ses besoins pendant plusieurs décennies au rythme actuel de consommation, et de possibilités d'exportation si la concurrence est loyale. Les exportations se font actuellement surtout vers les pays de l'UE. La situation des producteurs européens a été soulagée par la prolongation des taxes antidumping du spath acide chinois décidée en septembre 2000 par la Communauté Européenne. Ils sont en revanche dans l'attente des modalités précises des législations environnementales concernant la protection de la couche d'ozone et surtout l'effet de serre.

Les spécialistes indiquent que la demande de l'industrie chimique des dérivés du fluor devrait continuer à croître. Outre la mise au point de fluides de substitution, il reste aussi à ce secteur le champ très prometteur des plastiques et des solvants.

La demande de l'industrie de l'aluminium devrait, elle aussi, conserver voire accroître son importance. En revanche, le marché de la sidérurgie reste moindre et stationnaire.

Sommaire

Introduction	9
1. Les propriétés fondamentales de la fluorine	11
1.1. Aspect	11
1.1.1. Couleur	12
1.1.2. Formes cristallines.....	13
1.2. Propriétés physiques	13
2. Les applications industrielles de la fluorine	15
2.1. La fluorine dans l'industrie chimique et dans celle de l'aluminium.....	15
2.1.1. Chimie minérale	16
2.1.2. Chimie organique : réfrigérants, mousses isolantes solvants spéciaux (et aérosols)	17
2.1.3. Autres utilisations dérivées de l'acide fluorhydrique	23
2.1.4. Le fluor, la pharmacie et la santé publique.....	23
2.2. La fluorine employée comme fondant	24
2.2.1. Fondant en sidérurgie (surtout pour la désulfuration)	25
2.2.2. Fondant en soudure : baguettes et flux	26
2.2.3. Fondant dans l'industrie du verre et des céramiques.....	26
2.2.4. Fondant pour le ciment	27
2.3. Divers	27
2.3.1. La fluorine en optique : lentilles et fibres optiques	27
2.3.2. L'industrie des abrasifs doux.....	28
2.3.3. Les supraconducteurs.....	28
2.3.4. La poterie	28

3. Géologie : types de gisements	29
3.1. Les gîtes stratiformes ou classés comme tels, dans des roches sédimentaires.....	30
3.1.1. La typologie des gîtes stratiformes ou MVT	30
3.1.2. La fragilité des classifications trop rigides	31
3.1.3. Genèse des minéralisations.....	32
3.1.4. Exemples français.....	32
3.2. Les gîtes filoniens	33
3.2.1. La typologie des gîtes filoniens	33
3.2.2. Filons en extension et filons en cisaillement.....	33
3.2.3. Genèse, géométrie et zonalités minérales.....	34
4. Exploration, production, traitement et commercialisation de la fluorine	37
4.1. Exploration minière	37
4.2. Exploitation minière et traitement	38
4.3. Commercialisation et prix.....	39
5. Panorama mondial de la fluorine	41
5.1. Une situation à la fois florissante et critique.....	41
5.2. Les réserves exploitables	43
5.3. La production mondiale.....	44
5.4. Données récentes sur les principaux pays producteurs.....	48
5.4.1. La Chine	48
5.4.2. Le Mexique.....	50
5.4.3. L'Afrique du Sud.....	51
5.4.4. La Mongolie	55
5.4.5. La Namibie	56
5.4.6. Le Royaume-Uni	57

5.5. Producteurs, transformateurs et consommateurs de fluorine.....	59
5.6. Consommation mondiale.....	60
5.7. Substituts possibles.....	60
6. Le management environnemental de l'industrie du fluor.....	63
6.1. L'influence du chlore des fluides à CFC sur la couche d'ozone.....	63
6.2. La contribution des fluides à HCFC à l'effet de serre.....	63
6.3. La réduction des émissions de fluor de l'industrie de l'aluminium.....	65
6.4. L'environnement au quotidien sur les mines, et le réaménagement progressif des sites pendant l'exploitation.....	66
7. Panorama français sur la fluorine.....	69
7.1. La répartition des principales ressources exploitables et potentielles en France.....	69
7.2. La production minière française.....	70
7.2.1. L'importante production minière passée.....	70
7.2.2. La structure actuelle de la profession et son bilan d'activité global.....	73
7.2.3. Les gisements actuellement exploités.....	74
7.2.4. Les réserves et les ressources.....	78
7.3. L'approvisionnement de la France, sa consommation et le commerce extérieur....	82
7.4. La procédure antidumping européenne.....	83
Conclusion, perspectives d'évolution.....	85
Remerciements.....	86
Bibliographie.....	87

Liste des figures

Fig. 1 - Répartition mondiale des principaux producteurs de spath chimique de 1994 à 1999.....	46
Fig. 2 - Répartition mondiale des principaux producteurs de spath métallurgique de 1994 à 1999.....	47

Liste des tableaux

Tabl. 1 - Cours du spath fluor, par catégorie et origine, 1997-1999	40
Tabl. 2 - Réserves mondiales de spath fluor.....	43
Tabl. 3 - Production et liste des principaux pays producteurs de fluorine	44
Tabl. 4 - Evolution de la production mondiale de fluorine	44
Tabl. 5 - Répartition géopolitique de la production mondiale.....	49
Tabl. 6 - Liste des principales sociétés productrices dans le monde	52
Tabl. 7 - Principales mines françaises de fluorine.....	71
Tabl. 8 - Evolution de la production française de fluorine.....	73
Tabl. 9 - Consommation française de fluorine de 1991 à 1998.....	82
Tabl. 10 - Importations et exportations françaises de fluorine de 1990 à 1997.....	83

Liste des annexes

Ann. 1 - Statistiques du Mexique	95
Ann. 2 - Adresses utiles.....	99

Carte hors-texte

Gisements de fluorine de la France, échelle 1/2 500 000 (extraite de J. Lhégu, 1978).

Introduction

Le présent document s'insère dans la collection des mémentos des Roches et Minéraux industriels, ouvrages de compilation bibliographique édités par le BRGM à la demande du ministère de l'Industrie. Ils sont mis à la disposition du public pour répandre les connaissances sur les minéraux industriels, leurs propriétés, leurs utilisations, leur géologie, leur marché, leurs substituts, et les données sur les réserves mondiales et, le cas échéant, françaises.

La fluorine est un minéral au sens strict du terme puisque c'est la source principale de fluor. Ceci explique en partie qu'elle soit classée par le Code Minier en France parmi les substances concessibles alors que la barytine relève de la réglementation des carrières (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement ou ICPE). C'est aussi un minéral industriel utilisé directement en raison de ses propriétés de fondant en cimenterie et (depuis au moins 1550) en sidérurgie.

Elle a une importance mondiale parmi les minéraux industriels utilisés dans l'industrie métallurgique et dans l'industrie chimique. La France a montré une vocation très forte pour cette substance, que ce soit à travers sa production considérable passée (11 Mt de CaF_2 contenu produites depuis 1861), sa production actuelle (qui malgré les difficultés du marché se tient encore à un rang mondial de l'ordre de 100 kt/an) et son potentiel encore notable (10 Mt).

Les publications sur la fluorine sont nombreuses. En France, une importante littérature lui a été consacrée jusqu'en 1995 notamment par Alexis Chermette, géologue minier (16.7.1902 † 26.8.1996) qui s'était littéralement passionné pour ce beau minéral. Il avait acquis sur cette substance une notoriété internationale grâce à d'inlassables visites sur les mines du monde entier. Son nom estimé par tous les directeurs d'exploitations, son goût pour l'Histoire des mines et des hommes qui les font, et sa haute figure de collectionneur de rang mondial resteront attachés à ce minéral. Sa collection de cristaux d'une exceptionnelle beauté est conservée au musée du Parc de la Tête d'Or à Lyon.

Le présent mémento s'est largement inspiré de son œuvre, en essayant d'en résumer les acquis se rapportant à l'objet de la collection. Mais il les a intégrés bien sûr dans une compilation des données plus récentes afin de donner au public un panorama actuel de cette substance, ciblé sur ses aspects industriels essentiels. Les lecteurs sont invités à se reporter aux dernières publications d'A. Chermette (1985 et 1995) pour trouver davantage de précisions sur la minéralogie, la cristallographie de la fluorine, sur son utilisation comme pierre d'ornement, et enfin sur l'historique ou la géologie des petites exploitations qui n'ont qu'un intérêt anecdotique ou très local.

Pour des données ou des cartes et coupes sur les mines françaises de trop faible importance qui, de même, n'ont pu être décrites, on se reportera aussi au répertoire des

gisements français dressé par J. Lhégu (1978) dans le cadre de l'Inventaire Minier métropolitain confié à cette époque par le ministère de l'Industrie au BRGM.

En ce qui concerne les statistiques de production, pour certains pays, on a trouvé des chiffres trop contradictoires dans les compilations officielles ou journalistiques qui sont habituellement utilisées comme sources pour les mémentos, et croisées. On a donc exceptionnellement lancé une enquête directe auprès des ministères des mines des quelques pays concernés. Comme les mémentos sont périodiquement actualisés, les données qui malheureusement ne parviendraient de ces pays qu'après l'édition du présent mémento seront insérées dans la mise à jour ultérieure.

1. Les propriétés fondamentales de la fluorine

Parmi les substances naturelles non métalliques, les minerais fluorés focalisent depuis des décennies un important intérêt de la part de l'industrie, en raison du nombre et de l'importance économique de plusieurs de leurs propriétés qui ont des débouchés appréciables et très divers : sidérurgie, métallurgie de l'aluminium, fabrication des matières plastiques, solvants, fluides frigorigènes, soudure, verrerie, cimenterie, etc. Le plus important de ces minerais est la fluorine. Son nom vient du fait qu'elle est le principal minéral de fluor en tonnage exploité. Cette propriété chimique la place à la base de toute l'industrie chimique du fluor. L'origine étymologique du nom fluorine vient du latin "fluo" qui signifie "je coule", allusion à la propriété caractéristique de fondant du minéral.

C'est un fluorure de calcium de formule chimique CaF_2 , qui possède une teneur en fluor d'environ 49 %. Ses principales substitutions observées sont celles du Ca par les terres rares, yttrium ou cérium.

En France, on l'appelle aujourd'hui indifféremment fluorine ou fluorite, cette seconde dénomination (calquée non seulement sur l'anglo-saxon mais aussi sur le modèle de calcite, aragonite, etc.) étant passée dans le langage dans les années 1970 seulement. Depuis plusieurs décennies la fluorine est aussi appelée plus spécifiquement spath fluor dans le commerce et l'industrie où elle désigne un produit minéral contenant une proportion suffisante de fluorine pour présenter un intérêt commercial (le mot d'origine germanique spath étant commun aux minéraux dont le clivage facile donne une surface vitreuse, quoique leurs compositions chimiques soient très diverses). Le mot méjanite désigne une marque de produit commercialisée par la SOGEREM.

En anglais, la fluorine est appelée *fluorspar* alors que le mot anglais *fluorine* signifie fluor.

1.1. ASPECT

La fluorine est un minéral pierreux à l'éclat vitreux, transparent ou translucide, se présentant généralement en masses compactes à clivage plus ou moins facile, ou en masses concrétionnées. Il est fréquent qu'elle prenne des couleurs vives qui font toute la beauté des spécimens utilisés en ornementation (exemple des balustres des balcons du grand escalier de l'Opéra de Paris) et facilitent son identification.

Mais parfois son identification nécessite une détermination aux rayons X ou une analyse chimique. En effet, quand elle est blanchâtre, pierreuse et assez mate, on peut la confondre avec de la calcite, de la dolomite ou de la barytine massive. Le cas a été notamment observé dans un filon de socle du Mercantour (Baume des Rances) où elle

avait été prise un peu hâtivement par plusieurs géologues pour de la barytine à cause d'une légère schistosité de fracture connexe du métamorphisme alpin. La fluorine grisâtre, concrétionnée, des grands gisements mexicains (Quatro Palmas) rappelle certains calcaires organogènes. La fluorine ferrugineuse de l'Escaro (Pyrénées-Orientales) a longtemps été confondue avec de la silice. Dans d'autres gisements, elle se présente en masses grenues, terreuses et pulvérulentes qui rendent son identification tout aussi difficile (fluorine violette de la variété antozonite de certains filons uranifères du Limousin, fluorine du gisement de Mae Thann en Thaïlande, fluorine d'origine volcano-sédimentaire des cratères à diatomites du Latium).

1.1.1. Couleur

Pure, la fluorine est incolore parfaitement transparente et elle est alors recherchée pour ses qualités optiques. Souvent la fluorine est incolore ou blanchâtre, mais souvent aussi elle est colorée. Ces couleurs sont variées et souvent vives. On rencontre par ordre de fréquence décroissante le vert, le violet, parfois le bleu vert, assez rarement le jaune, le bleu, très rarement le rose, le noir ou violet très foncé, le rouge.

La couleur est due à des impuretés incluses dans le cristal lors de sa croissance naturelle et soumises ensuite à des rayonnements ionisants. C'est historiquement dans la fluorine de Valzergues (Aveyron) que ce phénomène a été analysé pour la première fois. L'oxygène joue un rôle important parmi ces impuretés. La nature des terres rares (lanthanides) en présence dans le réseau atomique est très déterminante. Elles s'avèrent d'ailleurs d'excellents marqueurs des conditions de dépôt de la fluorine et sont utilisées en métallogénie.

Le mauve ou violet est dû à des colloïdes de calcium finement dispersés, d'une taille moyenne de 300 à 400 Å provoquant la diffusion de la lumière. Lorsque la concentration en colloïdes est très importante, la fluorine est violet intense presque noire et on la nomme l'antozonite. Elle est typique des gisements d'uranium, contient du fluor à l'état gazeux et dégage au broyage ou au frottement une odeur d'ozone caractéristique.

Le bleu foncé est dû à la diffusion de la lumière par des colloïdes de calcium de taille supérieure à celle des colloïdes qui déterminent la couleur mauve ou violette. Le bleu clair est dû à l'association d'un ion yttrium trivalent à un centre fluor aligné selon l'axe du cristal. Dans les fluorines du Cumberland, la fluorescence bleu violet à la lumière du jour est causée par l'ion europium divalent qui remplace le calcium.

Le vert clair est dû à une autre terre rare divalente, le samarium. Le jaune vert est dû à la présence de deux centres, un centre identique à celui de la couleur bleu clair et un centre similaire, association d'un centre fluor et d'un ion cérium divalent. La couleur jaune est due à un groupe O₃ remplaçant deux ions fluor proches voisins. La couleur brune est due à des matières organiques.

Le "spath mandarin" est une variété utilisée sous forme de plaques polies d'aspect décoratif.

Ces couleurs sont facilement détruites par chauffage ou par simple exposition à la lumière du jour.

Les teintes courantes se présentent très souvent dans les filons en rubanements alternativement blanchâtres ou colorés en vert, violet, plus rarement bleu ou jaune (fluorine dite zonée). Ces colorations témoignent de la succession de plusieurs phases de dépôts dans des conditions différentes de salinité, de composition chimique des fluides, de température et/ou de pression, etc. Ces paramètres ont été bien analysés notamment, en ce qui concerne la littérature de langue française, dans les monographies récentes consacrées à divers gisements, par exemple en France ceux de l'école de J.Cl. Touray, J. Lhégu, M. Jébrak etc.

1.1.2. Formes cristallines

Les cristaux de fluorine se présentent sous forme de cubes et plus rarement d'octaèdres. Ils sont souvent maclés. La fluorine présente un clivage parfait suivant (111).

1.2. PROPRIETES PHYSIQUES

La fluorine a une dureté moyenne, de 4 dans l'échelle de Mohs. Sa densité est de 3,18 en principe mais atteint jusqu'à 3,6 dans certaines variétés riches en terres rares (ytthrofluorites). C'est un minéral fragile. Appartenant au système cubique, elle est isotrope. Son indice de réfraction est 1,434. Elle est transparente dans une large bande spectrale notamment aux ultraviolets et aux infrarouges. Elle a une faible dispersion chromatique et son indice varie peu avec la longueur d'onde. Elle est donc utilisée couramment en optique (macrocristaux, lentilles synthétiques) malgré son manque de dureté et sa sensibilité aux chocs thermiques.

Elle est en principe insoluble dans l'eau à pH 7. En pratique, elle est très légèrement soluble dans l'eau pure (16 mg/l à 18°C) et beaucoup plus dans les eaux chaudes de nature alcaline. La teneur en fluor des eaux minérales est fonction de leur thermalité.

La principale propriété physique de la fluorine utilisée dans l'industrie est sa propriété de fondant.

Son point de fusion est d'environ 1390°C. Elle devient phosphorescente quand on la chauffe. La thermoluminescence est un guide de prospection et permet de caractériser la fluorine dans les concentrés alluvionnaires.

La fluorine devient plus ou moins fluorescente en mauve quand on la soumet à une irradiation ultraviolette ou cathodique, quelle que soit la couleur propre du minéral. Le phénomène de fluorescence tire d'ailleurs son nom de cette propriété de la fluorine. La luminescence est bleue ou violette, plus rarement jaune ou rouge.

2. Les applications industrielles de la fluorine

La fluorine est utilisée principalement dans deux grands secteurs industriels :

- dans l'industrie chimique ("spath chimique", dénommé parfois "spath acide" ou "*acidspar*"), comme source de l'élément fluor, que ce soit en chimie organique (plastiques, réfrigération, mousses isolantes, solvants) ou pour la fabrication de produits minéraux comme l'acide fluorhydrique et le fluorure d'aluminium ;
- dans la sidérurgie ("spath métallurgique" dénommé parfois "*metspar*"), comme fondant.

Pendant de nombreuses années, pour les pays européens, l'importance économique de ces deux grands débouchés a été à peu près égale en tonnage mais le secteur de la chimie était plus important en valeur marchande. Aujourd'hui, en général l'application chimie est plus importante en volume que l'application sidérurgie ; seuls les pays peu développés ayant une industrie chimique peu développée et une industrie sidérurgique très traditionnelle (mettant en oeuvre des procédés de fabrication peu modernes) peuvent avoir une consommation équivalente de spath dans les deux applications.

On distingue, en outre, diverses applications industrielles de moindre importance :

- dans l'industrie du verre et des céramiques ;
- en soudure ;
- comme matériau pour la fabrication de lentilles optiques.

Les produits dérivés de la chimie du fluor sont aussi employés dans divers secteurs industriels de pointe, comme la pharmacie, les carburants pour fusée ou les supraconducteurs.

2.1. LA FLUORINE DANS L'INDUSTRIE CHIMIQUE (SOURCE DU FLUOR) ET DANS CELLE DE L'ALUMINIUM

Les spécifications internationales de la qualité de spath requise pour cet emploi sont les teneurs en CaF_2 (supérieures à 97 %) et en SiO_2 (inférieures à 1 %).

Les applications concernent d'abord la chimie minérale, avec la fabrication de l'acide fluorhydrique, (matière première elle-même à la base de la fabrication des dérivés fluorés organiques et minéraux) et la fabrication de fluorure d'aluminium utilisé pour l'électrolyse de l'alumine. Elles concernent toute la chaîne de la chimie organique avec divers produits élaborés à partir de l'acide fluorhydrique (fluides frigorigènes, gaz propulseurs, matières plastiques, mousses isolantes, solvants, etc.).

2.1.1. Chimie minérale

a) Fabrication de l'acide fluorhydrique

Les chimistes distinguent le fluorure d'hydrogène de l'acide fluorhydrique. Le fluorure d'hydrogène est un gaz qui se mélange à l'eau en toutes proportions. L'acide fluorhydrique est fabriqué par attaque de la fluorine, préalablement pulvérisée, par l'acide sulfurique chauffé légèrement. La réaction chimique est $\text{CaF}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2 \text{HF} + \text{CaSO}_4$. Il faut environ 2,2 à 2,4 t de spath à 97 % CaF_2 pour fabriquer une tonne d'acide fluorhydrique. Le résidu est l'anhydrite qui entre dans la fabrication de chapes liquides.

b) Fabrication du fluorure d'aluminium pour l'élaboration de l'aluminium

Les applications principales de l'acide fluorhydrique sont d'abord la fabrication du fluorure d'aluminium AlF_3 , et plus accessoirement celle de la cryolithe artificielle Na_3AlF_6 qui sont utilisés dans la métallurgie de l'aluminium comme électrolytes pour réduire l'alumine en aluminium métal. Le procédé consiste à dissoudre l'alumine dans un bain de fluorures d'où l'aluminium est extrait par électrolyse. La cryolithe est obtenue par l'attaque de l'alumine par l'acide fluorhydrique avec formation de fluorure d'aluminium et précipitation de cryolithe par une solution de soude. Cette réaction chimique est $12 \text{HF} + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 6 \text{NaOH} \rightarrow 2\text{Na}_3\text{AlF}_6 + 12 \text{H}_2\text{O}$. La fabrication d'une tonne d'aluminium nécessite, selon le type d'installation, de l'ordre de 10 à 40 kg de spath chimique concentré, ce qui représente le tiers de la consommation mondiale de spath fluor.

Parmi les produits de substitution à la fluorine utilisés actuellement dans certains pays pour la fabrication du fluorure d'aluminium, il faut mentionner la valorisation des déchets du traitement des phosphates, celui-ci produisant notamment de la fluorapatite $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}]$. On utilise aussi un composé à base de fluosilicate de sodium qui autrement ne serait pas valorisé.

c) Fabrication d'autres fluorures (d'uranium notamment)

Les autres applications notables de l'acide fluorhydrique dans le domaine de la chimie minérale sont le nettoyage des métaux, le décapage des tôles d'acier et d'inox, et la fabrication de l'hexafluorure d'uranium qui est un composé chimique intermédiaire dans la chaîne de fabrication de l'uranium (séparation de l'U235 et de l'U238 par diffusion). On utilise aussi des dérivés de l'acide fluorhydrique en verrerie, pour le dépolissage et la gravure du verre.

Enfin, un autre débouché des produits chimiques fluorés minéraux est la fabrication des fibres optiques en verre, dont la composition contient de nombreux fluorures, le fluorure

de strontium notamment (cf. § 2.3.1).

2.1.2. Chimie organique : réfrigérants, mousses isolantes, solvants spéciaux (et aérosols)

La fabrication de l'acide fluorhydrique débouche surtout sur l'autre domaine considérable qu'est la chimie organique. Le principal marché de la chimie organique de l'acide fluorhydrique est le marché des composés fluorés organiques ou fluorocarbures appelés communément fluorocarbones, de la famille des alcanes. La chimie organique a donné des sigles rébarbatifs à ces produits qui sont nombreux et très différents, afin de les classer par familles de propriétés et de débouchés. On y distingue :

- les chlorofluorocarbones ou CFC (qui ont connu un essor considérable à partir de 1930 jusqu'à ce qu'ils soient interdits par le protocole de Montréal en 1987) ;
- les hydrochlorofluorés ou HCFC ;
- les hydrofluorocarbones ou HFC (sans chlore).

Leurs usages principaux sont très diversifiés mais ils se rangent dans deux grands types : les fluides et les matières plastiques. De nombreux mélanges de fluorochlorocarbones sont employés comme mélanges réfrigérants (fréons) et comme gaz propulseurs des aérosols. Leur autre principal débouché est la fabrication de matières plastiques fluorées, la fabrication des mousses souples (matelas, coussins) ou des mousses rigides (installations thermiques et phoniques) employées dans l'ameublement et dans l'industrie automobile.

Parmi les débouchés d'importance économique secondaire, on utilise la propriété du fluorure d'hydrogène formé par action directe du fluor sur l'hydrogène de dégager une grande quantité d'énergie et de posséder une excellente impulsion spécifique, d'où son emploi pour la propulsion des fusées (propergols).

Il est aussi souvent employé comme catalyseur dans de nombreuses réactions organiques.

Les recherches dans le domaine des dérivés fluorés portent essentiellement, depuis ces dernières années, sur la mise au point des « substituts » : substitution dans les années passées des CFC par les HCFC ; substitution dans les années actuelles et futures des HCFC par les HFC.

En 1999, la fabrication des HCFC et des HFC repose sur huit producteurs mondiaux : Ausimont USA Inc., DuPont, Elf Atochem North America Inc., Great Lakes Chemical Corp., Honeywell, I.C.I. Americas Inc., La Roche Chemicals Inc., et MDA Manufacturing Ltd qui est une joint venture entre Daikin America Inc. et 3M Corp. pour la production de HCFC 22 et d'hexafluoropropane pour utilisation captive dans la fabrication de fluoropolymères.

a) Les fluides CFC (11, 12, 113, 114, 115...)

Ce sont des dérivés chlorofluorés du méthane et de l'éthane chimiquement inertes, dont les atomes d'hydrogène sont, totalement ou non, remplacés par des atomes de chlore et de fluor. Ils sont utilisés à l'état pur ou en mélange azéotropique, ou encore pseudo-azéotropique.

Les chimistes emploient trois modes de notation différents pour nommer les divers CFC qu'ils fabriquent et utilisent. La première option consiste à les désigner par la lettre F (pour Fréon) suivie d'un nombre ABC où A = (nombre de C - 1), B = (nombre de H + 1) et C = nombre de F. Si A est égal à 0, il est omis dans la formule. La seconde option consiste à remplacer le F par la lettre R (de l'anglais *refrigerant*) suivi du chiffre caractéristique de leur composition atomique comme précédemment (exemples : R12, R134a). La troisième option est de les nommer complètement : CFC 12, CFC 134a.

Parmi les CFC les plus connus, figure le dichlorofluorométhane CCl_2F_2 ou CFC 12 ou F 12, plus connu du public sous la marque de ®"Fréon" et utilisé à la fois comme propulseur d'aérosol, réfrigérant, agent émulsifiant, solvant. Spécialisé dans les applications au voisinage de 0°C, il a été utilisé principalement pour la climatisation des locaux de travail, les pompes à chaleur industrielles, la réfrigération et le stockage des denrées fraîches.

Parmi les autres CFC très connus, figurent le CFC 11 ou F 11 ou trichlorofluorométhane CFCl_3 (propulseur d'aérosol, réfrigérant, agent émulsifiant, solvant, utilisé dans les machines centrifuges), le F 114 ou dichlorotétrafluoroéthane $\text{C}_2\text{F}_4\text{Cl}_2$ (gaz propulseur d'aérosols, gaz propulseur de mousse, fluide diélectrique), le F 113 ou trichlorotrifluoroéthane $\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$ (solvant de lavage à sec, extincteur de feu, réfrigérant, solvant de séchage, gaz propulseur de mousse), le F 115 (climatiseurs et réfrigération) et le F 502 (mélange de HCFC 22 et de CFC 115, cf. le § des HCFC ci-dessous). Ces molécules sont très stables grâce aux liaisons fortes C-Cl et C-F. Les CFC sont donc chimiquement inertes et présentent de très faibles risques d'inflammabilité et de toxicité. Ces propriétés les rendaient donc très attrayants pour les usages domestiques.

Les CFC assurent tous les niveaux de température des machines frigorifiques (y compris des réfrigérateurs ménagers) et des pompes à chaleur, utilisés entre autre comme gaz réfrigérant ou comme gaz propulseur dans les bombes aérosols. Ce dernier marché a été le plus important en Europe jusqu'à ce que le protocole de Montréal en 1987 (cf. chapitre 6) aboutisse à y interdire l'usage des différents CFC à court ou moyen terme, selon leurs caractéristiques : l'application aérosol qui pouvait être substituée facilement par des produits non fluorés (en général des mélanges butane/propane) a été la première à disparaître en Europe. Il ne reste plus que des applications marginales dans le domaine de la santé ou de la sécurité incendie.

Le CFC 113 connaît actuellement un certain succès car ils ne tombe pas sous le coup des interdictions environnementales (ni couche d'ozone ni effet de serre) étant détruit pendant le processus de fabrication.

Compte tenu des décisions du protocole de Montréal, l'industrie chimique a cherché des fluides de remplacement (ne contenant pas de chlore afin de préserver la couche d'ozone), ce qui a nécessité un délai d'étude et de développement d'une quinzaine d'années. Ces nouvelles substances sont des halogénés non chlorés, les hydrofluorocarbones (HFC), plus riches en fluor, et les hydrochlorofluorocarbones (HCFC) qui sont des fluides de transition moins agressifs, ces deux familles étant appelées parfois les hydrofluoroalcanes (HFA) ou FORANE, notamment en France.

b) Les fluides HCFC (22, 123, 124, 140, 141b, 142b, 225 etc.)

On a mis au point les hydrochlorofluorocarbones ou HCFC, qui sont un compromis avec l'hydrogène permettant de descendre la nocivité par rapport à l'ozone à 5 % de celle des CFC.

L'industrie chimique française occupe en bonne place dans ces innovations technologiques. Premier producteur mondial de substituts aux CFC, Elf Atochem a mis au point, au niveau du laboratoire et des pilotes, de nouveaux produits sans action sur l'ozone stratosphérique, destinés à achever la reconversion des différents marchés en conformité avec les réglementations établies dans le cadre du Protocole de Montréal.

Les substituts aux CFC actuellement les plus courants sont les HCFC 22, 123, 124, 141b, 142b et 225. Ils ont des agressivités sur l'ozone bien inférieures à celles des CFC 11, 12 et 113 qui auparavant comptaient pour 90 % de la consommation des CFC.

Le HCFC 141-b s'avère la substance de transition la plus adaptée comme agent d'expansion des mousses polyuréthane en remplacement du CFC 11 ou comme solvant dans les industries de pointe à la place du CFC 113 offrant le meilleur compromis entre l'économie, la sécurité et la préservation de l'environnement. Ce composé devra cependant être à son tour remplacé à moyen terme.

Le HCFC 123 est en train de remplacer le CFC 11, le HCFC 124 remplacera le CFC 114 et peut-être le CFC 12, et les HCFC 141b et 142b ont pratiquement remplacé la part de CFC 11 et 12 qui était utilisée pour la propulsion des mousses. Les perfluorocarbones HCFC 141b et 225, ainsi que des hydrofluoroéthers, ont remplacé certains CFC solvants.

Le chlorodifluorométhane CHClF_2 , ou HCFC 22 était autrefois utilisé comme propulseur d'aérosol et agent frigorigène (utilisé depuis des décennies dans les climatiseurs d'habitations, et dans les installations de congélation et de stockage des denrées surgelées de type industriel), ainsi que comme solvant de basse température. Il est aujourd'hui à la base du tétrafluoroéthylène, de l'hexafluoropropylène et du

bromotrifluorométhane. Il est, en outre, la matière première des résines fluorées, et donc pas concerné dans cette application par les interdictions touchant à la protection de l'ozone. En le mélangeant au R 115 on obtient le R502 utilisé couramment pour générer les basses températures telles la congélation et le stockage des surgelés et des crèmes glacées. Ce frigorigène est également utilisé dans les circuits des meubles « surgelés » des magasins types super et hyper marchés.

Le HCFC 22 et le HCFC 142b connaissent actuellement un certain succès car ils ne tombent pas sous le coup des interdictions environnementales étant détruits pendant le processus de fabrication.

Pour la grande masse des HCFC néanmoins, la réglementation effet de serre a programmé le bannissement à moyen terme, à commencer par le HCFC 141b qui entre en application le 1 janvier 2003.

c) Les fluides HFC (22, 125, 134a, 152, 227, etc.)

Parmi les HFC qui ont le vent en poupe car ils ne contiennent pas d'atome de chlore et n'ont donc pas d'action sur l'ozone, le HFC 134a ou R134a de formule CH_2FCF_3 figure en tête. C'est le principal substitut du CFC 12 dans les climatiseurs d'automobiles, on l'utilise comme frigorigène dans les nouveaux réfrigérateurs et congélateurs industriels, et comme propulseur dans les aérosols et dans les gonfleurs de pneus. Il présente des inconvénients mais de nombreux avantages, qui justifient sa vogue actuelle.

En effet l'emploi de ce fluide a soulevé quelques difficultés technologiques concernant la lubrification des compresseurs, le choix des vernis des moteurs électriques pour les machines hermétiques et la détection des fuites. De plus, le coefficient de performance des machines à R134a est inférieur à celui des machines à R12 de l'ordre de 15 à 20 % aux températures de la congélation. Enfin, bien qu'il soit inoffensif pour l'ozone, on dimensionne mal son impact possible sur l'effet de serre.

En revanche, les fabricants d'aérosols sont désormais tenus d'utiliser des propulseurs ayant une teneur maximum en composant organique volatile de 45 à 55 %. Or, le HFC 134a répond (avec le HFC 152a) à ces spécifications et le HFC 134a présente en outre l'avantage d'être ininflammable. Depuis le début 1999, les distributeurs de gonfleurs de pneus commencent à exiger que les matériaux soient ininflammables, ce qui a augmenté la demande pour le HFC 134a, et corrélativement son prix. Le HFC 134a et le HFC 227 sont en cours de test pour utilisation dans les aérosols pharmaceutiques également.

Le HFC 142b et le HFC 152a, le HCFC 142b connaissent actuellement un certain succès car ils ne tombent pas sous le coup des interdictions environnementales étant détruits pendant le processus de fabrication. Le HCF 32 connaît également un essor, utilisé avec le HFC 125 dans le nouveau réfrigérant R410a qui doit remplacer le HCFC 22.

Les HFC 23, 32, 125, 143a et 152a sont produits en petites quantités actuellement, pour

des usages domestiques très spécifiques. Des tests sont en cours sur des mélanges de HFC 134a et 227a pour les aérosols médicaux, sur le 245fa qui pourrait remplacer le HCFC 123, sur des mélanges de 245fa et de 356 qui pourraient remplacer le HCFC 141b. Le HFC 4310 est testé pour remplacer le CFC 113, les HCFC et les perfluorocarbones dans les fluides de séchage et dans les agents de nettoyage et rinçage, etc.

Les différents tests réalisés par Solvay Fluor et par Elf Atochem avec plusieurs utilisateurs européens ont montré que le HFC 365 mfc offrait un bon potentiel comme substitut également. Se présentant sous forme liquide comme le HCFC 141-b, le HFC 365 mfc s'avère techniquement efficace, notamment dans l'expansion des mousses polyuréthane comme dans les applications solvants tout en répondant aux objectifs économiques des clients finaux. Ces programmes de recherche et de développement, complémentaire des efforts menés par les laboratoires américains d'Elf Atochem sur le HFC 245 fa, doivent maintenant faire l'objet d'études complémentaires destinées à confirmer ces performances applicatives et à vérifier l'innocuité du composé au plan toxicologique comme à celui de l'impact sur l'environnement.

d) Les polymères fluorés thermostables : leur avenir considérable dans les usages autres que les fluides

Dans la fabrication des polymères fluorés on utilise le CFC 113, le HCFC 22 et le HCFC 142b (qui ne tombent dans ce cas pas sous le coup des interdictions environnementales -ni protocole de Montréal ni amendements du Clean Air Act de 1990- étant détruits pendant le processus de fabrication), ainsi que le HFC 152a.

Parmi ces polymères, le polytétrafluoroéthylène (C_2F_2)_n ou PTFE est le plus connu du public sous la marque ®"Téflon". C'est un polymère fluoré et non un CFC comme certains ouvrages l'écrivent. Il est fabriqué à partir de HCFC et est sans effet sur la couche d'ozone. Il est doué de propriétés remarquables (inflammabilité, insolubilité dans les solvants, stabilité à la chaleur, extrême résistance mécanique) qui lui permettent d'être employé dans la construction mécanique, dans la fabrication de matériel de chimie, dans l'industrie électrique, dans l'industrie aéronautique, dans le revêtement de certains ustensiles de cuisine (poêles de la marque ®"Tefal"). Il fait partie des produits qui constituent un débouché pour les HCFC dont l'usage comme fluide est banni à terme par le protocole de Montréal (ou plutôt les protocoles élaborés à la suite du protocole de Montréal : Londres, Copenhague etc.).

La grande stabilité de la liaison carbone-fluor, qui est l'un des éléments du succès commercial du polytétrafluoroéthylène, a justifié un grand nombre de recherches dans le domaine des polymères perfluorés. Des élastomères, dont la chaîne est constituée de motifs hétérocycliques séparés par des chaînons aliphatiques perfluorés, ont été décrits comme utilisables en service permanent à 250°C.

Le prix élevé des monomères, les difficultés de mise en œuvre et la faible dimension des récentes unités de production expliquent que les matériaux de grande résistance thermique soient de 50 à 200 fois plus chers que les polymères de grande diffusion. Cependant certains d'entre eux sont maintenant offerts à des prix qui permettent d'envisager des applications de plus grande diffusion. On peut distinguer plusieurs domaines d'application dans lesquels leur pénétration est désormais appréciable, et devrait encore se développer avec la diminution des prix de revient :

- l'électrotechnique : pour les applications de vernis d'émaillage des conducteurs électriques ;
- l'aviation et les engins : dans ce domaine, les polymères thermostables sont utilisés pour la réalisation de matériaux de structure. Ils permettent l'obtention de structures collées légères et fiables, et associés à des matériaux de renforcement, en particulier aux films à haut module, ils conduisent à des matériaux «compounds» à hautes performances ;
- l'électronique où ils trouvent des applications pour la réalisation de supports de circuits imprimés ou de circuits souples. Les adhésifs conducteurs ainsi fabriqués sont thermostables et servent à l'assemblage de circuits intégrés. Leurs propriétés isolantes sont recherchées pour le développement des circuits à haute intégration ;
- les techniques de séparation pour la réalisation de membranes et de diaphragmes résistants aux environnements agressifs et chauds ;
- le développement des énergies nouvelles, comme la géothermie et l'exploitation du pétrole profond, implique le développement de nouveaux matériaux isolants ;
- enfin, on ne saurait oublier que les matériaux thermostables possèdent des propriétés d'inflammabilité et c'est ainsi que les vêtements de protection des personnes susceptibles de se trouver prises dans les incendies brutaux sont conçus en fibres thermostables. Plus généralement, ces polymères, utilisés seuls ou combinés avec des matériaux de renforcement, conviennent à l'isolation du matériel appelé à fonctionner à haute température. Ils peuvent entrer dans la fabrication de moteurs électriques, de transformateurs, de pompes pour fluides chauds, de revêtement pour surfaces métalliques chauffées, à moins qu'ils ne servent eux-mêmes de «carter» de protection.

Signe du dynamisme de ces recherches, début 1999, la Daikin America Inc., filiale de la Daikin Industries du Japon, a lancé un programme trisannuel de 130 M\$ pour renforcer ses activités en chimie du fluor, tandis que la Allied Signal Inc. a soumis au visa des autorités environnementales US un nouveau produit, le HFC 245fa, en substitut de son équivalent le HCFC 141b pour la fabrication des mousses en polyuréthane et en polyisocyanurate rigides.

e) Les résines fluorées et leur avenir

Les résines fluorées et globalement tous les produits plastiques et mousses semblent avoir un bel avenir dans la mesure où malgré la présence de CFC parmi les matières

premières qui sont à la base de leur fabrication, la teneur en CFC est très faible et donc autorisée.

Début 2000, les sociétés DuPont et Fluor Daniel, une filiale de la Fluor Corporation, ont formé une alliance pour construire les premières usines industrielles destinées à la fabrication de résines d'emballage en polyester basées sur la technologie de pointe de DuPont dénommée technologie NG-3, première technologie d'un procédé de polymérisation mise au point pour les résines d'emballage.

Le CEFIC (*European Chemical Industry Council* ou Conseil Européen des Fédérations de l'Industrie Chimique) qui est l'association des producteurs européens de chimie (cf. ann. 2) travaille activement à définir la toxicité réelle des divers produits de substitution mis au point afin de définir, avec les autorités, des solutions qui répondent à la fois aux besoins du marché et aux impératifs de sécurité.

2.1.3. Autres utilisations dérivées de l'acide fluorhydrique

a) Les carburants à haut indice d'octane (propergols) et l'alkylation

Autre débouché important de la chimie organique de l'acide fluorhydrique, l'alkylation est une réaction d'importance industrielle pour la production de carburants à haut indice d'octane. C'est l'une des rares réactions *non radicalaires* des alcanes, qui se produit en catalyse fortement acide (acide sulfurique, acide fluorhydrique anhydre) suivant une réaction en chaîne *ionique*. La combustion des alcanes à l'air est une réaction fortement exothermique qui est abondamment exploitée pour la production de chaleur (chauffage industriel et domestique) et d'énergie mécanique (moteurs à combustion interne, réacteurs). Le fluor réagit violemment avec les alcanes en libérant du carbone et du fluorure d'hydrogène HF.

Ses dérivés sont donc employés dans la fabrication des carburants pour fusée où le fluor réagit comme oxydant avec l'hydrogène, et globalement dans les propergols utilisés pour la propulsion aéronautique. Les problèmes de corrosion en limitent toutefois l'emploi.

b) La chimie des solvants de sécurité

Les solvants fluorés sont utilisés pour le nettoyage des circuits électroniques à cause de leur résistance à des températures élevées qui grâce au fluor est très supérieure à celle des solvants classiques.

2.1.4. Le fluor, la pharmacie et la santé publique

Les vertus du fluor dans la prophylaxie des caries dentaires ont été découvertes par hasard en 1920 au Colorado, où les eaux sont naturellement fluorées.

Aujourd'hui, le fluor entre dans la composition de nombreux dentifrices, à l'état de fluorure de sodium FNa qui est très soluble. C'est aussi un composant de certains liquides pour bains de bouche.

Le fluorure de sodium FNa est utilisé pour la fluoruration de l'eau potable dans les villes de certains pays (USA), et pour celle du sel de cuisine.

Il est également à la base d'une importante industrie pharmaceutique. Par exemple, il est employé dans le traitement de l'ostéoporose, en association avec du calcium et de la vitamine D. Dans les années 1980, les laboratoires pharmaceutiques et l'université ont par ailleurs travaillé avec Pechiney à la mise au point d'un véritable plasma artificiel, composé fluorocarboné appelé "fluosol" capable de véhiculer l'oxygène dans le sang et de se substituer aux globules rouges pour l'oxygénation des organes.

Enfin, des CFC sont encore employés comme gaz propulseurs dans les aérosols destinés au traitement de l'asthme et des allergies. Le Protocole de Montréal prévoit en effet l'octroi de dérogations annuelles pour un certain nombre d'applications essentielles, en vertu desquelles les entreprises sont en droit de demander qu'on leur fournisse des CFC pour la fabrication d'aérosols-doseurs. Les aérosols-doseurs sont des produits utilisant un gaz aérosol propulseur pour délivrer, par voie inhalée, un médicament nécessaire aux patients souffrant d'affections respiratoires, comme les asthmatiques par exemple.

Les sociétés pharmaceutiques sont en train d'opérer néanmoins les mutations nécessaires. C'est ainsi que, par exemple, Rhône-Poulenc Rorer estime que les réserves en CFC dont la société dispose en Europe seront suffisantes pour lui permettre de substituer aux aérosols contenant des CFC des produits utilisant d'autres agents propulseurs exempts de CFC et dotés, de ce fait, d'un potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (PACO) significativement réduit. Cette société a déposé, auprès des autorités de l'Union Européenne, des demandes d'enregistrement des formules exemptes de CFC pour ses produits destinés au traitement de l'asthme: Intal® 5 mg (Lomudal® 5 mg) et Tilade®. Une demande d'enregistrement pour Aarane® est en cours d'examen en Allemagne, et la forme sans CFC d'Intal/Lomudal a déjà été autorisée dans certains pays de l'Union Européenne.

2.2. LA FLUORINE EMPLOYÉE COMME FONDANT

Les caractéristiques recherchées dans la fluorine pour l'emploi comme fondant sont les teneurs en CaF_2 (comprises entre 85 et 93 %) et en SiO_2 (15 % maximum) car la silice diminue l'efficacité de la fluorine dans le bain d'affinage de l'acier. La granulométrie peut être de 5 à 60 mm. On a développé la fabrication d'agglomérés (boulets ou pellets) à partir de fines et surtout de concentrés de flottation (teneur en silice, teneur en impuretés).

Lorsque les cours de la fluorine ont grimpé dans les années 1970, l'utilisation de produits de substitution moins coûteux que le spath a également été tentée mais ils n'ont pas la même efficacité et contiennent souvent des éléments acides (SiO_2 , Al_2O_3 , colemanite) qui nuisent à la désulfuration.

2.2.1. Fondant en sidérurgie (surtout pour la désulfuration)

Historiquement, les propriétés de fondant de la fluorine étaient déjà connues des métallurgistes du 16^e siècle et peut-être bien avant. A la fin du 19^e siècle, l'invention des procédés Bessemer puis Siemens-Martin en sidérurgie a multiplié la consommation de fluorine. Dans ces procédés, la fluorine est employée directement à l'état brut, par addition au laitier de fusion. Le spath fluor rend la scorie plus fluide et facilite l'élimination des impuretés (soufre, phosphore, silice, etc.) qui se concentrent dans le laitier. A partir des années 1960 la généralisation des techniques de fabrication de l'acier à oxygène et des procédés électrolytiques a accru la consommation de spath par tonne d'acier jusqu'à ce qu'un contrôle plus strict des opérations d'affinage permette de réduire de 6 à 2 kg/t et même moins la consommation unitaire.

Aujourd'hui l'emploi de la fluorine concerne les domaines suivants :

- fluidification des laitiers d'aciérie au four électrique et convertisseur, et affinage en poche ;
- composant de formulations :
 - . d'auxiliaires de désulfuration des aciers spéciaux ;
 - . d'auxiliaires pour la coulée continue ou traditionnelle ;
 - . de laitiers spéciaux pour la refusion d'acier.

Son emploi dans le procédé à four électrique basique, dans le traitement final, reste important mais il s'est très spécialisé, et concerne principalement la fabrication des aciers spéciaux. En revanche, elle est rarement utilisée directement pour les fontes ou en fonderie. Son usage en début de la chaîne sidérurgique (pour l'élaboration du laitier) a presque disparu. On l'utilise comme fondant de la chaux pour éliminer le soufre, ce qui nécessite la sélection de spath de haute qualité. Il semble qu'elle ne continue à être utilisée de façon importante qu'en Russie et probablement en Chine.

Par ailleurs, elle est utilisée pour la récupération et l'affinage de métaux non ferreux, laitons, métaux précieux, et dans les procédés de décantation des crasses d'aluminium de deuxième fusion, etc.

2.2.2. Fondant en soudure : baguettes et flux

En soudure aussi, on trouve une application des propriétés de fondant du minéral. La fluorine est un composant majeur dans les enrobages d'électrodes, les fils fourrés et les flux en soudure basique. L'adjonction de fluorine aide à éliminer les impuretés vers le laitier et à la protection du cordon.

Enfin, l'utilisation pour la fabrication de certains ferro-alliages est accessoire.

2.2.3. Fondant dans l'industrie du verre et des céramiques

Les caractéristiques recherchées pour ces débouchés concernent les teneurs en CaF_2 (comprises entre 90 et 98 %), en SiO_2 (3 % maximum) et en oxydes métalliques (qui doivent être très faibles). Ces teneurs caractérisent la qualité spath céramique (ceramic grade) qui se livre en poudre à une granulométrie inférieure à 200 mesh.

a) Verre, opale, flacons, émail

Dans l'industrie du verre et dans celle de l'émail la fluorine agit comme fondant, fluidifiant et affinant. Ce débouché est néanmoins de plus en plus limité aujourd'hui, à cause des impacts environnementaux par suite de la transformation du fluor dégagé en acide fluorhydrique. On utilise ce procédé pour la fabrication du verre plat et il est limité pour la fabrication des bouteilles.

On utilise aussi la propriété d'opacifiant pour l'émaillage et la vitrification. On utilise le pouvoir opacifiant de la fluorine pour la fabrication des produits que l'on désigne dans le commerce sous le nom d'opalines.

Ainsi, la fluorine entre dans la composition des pâtes de verre Lalique dans une proportion de 3 à 10 %. La fluorine entre comme opacifiant pour 3 % dans la composition du verre façon silex (*flint glass*) et du verre blanc, pour 10 à 20 % dans l'opaline (récipients et flacons pour contenir des aliments, des médicaments et des produits de toilette), et pour 3 à 10 % dans les émaux (fourneaux, réfrigérateurs, baignoires, cuvettes de W.C., plats à four).

b) Fibre de verre

On retrouve aussi un peu de spath fluor dans certaines formulations de fibre de verre (fibres de verre pour renforcement ou isolation).

2.2.4. Fondant pour le ciment

La fluorine est utilisée parfois comme fondant pour le ciment notamment dans l'industrie du ciment blanc Portland où elle intervient comme fondant incolore et dans l'industrie du ciment gris comme adjuvant de cuisson. Des scories légèrement fluorées ont été aussi parfois utilisées dans le même but (exemple des scories de l'usine Pechiney d'Epierre (Maurienne) utilisées par Vicat il y a quelques années en Rhône-Alpes).

Cette application est actuellement en régression. C'est notamment en raison de l'instabilité que ce fondant peut provoquer dans les phases cristallines incluses dans le clinker, et de la difficulté à le doser. Les cimentiers disposent aujourd'hui de nombreuses autres méthodes, plus physiques, pour améliorer les échanges dans le procédé.

2.3. DIVERS

La liste des utilisations secondaires de la fluorine ou du fluor s'est accrue ces dernières années. Outre leur emploi dans certains herbicides et enduits pour la conservation du bois, on mentionnera quelques utilisations relativement plus importantes économiquement :

2.3.1. La fluorine en optique : lentilles et fibres optiques

La fluorine est employée en optique en raison de sa transparence, sa faible dispersion chromatique, l'extrême faiblesse de son indice de réfraction et la constance de celui-ci pour les différentes longueurs d'ondes, et son haut pouvoir de transmission de la lumière infrarouge et ultraviolette. En outre, la plupart de ces propriétés permettent en photographie la formation d'une image de très haut rendement, lumineuse et piquée, sans commune mesure avec celle des verres classiques.

Les macrocristaux naturels utilisables pour ces applications étant extrêmement rares, on leur a substitué des macrocristaux synthétiques. En France, la faisabilité de ce procédé a été réalisée dans les années 1980, où la Société pour la Réalisation et l'Etude de Monocristaux (SOREM) a exploité dans ce but un gisement de fluorine très pure au Col du Pourtalet (Pyrénées). Dans son usine de Pau, elle obtenait par recristallisation une fluorine épurée dénommée Anapol, au diamètre maximum de 140 mm, et une fluorine de qualité standard au diamètre maximum de 200 mm. Aux USA, on a mis au point à la même période une méthode pour fabriquer des morceaux de plus grande taille.

La fluorine synthétique est utilisée couramment en microscopie pour la fluorescence ultraviolette. La fluorine est beaucoup utilisée dans les objectifs dits apochromats où les aberrations chromatiques sont particulièrement bien corrigées, par exemple dans les

instruments optiques spatiaux et en astronomie. Le spectrographe Astragal, calculé par le Centre de Recherches et de Calculs Optiques (CERCO) est installé au foyer Cassegrain du télescope de deux mètres de l'observatoire du Midi.

Outre la fabrication des lentilles, cette industrie se décline aussi par la fabrication de prismes, réseaux et nacelles.

Parmi les produits dérivés de la chimie du fluor, on utilise en optique des fluorures métalliques comme le fluorure de magnésium. Déposés en film mince sur les lentilles d'appareillages optiques, ils diminuent l'intensité de la lumière réfléchie et augmentent donc la luminosité.

Enfin, divers fluorures (principalement de strontium, de lithium et accessoirement de calcium) entrent dans la fabrication des fibres optiques et ce débouché est assez important économiquement.

2.3.2. L'industrie des abrasifs doux

Classée de dureté 4 sur l'échelle de Mohs, la fluorine pourrait être utilisée comme abrasif doux. On lui préfère souvent le calcaire qui est de prix bien inférieur et qui possède déjà une dureté de 3,5 suffisante.

2.3.3. Les supraconducteurs

Le fluor est désormais utilisé dans les procédés de fabrication des supraconducteurs ioniques (conducteurs anioniques). Cette industrie a pris essor depuis 1978 avec la recherche d'électrolytes de plus en plus performants pour le stockage d'énergie et avec la microionique ou utilisation des techniques de la microélectronique pour la miniaturisation de dispositifs électrochimiques de stockage (capteurs, piles, supercondensateurs ou afficheurs).

2.3.4. La poterie

Le spath entre dans le procédé de fabrication de certaines poteries et de pots de fleurs, mettant notamment à profit ses propriétés de fondant (cf. verre, émail).

3. Géologie : types de gisements

Les gisements de fluorine sont largement distribués dans le monde dans des environnements géologiques très variés tels que roches sédimentaires, métamorphiques ou ignées.

La fluorine se présente soit seule soit le plus souvent associée à d'autres minéraux tels que : barytine, quartz, carbonates, galène, blende, pyrite, qui doivent être séparés après l'extraction pour enrichissement en spath fluor.

Les spécialistes ont établi deux classifications différentes pour distinguer les types de gisements et affiner leurs guides de prospection : une classification génétique définie dans les années 1970, et une classification morphologique définie dans les années 1980.

La classification génétique distingue les gisements en fonction de leurs relations ou non avec le magmatisme (d'où deux grands types), puis avec les types de magmatisme mis en cause (ce qui permet de distinguer autant de sous-types).

Ainsi, dans ces derniers, un premier sous-type "génétiquement lié aux granitoïdes" a été défini. Il regroupe certaines concentrations de fluorine présentes dans des gisements de béryllium, étain, tungstène en association avec d'autres minéraux fluorés ou borés (apatite, tourmaline, topaze) jusqu'à représenter 10 à 30 % du remplissage (skarn à scheelite de Kramat Pulai en Malaisie, skarn à béryllium de Iron Mountains au Nouveau Mexique, pipes stannifères de Malaisie, filons stannifères du Bushveld, gisement Be-Sn de Lost River en Alaska).

Un second sous-type regroupe les gîtes "associés spatialement aux plutons granitiques" mais encaissés dans des séries sédimentaires, comme ceux de Ban-Hong et Doi-Tao en Thaïlande, et ceux du Transvaal Central (Bushveld) en Afrique du Sud.

Un troisième sous-type rassemble plusieurs districts liés au volcanisme acide post-orogénique (Mexique, Ouest américain).

Un dernier grand sous-type regroupe des gîtes de remplacement et des filons liés aux complexes subvolcaniques alcalins à carbonatites. Les tonnages tout-venant se comptent souvent en Mt mais les teneurs sont en général faibles si bien que les gisements exploités sont encore rares (Amba-Dongar dans l'état indien de Gujarat ; Okorusu en Namibie qui a fini par être mis en exploitation au début des années 1990 et qui contient de l'ordre de 7 à 10 Mt de minerai à plus de 35 % CaF_2 , 15 % de quartz, jusqu'à 10 % d'apatite et un peu de thorium).

En raison du caractère assez souvent hypothétique des relations entre fluorine et roches magmatiques, et des évidences que l'on constate dans certaines provinces

métallogéniques, de facteurs métallogéniques multiples et de remobilisations polyphasées de la minéralisation à diverses époques géologiques, cette classification génétique ne sera mentionnée ici que pour mémoire.

La classification morphologique, elle, s'efforce d'affiner les guides de prospection des gisements sur des critères de forme et d'environnement géologique sans vraiment se préoccuper de l'origine des fluides ayant procédé aux dépôts de la fluorine, qui est souvent controversée. Les principales exploitations mondiales peuvent être alors rattachées à deux grands types morphologiques :

- des gîtes stratiformes de couvertures sédimentaires ;
- des gîtes filoniens à remplissage hydrothermal.

3.1. LES GITES STRATIFORMES OU CLASSES COMME TELS, DANS DES ROCHES SEDIMENTAIRES

On connaît des exemples de dépôts de fluorine indiscutablement sédimentaire en milieu marin bordier ou lagunaire : cas de calcaires d'Ukraine où des lits de petits cristaux mauves sont concordants dans la stratification sur plusieurs kilomètres carrés. Sous la ville de Paris des petits cubes de fluorine jaune ont également été trouvés dans les calcaires grossiers du Lutétien.

Mais, en ce qui concerne les grands gisements, la question reste souvent posée d'une origine sédimentaire ou "per ascensum" à partir de fractures ou encore d'une origine volcano-sédimentaire des fluides. On regroupe néanmoins dans la catégorie des gîtes stratiformes tous les gîtes qui sont localisés dans un niveau sédimentaire particulier, même si, dans le détail, les corps minéralisés ne sont pas nécessairement parallèles à la stratification comme sont les "mantos" ("concordants" comme disent les spécialistes) mais parfois au contraire discordants, sécants sur la stratification, en remplissage de karsts ou même en présentations filoniennes à l'intérieur de la couche stratigraphique particulière porteuse. Pour cette raison, les spécialistes préfèrent au terme "stratiforme" qui signifie littéralement "en forme de strate", celui de "lié-aux-strates" qui est la traduction littérale de l'anglais "stratabound" et qui est plus conforme à la diversité des présentations qu'on observe sur le terrain.

3.1.1. La typologie des gîtes stratiformes ou MVT

Les géologues américains ont créé le terme de *Mississippi Valley Type deposit* (MVT) pour désigner ce type de gisement, en raison de leur abondance dans le centre des USA, avec les gisements du Sud-Est de l'Illinois et de l'Ouest du Kentucky (10 Mt CaF₂) situés dans le Carbonifère (Mississipien). Les spécialistes remarquent que ces gisements se situent dans un contexte de bassin intracratonique voire de rift, en bordure des zones de plate-forme stable ou épi-orogénique. Ils sont encaissés souvent par des dolomies, et

dans des contextes particuliers (récifs, bordures de diapir, karst) à proximité de surfaces d'érosion ou au voisinage de zones d'instabilité sédimentaire, marquées par des limites de faciès. La minéralogie est en général simple : fluorine, barytine, calcite, dolomite, quartz, blende souvent collomorphe, galène, pyrite, marcassite, et parfois chalcoppyrite, célestite, anhydrite, kaolinite, dickite.

Le Mexique, deuxième producteur mondial de fluorine, tire la plus grosse partie de sa production de concentrations dans des roches sédimentaires : calcaires " comanchiens " du Crétacé moyen (Albien). Les gisements les plus importants sont localisés dans les états de Coahuila et de San Luis Potosi. Les couches continues ("mantos") constituant des guides stratigraphiques remarquablement constants atteignent trois à cinq mètres de puissance avec des teneurs élevées, de 60 à 70 % de CaF_2 , tandis que les sulfures et la barytine sont pratiquement absents.

La province à gîtes de fluorine stratiformes du Transvaal (Afrique du Sud) comporte à Marico (région de Zeerust) les plus anciennes concentrations de fluorine connues sur Terre. Les corps minéralisés datés entre 2 et 2,3 milliards d'années (Précambrien) affectent des dolomies qui ont subi une émergence et une karstification. Les réserves de ce district qui est l'un des plus importants du monde sont de 100 à 150 Mt à 15 % CaF_2 avec 85 % des réserves de fluorine encaissés dans des édifices algaïres.

3.1.2. La fragilité des classifications trop rigides

Le district de Marico comporte un intéressant exemple de permanence, héritage et transformisme en métallogénie, qui souligne la fragilité des classifications géologiques trop rigides. En effet, une partie de cette province est recoupée par le complexe du Bushveld et l'ensemble (roches ignées du complexe et roches sédimentaires d'âge post-complexe) est recoupé par une série de gisements d'étain et une série d'autres minéralisations en fluorine, qui montrent que celle-ci s'est mise en place à plusieurs époques géologiques dans cette province, dans des présentations typologiques différentes, tantôt stratiformes, tantôt filoniennes, tantôt en stockwerks. On remarque en particulier des gisements de fluorine étroitement contrôlés par des pipes et des failles de la phase acide du complexe du Bushveld et dans le granite du Bushveld lui-même, en association avec des gisements d'étain. Celui de la Buffalo Mine près de Naboomspruit est un des plus importants du monde avec plusieurs dizaines de Mt de ressources.

Dans un contexte tout aussi particulier mais différent (volcano-sédimentaire) les concentrations en fluorine de Panciano au nord de Rome, dans le Latium (Italie), sont d'un type où la fluorine, très finement grenue, imprègne des diatomites déposées dans des lacs de volcans alcalins. Les réserves sont de l'ordre de plusieurs millions de tonnes à faible teneur ; le principal gisement contiendrait 8 Mt à une teneur de 25 à 55 % CaF_2 . Son minerai a la particularité d'être un des rares au monde à convenir à l'utilisation du spath fluor dans l'industrie des ciments.

En Tunisie, le gisement de Hammam Zriba, et en Grande-Bretagne ceux des Pennines sont également des modèles de la diversité du type stratiforme. Les études récentes sur le gisement de Zriba, qui constitue une couche subhorizontale de quelques mètres de

puissance datée du Santonien et encaissée entre des calcaires du Portlandien et des calcaires crayeux du Campanien, ont souligné que la couche de fluorine est contrôlée par cette importante discordance stratigraphique mais aussi par le passage d'un contact anormal chevauchant d'importance régionale, dans le plan de discordance, et que le rôle du diapirisme et de la tectonique tangentielle alpine dans la formation du gisement est très important. Autre exemple de cette diversité de présentations, les gisements des Pennines se présentent en lentilles d'allure filonienne dans les calcaires du Carbonifère plissé.

3.1.3. Genèse des minéralisations

Pour expliquer la formation d'un gisement stratiforme, la plupart des spécialistes font appel à des modèles de géologie pétrolière faisant circuler des saumures sur de longues distances à des vitesses de 1 à 10 cm/an suivant une plomberie hydrothermale gigantesque qui permet des échanges entre précipitations, fluides géothermiques riches en H₂S s'il y en a, nappes contenues à divers niveaux du bassin sédimentaire, eaux de déshydratation et de compaction des sédiments, et composants chimiques de ces sédiments notamment leur matière organique et leurs sulfures de fer diagenétiques. Les gradients de pression ou de température et la tectonique des plaques interviennent comme métallotectes supplémentaires. Certains spécialistes privilégient un modèle exhalatif syngénétique notamment pour les mantos d'Amérique centrale situés au voisinage d'intrusions volcaniques. La morphologie des cavités de dissolution reste cependant identique (Jébrak, 1997).

3.1.4. Exemples français

En France, à proximité du socle hercynien du Morvan, la fluorine imprègne des arkoses et grès triasiques ou des calcaires liasiques. Sept gisements potentiels ont été recensés dont cinq ont été démontrés : Pierre-Perthuis, Pontaubert, Marigny-sur-Yonne, Courcelles-Fré moy et Antully-Marquisat. Aucun n'a encore été exploité si ce n'est quelques milliers de tonnes sorties par scheidage à Marigny vers 1930 et en 1961 et lors des travaux de certification à Marquisat en 1978. Dans le Morvan aussi, le gisement d'Argentolle (Saône-et-Loire) a montré une curieuse association de poches d'allure karstique et d'un corps d'allure plus proprement filonienne, dans des carbonates du Trias.

Dans l'Estérel, un peu de fluorine est associée à l'uranium dans les indices stratiformes de Castelly, encaissés dans des calcaires lacustres au sein du Permien volcano-sédimentaire.

Dans les chaînes subalpines, le petit indice de sulfures d'arsenic de Lucéram (Alpes-Maritimes) encaissé comme Hammam Zriba entre calcaires jurassiques et marnocalcaires (et grès) crétaqués, renferme de petites concentrations de fluorine et barytine (non économiques) que les spécialistes considèrent du même type qu'en Tunisie. Le rôle de la tectonique tangentielle alpine y est tout aussi essentiel et évident qu'à Zriba, malgré le contrôle stratigraphique et le piège par des hauts-fonds qui sont indéniables.

3.2. LES GITES FILONIENS

Les gîtes filoniens sont les plus répandus et les plus importants, et ont assuré, jusqu'à aujourd'hui plus de 50 % de la production mondiale.

3.2.1. La typologie des gîtes filoniens

On les rencontre soit dans les socles anciens ("filons de socle"), soit dans les séries de couverture, souvent en relation spatiale avec les grandes fractures du type rift ou linéament. La géométrie des corps minéralisés est en général simple (filons uniques ou groupés en champ mais assimilables à de véritables fentes d'extension comme en France, pour aller du plus petit au plus grand exemple, les fentes alpines du Mont Blanc ou le champ filonien de Fontsanter, Var). Elle est parfois complexe (filons ramifiés, souvent sur des directions conjuguées). Les gisements sont en général subverticaux, connus sur des allongements de 100 à 1000 m et des hauteurs de 100 à 400 m en moyenne, avec des colonnes verticales et des serrées. Les exceptions existent avec des hauteurs dépassant 2 km (Jebel Aouam au Maroc). La puissance dépend souvent des variations de compétence de l'encaissant. L'altération des épontes est en général limitée à un peu de mica blanc (interstratifiés illite/smectite, muscovite, séricite), kaolinisation, silicification, et une zonalité des carbonates s'il y en a (de plus en plus ferrifères en allant vers la minéralisation).

Les spécialistes remarquent que les filons apparaissent en général dans les zones externes des orogènes (exemple français : massifs cristallins externes des Alpes) en contexte peu métamorphique (si l'on s'en tient au métamorphisme alpin pour cet exemple), ou dans des zones stables correspondant à d'anciens orogènes situés en bordure de mers épicontinentales (exemple du Massif central français).

3.2.2. Filons en extension et filons en cisaillement

Depuis les travaux en France et au Maroc de M. Jébrak et J. Lhégu (BRGM) et J.Cl. Touray (université d'Orléans), on distingue les filons en extension et les filons associés à de grandes zones cisailantes. Les filons en extension affectent les socles anciens réajustés au moment de la formation des bassins sédimentaires (de rifts ou de plate-forme). Ils remplissent généralement des accidents cisailants anciens, marqués par des bassins sur décrochement, ou des structures adjacentes, qui ont re-fonctionné en faille normale ou en fente de tension (d'extension) pendant la subsidence du bassin ou du rift. Dans ces filons, le dépôt est centripète, souvent rubané, avec de fréquentes géodes centrales. Vers la racine de ces filons, on rencontre parfois des brèches d'effondrement intrafilonien constituées de blocs plus ou moins arrondis dans un ciment minéralisé.

Comme exemples de filons en extension, citons en France les gisements de Pic-Martin et Fonsante (Maures-Estérel, Var) et celui du Rossignol (Chaillac, Indre). Comme exemples de filons en cisaillement citons en France les gisements de Montroc, du Burc et du Moulinal (Albigeois, Tarn), et ailleurs dans le monde les gisements d'El Hammam (Maroc) et de Saint-Lawrence (Terre Neuve).

3.2.3. Genèse, géométrie et zonalités minérales

En France, on a établi que les gisements en extension sont en général étroitement contrôlés par la proximité de paléosurfaces continentales, notamment la paléosurface qui marque le contact entre le socle paléozoïque et sa couverture sédimentaire mésozoïque, qui est anté-triasique ou anté-liasique selon les points. Des liens avec les paléosurfaces anté-carbonifère et anté-permienne ont également été remarqués, les spécialistes ayant constaté que dans plusieurs districts les filons fluorés sont étroitement contrôlés par la proximité des grands sillons houillers. Le rôle essentiel des distensions tardi-orogéniques en contexte de rift intra-continental a été souligné dans l'ouverture des vides, que ce soit dans l'Estérel où il existe une telle phase à la fin du Permien, ou dans le Massif central où le rôle de la distension triasico-liasique connexe de l'ouverture de la Thétys a été déterminant.

Les gisements de l'un et l'autre type (extension et cisaillement) se sont formés dans des fractures subverticales sous pression hydrostatique, encaissés dans des roches soumises à une pression lithostatique. Les dépôts fluorés résulteraient du lessivage du continent et de circulations géothermiques de saumures, per-descensum ou per-ascensum, le long des drains constitués par les failles du rift et les contacts lithostratigraphiques. Dans un filon, le gradient de fluide induit pourrait avoir fonctionné pendant 1 000 à 100 000 ans et s'étendre sur un kilomètre. La précipitation des fluides serait due au mélange de fluide hydrothermal avec le fluide issu de l'encaissant. Les gisements se sont formés à partir de fluides de salinité variable à des températures de dépôt de l'ordre de 250 à 325°C.

Au plan minéralogique, les zonalités verticales sont parfois marquées par l'abondance relative de la barytine dans les zones hautes des filons et de la silice dans les racines. Le remplissage est en général toujours le même quel que soit le contexte géologique, la fluorine se rencontrant soit seule, soit le plus souvent associée aux BGPC (Blende, Galène, Pyrite, Chalcopyrite), à la barytine et aux carbonates (calcite, sidérite, parfois dolomite). Très souvent, le remplissage est purement fluoré, ou à fluorine, barytine, quartz. Les sulfures sont souvent en proportion faible ou quasi nulle. Aux côtés des BGPC, on note comme sulfures accessoires le mispickel ou arsénopyrite, la série pyrargyrite-proustite, des sulfoantimoniures de cuivre et/ou de plomb. Parfois des matières organiques en agrégats millimétriques sont intimement associées au remplissage filonien axial (Fonsante, Var). Exceptionnellement on a observé, en profondeur dans un filon, le passage d'un remplissage entièrement constitué de fluorine à un remplissage presque entièrement constitué de sellaïte MgF_2 (Fonsante) jusqu'à constituer un tonnage de l'ordre de 100 kt tout-venant et davantage. A Fonsante, la

sellaïte a représenté environ 6 % sur le Mt de tout-venant extrait dans la phase principale d'exploitation.

Les principaux gîtes de Chine (Yinkuangchong, Zhaishan, Jianshan, Yucun), ou du district de l'Illinois, situés dans une aire anticlinale faillée, sont des filons hydrothermaux.

4. Exploration, production, traitement et commercialisation de la fluorine

4.1. EXPLORATION MINIERE

La prospection de la fluorine se pratique comme celle des métaux de base qui (souvent) l'accompagnent. Au stade stratégique, on procède d'abord par la recherche des zones structurellement favorables. Pour les gîtes filoniens, on centre la recherche sur les socles en bordure de rifts continentaux ou sous couverture transgressive de mer épicontinentale, en essayant de repérer les zones cisailantes ou en extension. On a recours aux études de télédétection, et aux études structurales. On a utilement recours à l'étude photogéologique pour repérer les filons en extension sur les socles relativement dénudés (exemple de ce qui s'est fait en Provence cristalline). Pour les gîtes stratiformes ou classés comme tels, on a aussi recours aux reconstitutions paléogéographiques en utilisant tous les outils et la méthodologie de la géologie de bassin. On recherche dans les couvertures de contexte *Mississippi Valley Type* des zones d'activité tectonique synsédimentaire, discordances, zones de haut fond, d'émersion, récifs, paléokarsts, et la proximité de zones diapiriques.

Au stade tactique, pour repérer les gîtes n'affleurant pas ou peu, la méthode classique est la prospection géochimique multiélémentaire sur sédiments de ruisseaux. On a expérimenté avec succès la prospection hydrogéochimique du fluor (BRGM, 1975). Mais sa mise en œuvre plus lourde et les contaminations dans les zones où des filons ont déjà été exploités rendent ces tests rares et peu suivis. La géophysique peut être un appui indirect, pour localiser les fractures. Parmi les guides indirects, on a tenté d'utiliser la thermoluminescence des quartz filoniens pour dresser une typologie des filons connus et, par suite, repérer plus facilement ceux qui sont susceptibles de contenir de la fluorine et d'autres associations minérales, mais cette méthode reste encore peu probante.

Au stade de la démonstration de gisement, le sondage carotté est préféré au sondage percutant dans la mesure où il permet un échantillonnage plus précis et plus représentatif de la qualité (teneur en CaF_2 , teneur en silice, teneur en impuretés) qui déterminera les utilisations possibles du minerai. Pour les filons minces, la reconnaissance par sondages atteint rapidement ses limites dans la mesure où la disposition très fréquente du minerai en colonnes, avec des alternances de ventres et de serrées, fait qu'au lieu de resserrer la maille (option coûteuse qui ne garantit guère plus le tonnage dans les géométries de ce cas) on est en général obligé de finir la reconnaissance par un traçage avant de considérer qu'un panneau est vraiment exploitable.

4.2. EXPLOITATION MINIÈRE ET TRAITEMENT

Les méthodes d'exploitation et de traitement de la fluorine sont contrastées d'un pays à l'autre, et à l'intérieur d'un même pays.

En effet, l'extraction du spath métallurgique, au niveau mine, dans un filon vertical de un à quatre mètres de puissance où la fluorine est à haute teneur (cas général des filons français), se pratique aujourd'hui avec presque les mêmes méthodes qu'il y a cent ans, par la méthode des sous-niveaux ou défilage par chambres et piliers, chambres pleines ou chambres magasins avec soutirage. Seule innovation de ces dernières décennies, la méthode des chambres remblayées (Langeac) pour les filons à épontes de mauvaise tenue ou peu pentés. La mécanisation de l'extraction dans ces exploitations est inexistante ou minime si les filons sont minces, elle est plus développée dans les filons épais, avec introduction de pelleteuses au fond par des descenderies (exemple : Le Burg). Au niveau traitement, ces types de filons ne nécessitent souvent, en laverie, qu'un tri à la main sur bande transporteuse (pour peu que le coût de la main d'œuvre s'y prête) puisque le minerai est commercialisé en granulométrie grossière ; le minerai passe ensuite par les phases de concassage, débouillage par des procédés classiques de lavage, broyage et calibrage. Pour les filons où le minerai est moins pur ou lorsque le coût de la main d'œuvre ne permet pas un tri à la main, le minerai passe après concassage et criblage (suivi éventuellement d'un cyclonage) en atelier de concentration gravimétrique. Les méthodes gravimétriques classiques sont les milieux denses, les jigs, les tables à secousses qui permettent d'éliminer notamment calcite, sidérite, quartz. La méthode de concentration par milieu dense ou *heavy medium* a été la grande innovation des dernières décennies à ce niveau. Le traitement s'effectue soit en cyclone soit en tambour. Les produits ainsi obtenus peuvent être directement marchands, mais parfois ils ne sont qu'une phase de premier tri pour diminuer le volume de tout-venant à l'entrée de l'atelier de flottation afin de ne pas l'engorger.

L'extraction du spath chimique, qui s'est développée avec l'industrie du fluor et de l'aluminium, porte sur des gisements de moyenne ou basse teneur tout-venant que l'on enrichit dans une usine de flottation. De ce fait, les exploitations de ce type de minerai peuvent s'attaquer à des corps minéralisés de volumes plus importants que les filons classiques, et se prêtant en général très bien à une extraction à ciel ouvert en gradins, et à une mécanisation intensive avec des engins lourds (exemple : Montroc, Le Moulinal). La flottation permet en outre de valoriser des minerais qui finalement sont destinés soit à l'industrie chimique, soit même à l'industrie métallurgique puisqu'il est possible d'agglomérer les concentrés en boulets, briquettes ou pellets ayant le même usage que le spath métallurgique classique.

La flottation doit être précédée d'un broyage très poussé afin de "libérer" les divers composants du minerai et permettre leur tri dans les cellules ou bacs de flottation. *In fine*, en utilisant les divers réactifs appropriés, on parvient à récupérer couramment 90 % et jusqu'à 95 % des constituants naturels des minerais, à savoir de la fluorine mais aussi, le cas échéant, par flottation différentielle poussée, des sous-produits marchands comme

des concentrés de galène, barytine, etc. Ainsi, des sulfures de cuivre (chalcoppyrite, bornite) étaient extraits par flottation différentielle dans l'usine aujourd'hui fermée de la SMT (Société Minière de Trébas) dans le Tarn et la SOGEREM a le projet de créer une petite unité de traitement pour récupérer le cuivre de Montroc et du Burg.

Les teneurs en CaF_2 , supérieures à 90 % sont affinées suivant la gamme de produits que l'on cherche à commercialiser. En fin de chaîne, les produits sont filtrés sur des filtres à tambour sous vide (séparation solide-liquide) puis séchés sur des fours rotatifs, et ensuite stockés en silo ou conditionnés.

4.3. COMMERCIALISATION ET PRIX

Le spath fluor est commercialisé industriellement sous deux catégories :

- le "gravimétrique" du "jargon" des industriels, qui est le spath fluor en grains (ou lumpy) obtenu par traitement en gravimétrie, qui est de qualité spath métallurgique et dont la teneur, qui a été spécifiée plus haut, peut atteindre 92 % pour les produits français actuels ;
- le "flotté" du "jargon" des industriels, qui est le spath fluor en poudre obtenu par flottation, qui est de qualité chimique et dont la teneur s'échelonne de 97 % (minimum) à 99,5 % CaF_2 (qualité soudure) selon les clients visés.

Le spath fluor métallurgique est vendu soit en vrac (wagon, benne), soit en conditionnement, en général sec (70 % sec, 80 % sec, 90 % sec) ou au moins égoutté (85 % égoutté, 90 % égoutté). Les différentes granulométries commercialisées sont usuellement de 1 mm maximum et de 30 mm maximum.

Le spath fluor chimique est vendu en poudre sèche ou humide (filtercake) de différentes granulométries selon les clients visés, le pourcentage d'éléments inférieurs à 150 μ (100 mesh) variant suivant les gammes proposées de 10 % à 40 % pour ce qui est des produits français actuels. Des "poudres spéciales" haut de gamme caractérisées soit par l'exemption d'acide gras, soit par une très basse teneur en silice, soit par de très basses teneurs en bismuth, plomb ou phosphore, sont également commercialisées. La Méjanite est une marque de SOGEREM, se déclinant en différentes références dans la gamme des produits en grains, et dans la gamme des produits en poudre. La référence méjanite F 50 est une poudre à 98 % CaF_2 , caractérisée par une grosse granulométrie, les supérieurs à 150 μ (100 mesh) étant de 50 %.

Les produits sont expédiés soit en vrac par wagons, bennes ou citernes, soit conditionnés en big bags de 1,25 t, big bags d'une tonne, sacs de 50 et sacs de 25 kg.

Il n'y a pas de prix fixe « publié » pour le spath fluor, mais le spath fluor a bien un prix : celui-ci se négocie au cas par cas entre acheteur et vendeur, avec possibilité de transaction pour des approvisionnements pérennes. La revue *Industrial Minerals* publie

chaque mois (tableau 1), sous sa propre responsabilité, les niveaux constatés sur certains trafics (en USD/t, filtercake, base sèche) pour des qualités standards métallurgiques et chimiques. Pour situer les prix actuels on peut aussi retenir le niveau au 18.9.2000 de la taxation antidumping spath chinois en Europe : prix plancher de 113,5 Euros/t filtercake base sèche, valeur entrée en Union Européenne. La revue *Mining Journal* (citant *Industrial Minerals*) a publié pour le spath acide chinois poudre sous forme de filtercake un prix moyen de 122 à 135 USD CIF Rotterdam pour 1999, et prévu pour 2000 un prix moyen probable de 127 à 138 USD/t.

Les prix des qualités spéciales peuvent être jusqu'à deux fois supérieurs aux prix des qualités standard.

Qualité et lieu d'achat	1997	1998	déc. 1999
Spath acide Chinois, Filtercake, C.I.F. Rotterdam	de 133 à 143	de 132 à 141	de 127 à 138
Spath acide Filtercake F.O.B. Tampico			de 110 à 130
Qualité métallurgique F.O.B. Tampico	de 80 à 105	de 81 à 105	de 85 à 105
Spath acide Chinois Filtercake, C.I.F. ports US	de 133 à 140	de 132 à 144	de 127 à 138
Spath acide sud africain, F.O.B. Durban	de 125 à 135	de 128 à 138	de 105 à 125

Source : *Industrial Minerals*

Tabl. 1 - Cours du spath fluor, par catégorie et origine, 1997-1999*.

* (moyennes des cours, en US Dollars par tonne métrique)

Il serait excessif d'évoquer des spécifications strictes en matière d'impureté, car tout spath peut être consommé. Seules quelques utilisations marginales nécessitent un contrôle strict de qualité. En outre, les impuretés peuvent éventuellement être éliminées au stade de l'acide fluorhydrique par distillation.

Mais pour certains usages du spath chimique surtout, la teneur du concentré en CaF_2 et ses teneurs en impuretés sont des critères de discussion des prix dans les négociations commerciales, de même que la nature de ces impuretés (As, Cd, Pb, Be, P). Pour l'arsenic notamment, le maximum admis pour certains concentrés est de 10-12 ppm. C'est la raison pour laquelle les producteurs mexicains s'efforcent depuis plusieurs années de mettre sur le marché un spath acide filtercake à teneur As qui soit garantie de moins de 5 ppm, et dont le prix annoncé FOB Tampico serait de 130-140 USD/t. Ce serait une percée technologique si ce n'était hélas encore actuellement plus un objectif qu'une réalité, car la plus grosse mine du Mexique, Las Cuevas, produit toujours un spath à forte teneur en phosphore et en arsenic. La compagnie communique régulièrement sur les efforts faits par son laboratoire pour produire un spath « normal » et elle va jusqu'à le coter en prix dans les magazines internationaux spécialisés, mais elle n'est pas encore parvenue à en produire en marche industrielle.

Aux USA, le spath fluor de qualité chimique est commercialisé sous une spécification particulière, définie par l'Ecole des Mines du Missouri. Il s'agit de la teneur en " CaF_2 effectif", qui est égale à la teneur en CaF_2 réelle diminuée de 2,5 fois la teneur réelle en SiO_2 .

5. Panorama mondial de la fluorine

Depuis 1993, en l'espace de six ans, la situation mondiale de la fluorine qui avait déjà bien fléchi depuis ces dix dernières années à cause du dumping chinois, a montré des signes très inquiétants. Pourtant les besoins mondiaux restent importants, qui entretiennent une activité soutenue dans ce secteur.

5.1. UNE SITUATION A LA FOIS FLORISSANTE ET CRITIQUE

Les besoins sont importants et suscitent actuellement une production annuelle de fluorine en concentrés entre 4 et 5 Mt.

Les réserves mondiales (tableau 2) sont évaluées à 400 Mt CaF_2 , avec une répartition géographique des gisements assez large dans différents pays industrialisés ou en voie de développement qui met cette industrie à l'abri des incertitudes géopolitiques. Les ressources en fluorine étaient à la même date de 200 Mt CaF_2 . On estime également qu'environ 300 Mt de CaF_2 sont contenues dans les roches phosphatées.

La réglementation couche d'ozone avec le protocole de Montréal et les protocoles ultérieurs ont depuis 1987 totalement déséquilibré le marché de l'acide fluorhydrique et, en amont, celui du spath fluor. Le rééquilibrage du marché de l'acide fluorhydrique est constaté aux USA grâce notamment au développement des HCFC, puis des HFC. Ce n'est pas encore tout-à-fait le cas en Europe.

La réglementation effet de serre pourrait à nouveau provoquer un déséquilibre si les HFC sont inclus dans les produits à réguler.

Dans le même temps où se produisait le déséquilibre conséquence de la réglementation couche d'ozone, dans les années 90, la Chine s'est mise à exporter des quantités croissantes de spath fluor, provoquant une chute des prix et la fermeture de nombreuses mines en Europe et ailleurs.

En 1994, la taxation européenne antidumping du spath chinois (venant après une taxation décidée par les autorités mexicaines) a permis de réguler le marché. Mais le mal était déjà fait, surtout dans les autres pays producteurs :

a) Les difficultés de ces dernières années

Plusieurs sociétés ont connu ces dernières années des difficultés croissantes. Il y a d'abord eu en 1994 la fermeture de la plus grande mine du monde, Buffalo (Afrique du Sud) où Gencor produisait 180 kt/an, et une diminution d'autant de la capacité de

production de ce pays. Puis en 1996, ce fut la fermeture du seul producteur qui restait aux USA, Ozark-Mahoning filiale d'Elf-Atochem, et celle des activités de Bayer à Pforzheim en Allemagne. En 1999 enfin, deux autres événements ont encore refroidi l'atmosphère :

- l'allemand Bayer A.G. et l'américain Phelps Dodge Corp. ont vendu deux de leurs mines sud-africaines à des groupes locaux : Phelps Dodge a vendu à South African Land and Exploration Co. Ltd son domaine minier de Witkop, dans le district de Zeerust ; Bayer a vendu sa filiale Vergenoeg Mining Co. (Pty.) Ltd à Meteorex (junior à participation canadienne).
- au Royaume-Uni, Laporte Minerals qui avait essayé de se diversifier en 1996-1998 a dû cesser ses activités. Après une période d'incertitude, la société Land Regeneration Management (LRM) a fini par racheter son usine de Cavendish et ses mines de Milldam et Longstone Edge (dénommée aussi Watersaw Mine). La filiale créée à cet effet a pris le nom de Glebe Mines Ltd.

En 1998, pour l'Europe, berceau de l'industrie du spath fluor qui joue encore un rôle important dans le monde, l'UE a décidé une accélération du retrait des HCFC, avec un gel de la production de 2000 à 2008 et une interdiction totale de leur emploi à partir de 2009 (le 22 va être banni en Europe dès 2005). En outre, elle a décidé de réduire l'émission des gaz à effet de serre de 8 % d'ici 2010.

b) Une situation incertaine et des signes contradictoires

L'industrie de la chimie du fluor et notamment des polymères se montre heureusement suffisamment dynamique dans la recherche de nouveaux produits environnementalement neutres pour que les spécialistes soient, sinon optimistes, du moins confiants techniquement dans le développement de leur filière ; ils sont néanmoins dans l'expectative, particulièrement en Europe, quant aux décisions qui seront prises en matière de réglementation environnementale.

En outre, les gouvernements s'efforcent d'encourager la reprise. Au Canada, depuis la réouverture de l'usine d'Amherstburg en Ontario, les importations de spath acide se sont accrues de façon significative. Le gouvernement provincial de Terre Neuve et du Labrador a encouragé la réouverture des mines de Saint-Lawrence par Burin Minerals Ltd par la construction d'un port minéralier en eau profonde à Saint-Lawrence.

Si l'arrêt de Laporte constitue un signe supplémentaire de la difficulté de l'industrie du spath fluor, les ventes des deux grandes mines sud-africaines de Bayer (Vergenoeg) et Phelps Dodge (Witkop) donnent deux signaux contradictoires difficiles à interpréter : celui de deux consommateurs finaux qui, en se dégageant de l'amont de la filière fluorée, pourraient à terme se désintéresser de la filière toute entière, et en même temps celui de deux groupes miniers qui, en investissant dans l'activité spath fluor, semblent avoir tiré des événements la conclusion qu'ils devaient se lancer dans le développement d'une activité profitable.

En Chine, les autorités ont mis en place un système de licences d'exportation payantes et des quotas qui ont conduit à stopper la baisse des prix. Des taxes à l'exportation supplémentaires ont été instaurées en 1998 pour le spath fluor, qui grèvent lourdement les 200 à 300 exportateurs de ce pays et rééquilibrent un peu les chances des autres pays producteurs. Mais une suppression de la taxe européenne antidumping du spath chinois pourrait entraîner une modification des licences d'exportation et des quotas en Chine et par-là ramener les producteurs européens éventuellement 10 ans en arrière avec une chute des prix et la fermeture des mines économiquement les plus fragiles.

Heureusement, le début de siècle a vu un élément positif pour les pays européens, car l'enquête antidumping de la DG-1 est entrée en 1999 dans une phase active avec le choix de la République sud-africaine comme pays producteur de référence, et la décision européenne de renouveler (à l'identique) la taxe antidumping spath acide chinois a été signée le 18 septembre 2000 (règlement n° 20.11/2000). En ce sens, les producteurs européens sont sortis de l'expectative, même si le cours de l'Euro en dollars ne leur est actuellement pas favorable.

Au Mexique et en Namibie, les exploitants ont amélioré leurs capacités.

Aux USA enfin, on a assisté en 1998 à un boom sur l'acide fluorhydrique, sur la production de produits fluorocarbonés et sur l'aluminium. Il est manifeste que la politique environnementale des U.S.A. (plus claire que dans d'autres pays européens et facilitant la prise de décisions stratégiques) mais aussi les modes de vie différents (climatisation des voitures), ont conduit à un redressement spectaculaire du marché de l'acide fluorhydrique aux U.S.A.

5.2. LES RESERVES EXPLOITABLES

Les réserves mondiales étaient évaluées début 2000 par l'USGS à 220 Mt CaF₂, à partir de 370 Mt de tout-venant exploitable, se répartissant comme indiqué dans le tableau 2.

Pays	Réserves (Mt 100 % CaF ₂)	Tout-venant (en Mt)
USA		6
Brésil	?	?
Chine	23	94
France	10	14
Kenya	2	3
Mexique	32	40
Maroc	?	?
Afrique du Sud	30	36
Espagne	6	8
Royaume-Uni	2	3
Autres pays	110	170
Total (arrondi)	220	370

Tabl. 2 - Réserves mondiales de spath fluor.

(source : USGS Mineral Commodity Summaries, Feb. 2000)

5.3. LA PRODUCTION MONDIALE

Au niveau mondial, la production annuelle de fluorine est dominée par la Chine (environ la moitié du tonnage mondial). Exprimée en CaF_2 , elle a dépassé les 5 Mt/an durant la période 1988-1990 (avec 5,5 Mt en 1989 année record) pour n'être plus que de 4 Mt en 1995 (correspondant à la plus faible production mondiale depuis 1986). En 1996, elle est remontée à 4,1 Mt ; en 1997, elle a atteint 4,2 Mt ce qui correspond à une augmentation de 2 % par rapport à 1996 ; pour 1999, on prévoit la production à 4,5 Mt.

La Chine reste de très loin le plus gros producteur (48 % en 1997 et 53 % en 1999) devant le Mexique (13 %), la Mongolie (6 %), la Russie (6 %), l'Afrique du Sud (5 %), la France (2,6 %), l'Espagne (3 %), l'Italie (2,5 %) et le Maroc (2,5 %).

Sur les graphiques à secteurs des figures 1 et 2, les pays sont répartis en fonction des productions de spath acide et de spath métallurgique, avec un lissage des statistiques sur les 6 dernières années de façon à faire ressortir les grandes constantes ; on n'a pas tenu compte des pays dont les chiffres et/ou la qualité de production – qui pourtant peut se résumer à "flotté ou pas flotté" – sont incertaines dans les documents statistiques accessibles.

Sur le tableau 3, ils sont regroupés par production globale toutes qualités confondues, exprimée en kt de CaF_2 . Les chiffres 1999 sont seulement estimés.

Pays	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999 (e)
Chine	1900	2100	2100	1900	2150	2400	2550	2400
Mexique	287	283	327	523	524	553	598	600
Mongolie	384	353	173	240	165	171	168	154
Ex URSS	300	260	240	220	250	250	220	250
Afrique du Sud	260	218	174	196	203	207	226	220
France	131	130	131	125	111	110	110	107
Espagne	101	93	114	118	117	120	120	120
Maroc	86	70	85	106	96	104	110	110
Sous total	3449	3507	3344	3428	3616	3915	4102	3961
Total Monde	4120	4180	3750	4170	4250	4410	4460	4510

Tabl. 3 - Production des principaux pays producteurs de fluorine.

(tonnages indiqués en kt ; e = estimé).

(Sources : USGS Mineral Commodity Summaries, Feb. 2000 et USGS Fluorspar 1999 Annual Review. Données Mexique vérifiées avec le CEDOREM)

L'évolution de la production mondiale est résumée dans le tableau 4.

Année	1986	1989	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Production (kt)	4 850	5 557	3 750	4 170	4 250	4 410	4 460	4 510

Tabl. 4 - Evolution de la production mondiale de fluorine.

(Sources : USGS Fluorspar 1999 Annual Review)

La production est très diversifiée par zone géopolitique et par pays, comme le montre le tableau 5. Il est basé sur les chiffres publiés par l'USGS en 2000 et adoptés par plusieurs autres Services Géologiques du monde. Dans ce tableau, on a regroupé les pays producteurs en cinq catégories : pays industrialisés (PI) dont les pays de l'Union Européenne (UE), pays de l'Europe Centrale et Orientale (PECO), pays de la Communauté des Etats Indépendants (CEI), la Chine (qui constitue par son dynamisme et son tonnage "monstrueux" une entité à part entière), et les autres Pays en voie de Développement (PED).

Les statistiques y sont prises en compte dans une vision de géographie physique et de géologie, c'est-à-dire que l'on a essayé d'afficher les productions dans la case de leur véritable pays d'extraction, de s'affranchir de la répartition géopolitique des capitaux en cause et de l'appartenance de telle ou telle mine à des sociétés multinationales elles-mêmes productrices de concentrés dans d'autres pays, et de ne pas tenir compte des circulations de concentrés entre pays.

Pour ces raisons en effet, pour la qualité acidspar, les chiffres de productions données par les diverses publications spécialisées sont parfois contradictoires ou entachés d'incertitude. Même si ces incertitudes ne portent en général que sur un pourcentage qui ne change pas l'ordre de grandeur de la production de ce pays, il s'agit de chiffres concernant entre autres des producteurs importants, notamment la Chine, le Mexique, l'Afrique du Sud, la Namibie, la Mongolie, la Russie, le Kenya, le Kazakhstan, l'Ouzbékistan et plus accessoirement le Brésil et le Canada.

On a donc essayé de recouper les sources pour préciser si les productions publiées correspondent essentiellement à du "minéral flotté" (= acidspar) ou "non flotté" (= metspar). A cet effet, une enquête a été lancée dans le cadre du présent travail, auprès des Services géologiques ou des Services miniers des pays concernés. Au moment où ce mémento est donné à l'impression, elle n'a malheureusement pas obtenu de retours suffisamment détaillés pour qu'il puisse en être tenu compte dans cette édition. Nous attirons au moins l'attention du lecteur sur ces problèmes.

On n'a pas trouvé d'indications sur le bien-fondé des citations bibliographiques suivant lesquelles l'Albanie, la Bulgarie, la Pologne, la Serbie, l'Ukraine, l'Afghanistan, le Myanmar, la Tunisie et le Vietnam auraient produit quelques tonnages entre 1994 et 1998, et on n'a donc pas retenu ces pays dans le tableau 5.

Enfin, on aura constamment à l'esprit que toutes les statistiques mises en circulation ne sont pas nécessairement homogènes quant à la nomenclature : la plupart des organismes officiels les publient en tonnages équivalents à 100 % CaF_2 , mais pour les pays d'où les données sont rares à filtrer, on ne dispose souvent que de chiffres approximatifs, et dont on ne sait s'ils sont exprimés en CaF_2 ou en tonnage tout-venant. L'écart entre les deux est faible s'il s'agit de spath chimique (teneur proche de 100 % CaF_2 de toutes les manières), il est important s'il s'agit de spath métallurgique (teneurs bien inférieure à

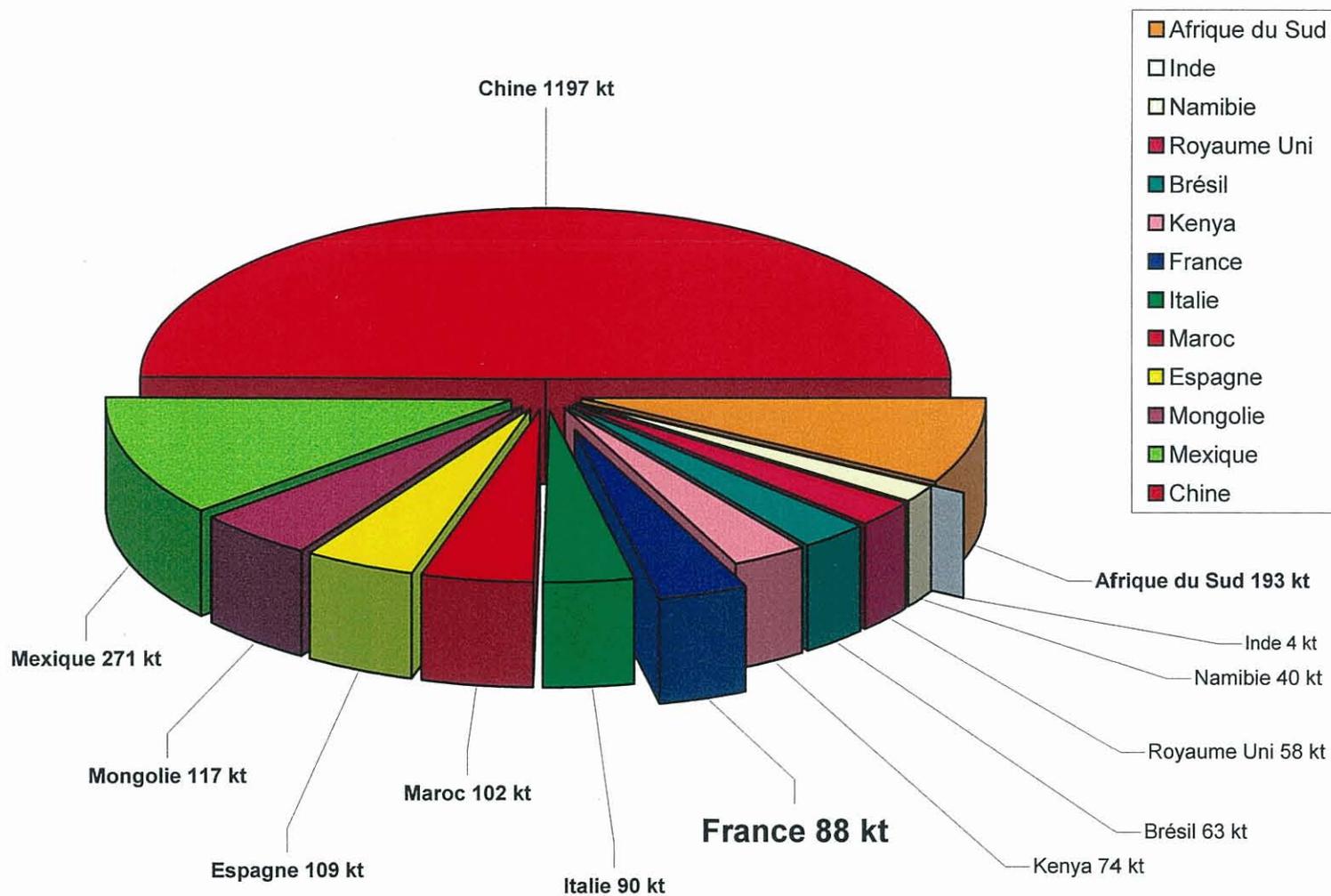


Fig. 1 - Répartition mondiale des principaux producteurs de spath chimique de 1994 à 1999 (tonnage annuel moyen en kt, d'après chiffres USGS publiés en 2000, modifiés).

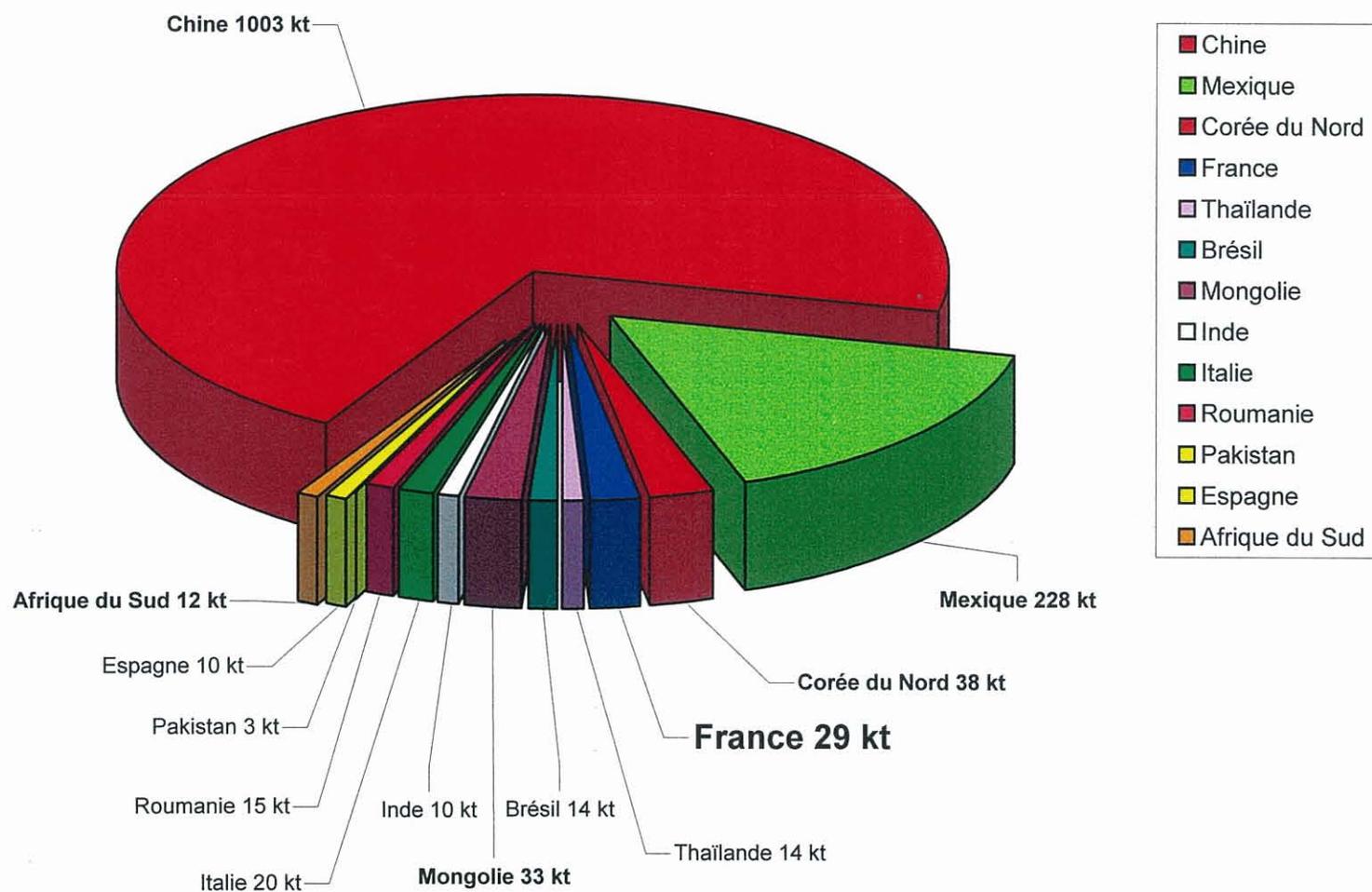


Fig. 2 - Répartition mondiale des principaux producteurs de spath métallurgique de 1994 à 1999 (tonnage annuel moyen en kt, d'après chiffres USGS publiés en 2000, modifiés).

100 %) ou de spath utilisé en cimenterie comme une partie de celui de la Chine (qui est probablement de l'ordre de 400 kt et ne titre que 30 % CaF_2).

En outre les imprécisions sur la Chine jouent sur 50 % du tonnage total, ce qui à la fois est énorme et relativise les imprécisions sur les autres pays.

Pour ces raisons, on a jugé raisonnable d'arrondir certains chiffres et de manipuler le pourcentage de production mondiale de certains pays sans tenir compte des décimales.

5.4. DONNEES RECENTES SUR LES PRINCIPAUX PAYS PRODUCTEURS

Les nouvelles sur les principaux pays producteurs (cf. tabl. 5 et 6) sont relativement nombreuses dans les revues spécialisées et régulièrement mises à jour. En revanche, elles sont sujettes à controverses pour de nombreux pays à économie dirigée. Pour ces raisons, le lecteur est invité à se reporter régulièrement à ces magazines mais on a jugé bon de donner dans le présent mémento des informations plus détaillées sur la Chine, le Mexique, l'Afrique du Sud, la Namibie et la Mongolie, obtenues à l'occasion de l'enquête effectuée. Concernant les producteurs ouest-européens, la position du spath ayant changé avec le retrait de Laporte au Royaume-Uni en 1999, un point détaillé sera également fait sur la situation actuelle de la fluorine dans ce pays.

5.4.1. La Chine

En 1998, le gouvernement chinois recensait sur le territoire un total de 240 gisements de fluorine ayant été intensément explorés, qui représentent en "ressources identifiées" (sic) un total de 140 Mt de CaF_2 , tonnage concentré dans le Hunan (41,5 %), le Zhejiang (18,3 %) et la Mongolie intérieure (17,9 %). On comptait à cette date près de 1 000 entreprises en activité pour la fluorine dont 80 mines appartenant à l'état parmi lesquelles 30 ont une capacité annuelle de plus de 10 000 t (cf. liste des 30 principaux producteurs dans le tableau 6). La province du Jiangxi est également appelée à se développer.

On distingue au plan géologique des gisements "en roches silicatées" qui correspondent aux filons de socle de nos classifications occidentales (exemple Huahe), des gîtes en roches carbonatées qui correspondent au *Mississippi Valley Type* (MVT) américain (exemple Hongxiban) et, récemment mis en évidence, des gisements stratiformes (exemple Sumochaganobo). Au plan minéralogique, les géologues chinois distinguent des gisements F-Pb-Zn (exemple Taolin dans la province du Hunan), des gisements F-W-Sn (exemple Shizhuyuan dans le Hunan aussi) et des gisements F-Fe (exemple classique du gisement à magnétite et terres rares de Bayanobo en Mongolie intérieure qui est un gisement lié aux complexes alcalins à carbonatites (cf. chap. 3).

Mémento des roches et minéraux industriels : la fluorine

Années			1994	1995	1996	1997	1998 e	1999 e
Pays et qualités (légende : t = total, s/t = sous-total, a = acidspar, m & sub-m = metspar, c = qualité céramique, e = estimé)								
Pays industrialisés (PI) : total (t)		t	629 512	722 900	667 547	655 800	669 000	642 280
dont	Afrique du Sud	t	174 258	195 866	203 018	207 000	237 000	217 280
		dont a	166 761	177 000	191 018	201 000	222 000	203 000
		et m	7 497 e	19 000	12 000	4 000 e	15 000	14 000
	Turquie	m	6 671	8 873	4 828	5 000 e	5 000	5 000
	USA	a	49 000	51 000	8 200			
	et Union Européenne	s/t	399 583	467 161	451 501	443 800	427 000	420 000
dont	Allemagne		35 641	39 081	32 448	24 000 e	25 000	28 000
	et Espagne	t	107 000 e	118 411	116 526	120 000 e	120 000	133 000
		dont a	97 000 e	108 205	109 085	110 000 e	110 000	123 000
		et m	10 000 e	10 206	7 441	10 000 e	10 000	10 000
	France	t	131 000	130 000	111 000	110 000	110 000	107 000
		dont a	105 000	102 000	78 000	80 000	80 000	82 000
		et m	26 000	28 000	33 000	30 000	30 000	25 000
	Italie (e)	t	67 942	124 669	126 527	125 800 e	107 000	110 000
		dont a	52 630	91 529	103 527	105 800 e	92 000	95 000
		et m	15 312	33 140	23 000	20 000 e	15 000	15 000
	et Royaume Uni	e	58 000	55 000	65 000	64 000 e	65 000	42 000
Europe de l'Est & Orientale (PECO) : t			25 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000
dont	Roumanie (e)	m/e	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000
	et Tchéquie		10 000					
Pays de la CEI : total		t	352 500	431 500	431 767	353 176	312 200	341 997
dont	Kazakstan		?	80 000	80 000	?	?	?
	et Kirgyztan		2 500 e	2 500 e	2 767	4 176	3 200	2 997
	et Russie	e	250 000	250 000	250 000	250 000	220 000	250 000
	et Tadjikistan	e	10 000	9 000	9 000	9 000	9 000	9 000
	et Ouzbekistan	e	90 000	90 000	90 000	90 000	80 000	80 000
Chine : total		t	2 000 000	2 000 000	2 150 000	2 300 000	2 350 000	2 400 000
		dont a	1 200 000	1 200 000	1 250 000	1 150 000	1 180 000	1 200 000
		et m	800 000	800 000	900 000	1 150 000	1 170 000	1 200 000
Pays En Développement (PED) : t			746 605	1 084 459	1 063 550	1 090 756	1 113 091	1 116 320
dont	Argentine		3 585	5 105	5 666	7 168	7 200	7 000
	et Brésil	t	89 931	89 258	59 040	78 033	72 082	72 000
		dont a	68 890	72 498	46 706	66 859	61 024	61 000
		et m	21 041	16 760	12 334	11 174	11 058	11 000
	et Corée du Nord	m/e	40 000	40 000	39 000	39 000	30 000	25 000
	et Corée du Sud	m/e	50	50		617		
	et Egypte		514	551	700 e	700	700	700
	et Inde	t	22 591	24 246	19 378	16 814	785	800
		dont a	6 231	6 359	5 115	6 937		
		et m	16 360	17 887	14 263	9 877	785	800
	et Iran (e)		22 204	20 163	20 000	20 000 e	20 000	20 000
	et Kenya	a	53 448	80 230	83 000	68 700	60 854	98 000
	et Maroc	a	85 000	105 800	95 900	103 800	110 000	110 000
	et Mexique	t	235 000	522 000	523 971	552 840	598 042	564 000
		dont a	129 000	270 000	279 033	290 580	330 711	327 000
		et m	103 000	252 000	244 938	262 260	267 331	237 000
		et subm	3 000 e					
	et Mongolie (e)	t	105 000	133 300	167 000	171 000	168 000	154 000
		dont a	88 000	120 300	130 000	130 000	122 000	108 000
		et autres	17 000	13 000	37 000	41 000	46 000	46 000
	et Namibie	a	52 226	36 889	32 285	23 208	40 685	57 600
	et Pakistan	m	13 351	2 753	363	1 050	1 000	220
	et Thaïlande	m	23 705	24 114	17 247	7 826	3 743	7 000
TOTAL MONDIAL en tonnes CaF2			3 750 000	4 170 000	4 250 000	4 410 000	4 460 000	4 510 000

Tabl. 5 – Répartition géopolitique de la production mondiale.

La plupart des mines sont exploitées en souterrain en raison du pendage fort des filons. Il existe néanmoins quelques mines exploitées, en partie ou en totalité, à ciel ouvert. Le minerai est soit trié à la main (s'il s'agit de spath métallurgique) soit flotté (cas du spath chimique). L'usine de flottation de la Dongfeng Co. est la plus grande de Chine avec une capacité d'alimentation tout-venant de 150 000 t/an. La production annuelle de concentré fluoré est actuellement de 50 000 t avec une récupération de 79 %. Le tout-venant de Dongfeng titre 45 % et le concentré 98 %.

En outre, un tonnage important de fluorine est récupéré comme sous-produit de quelques mines de métaux non ferreux. L'usine de traitement de Taolin est la plus grande de ce type, avec une capacité annuelle en entrée de 1,04 Mt et une production annuelle de concentrés de 40 000 t avec une récupération de 58 %. Le tout-venant titre 13 % et le concentré 97 %.

La production au début des années 80 était axée à 80 % sur le spath métallurgique. Elle s'est diversifiée en raison des possibilités d'exportation et, à un moindre degré, de la consommation nationale, si bien qu'en 1998 la part de production de spath chimique et celle du spath métallurgique étaient de 1/3 - 2/3 par rapport au total produit.

En 1996, les principales exportations ont été à destination du Japon (403 kt), des USA (290 kt), des Pays-Bas (72 kt), de la Russie (65 kt), de la Corée du Sud (56 kt), de l'Inde (44 kt), de la Belgique (30 kt), du Canada (28 kt), de l'Italie (26 kt), de l'Allemagne (22 kt), de Formose (21 kt) et de l'Ukraine (21 kt). La même année, 880 t d'acide fluorhydrique ont été exportées vers la Malaisie et 843 t vers la Corée du Sud, tandis que des exportations de cryolite ont été enregistrées à destination de l'Égypte (500 t) et du Ghana (493 t).

5.4.2. Le Mexique

Tout en ayant retrouvé une production annuelle de 500 à 600 kt, le Mexique conserve encore une capacité considérable grâce aux extraordinaires réserves du principal gisement, Las Cuevas qui appartient à Noranda Mine of Canada. En 1993, la mine avait dû réduire sa production annuelle comme les mines européennes en raison de l'érosion du marché. Signe de son espoir dans la reprise, en 1997 elle a porté sa capacité à 320 000 t/an et mis en projet une phase d'expansion ultérieure. Elle a aussi entamé la même année la conception d'une raffinerie pour produire un spath acide à faible teneur en arsenic, mais ce projet n'a pas vu le jour encore en 1999. Les coûts opératoires du projet (pyrolyse à haute température) s'avéraient trop élevés pour être rentables aux cours actuels, mais des études sont programmées pour trouver une solution technique de rentabilité satisfaisante. Lors du congrès international du spath fluor à San Luis Potosí en mai 1999, le président de la compagnie a rendu compte des travaux récents de modernisation de l'usine et de la mine, et de la construction d'une nouvelle usine de flottation.

On a regroupé, en annexe 1, les tableaux statistiques détaillés obtenus du Service géologique de ce pays.

L'extraction est concentrée dans trois entités fédératives :

- San Luis Potosi (428 kt en 1998) avec le district de production de Zaragoza qui comprend Las Cuevas ;
- Durango (12 kt en 1998) avec le district de production d'Inde ;
- Coahuila (144 kt en 1998) avec les districts de production de Muzquiz (118 kt) et Acuna (41 kt).

Une part importante de la production est utilisée sur place pour la fabrication d'acide fluorhydrique qui est exporté aux USA et au Canada. Le reste du minerai est exporté aux USA, en Europe occidentale, au Japon (metspar) et en Amérique du Sud, notamment au Brésil dont la production propre n'est pas suffisante.

5.4.3. L'Afrique du Sud

L'Afrique du Sud a fourni et recèle encore des tonnages d'importance mondiale. La majorité des gisements se répartit entre trois districts majeurs : le district de Marico au Nord à la frontière du Botswana (dans la Province du Nord-Ouest près de Mmabatho et Zeerust, à 250 km à l'ouest de Johannesburg et Pretoria), le district du Bushveld au Nord-Est (juste au nord de Pretoria à cheval sur les Provinces du Nord-Ouest, du Nord-Est, du Gauteng et du Mpumalanga) et le district de la Northern Cape Province au Nord-Ouest (à la frontière sud de la Namibie, depuis la côte atlantique jusqu'à Upington). Il y a aussi des gisements isolés dans les provinces de Kwazulu-Natal à l'est du pays (Hlabisa au nord de Richards Bay, Sinkwazi et Cato Ridge près de Durban), et de Free State au centre (Florisbad près de Bloemfontein).

L'année 1999 a vu l'émergence de nouveaux opérateurs dans ce pays, après la vente de ses deux principales mines, à des juniors compagnies, par leurs propriétaires historiques Bayer et Phelps Dodge. Les nouveaux propriétaires ont l'intention de développer leurs activités et l'Afrique du Sud pourrait devenir dans les années à venir un opérateur majeur, le second sans doute après la Chine.

La première mine, Vergenoeg dans le Bushveld près de Johannesburg, a été vendue par Bayer (filiale de Bayer A.G. d'Allemagne) en mai 1999 à Crew Development Corp. du groupe Meteorex, qui en a cédé 30 % en juillet 1999 à la société espagnole Minerales y Productos Derivados SA (Minersa). Elle dispose de 100 ans de réserves à la capacité annuelle de 500 kt/an de minerais extraits à ciel ouvert, avec production de 100 kt/an d'acidspar et de 10 kt/an de metspar, ce qui représente environ 2,5 % de la production mondiale. Bayer a un accord avec Meteorex pour la fourniture de 60 000 t/an de spath sud-africain à l'usine d'acide fluorhydrique que Bayer possède à Leverkusen en Allemagne.

Mémento des roches et minéraux industriels : la fluorine

Pays	Principales compagnies	Localisation	Capacité
Afrique du Sud	- South African Land and Exploration Co. Ltd (SALEC ou SALLIES) qui en 1999 a racheté Witkop à Phelps Dodge Mining Ltd (PDM)	Witkop/Zeerust	120 kt
	- Meteorex (junior company canadienne qui en 1999 a racheté la mine de Vergenoeg à BAYER)	Vergenoeg	110 kt
Chine	- Zhejiang Dongfeng Fluorspar (Group) Co. Ltd	Zhejiang	150 kt
	- Anhui Jingde Yingguang Co. Ltd	Anhui	
	- Anhui Langxi Foshan Fluorspar Co. Ltd	Anhui	
	- Fujian Shaowu Fluorspar Mine	Fujian	
	- Gansu Gaotai Fluorspar Mine	Gansu	
	- Gansu Yongchang Jiaojiazhuang Fluorspar Mine	Gansu	
	- Guangfeng Nonmetal Minerals Industry Co.	Jiangxi	
	- Hebei Pingquan Shuangdongzi Fluorspar Mine	Hebei	
	- Henan Songxian Zhongying Fluoride Co. Ltd	Henan	
	- Henan Xinyang Minggang Fluorspar (Group) Corp.	Henan	
	- Hubei Dawu Fluorspar Co.	Hubei	
	- Hubei Hong'an Fluorspar Mining Co.	Hubei	
	- Hunan Hengdong Fluorspar Mine	Hunan	
	- Hunan Hengnan Fluorspar Mine	Hunan	
	- Hunan Shizhuyuan Nonferrous Metals Mine	Hunan	
	- Inner Mongolia Chifeng Harqin Fluorspar Mine	Mongolie int.	
	- Inner Mongolia Siziwang Qi Fluorspar Co. Ltd	Mongolie int.	
	- Jiangxi Changhua Chemical & Metallurgical Co.	Jiangxi	
	- Jiangxi De'an Fluorspar Co.	Jiangxi	
	- Jiangxi Yongfeng Fluorspar Works	Jiangxi	
	- Jinhua County Mining Co.	Zhejiang	
	- Shaanxi Shangzhou Fluorspar Mine	Shanxi	
	- Taolin Lead-Zinc Mine	Hunan	
	- Xinchang Fluorspar Mine	Zhejiang	
- Yiwu Mineral Industry Co.	Zhejiang		
- Zhejiang Longquan Yufeng Fluorspar Co. Ltd	Zhejiang		
- Zhejiang Shengzhou Fluorspar Mine	Zhejiang		
- Zhejiang Suichang Fluorspar Mine	Zhejiang		
- Zhejiang Wuyi Fluorspar Mines Co.	Zhejiang		
- Zhejiang Yingpeng Chemical Co. Ltd	Zhejiang		
Kenya	Kenya Fluorspar		
Maroc	SAMINE (ONA)	El Hammam	
Mexique	Las Cuevas Minera Muzquiz Fluorita de Mexico ALFIL		
Mongolie	- MONGOLROSTSVETMET (5 mines : Bor Undur area mines Berth and Urgon area mines)	Bor Undur Berth	120 kt 280 kt
	- MONGOL-CZECHOSLOVAKMETAL (en sommeil depuis 1992)	Chuluut Tsagaan Del	(45 kt)
UE	Sociétés européennes		400 kt
Allemagne	- SACHTLEBEN BERGBAU GmbH & Co.	Wolfach	20 kt
	- BAYER FLUSS & SCHWERSPAT WERKE (fermé en 1996)	Pforzheim	20 kt -> 0
Espagne	MINERALES Y PRODUCTOS DERIVADOS SA (MINERSA)	Asturies	100 kt
France	- SOGEREM	Tarn	100 kt
	- SOCIETE INDUSTRIELLE DU CENTRE	Indre	70 kt
	- MINES DU HAUT DU THEM	Vosges	2 kt
Italie	NUOVA MINERARIA SILIUS	Sardaigne	50 kt
Royaume-Uni	- DURHAM INDUSTRIAL MINERALS	Weardale	20 kt
	- GLEBE MINES Ltd	Derbyshire	(80 kt) -> 0

Tabl. 6 – Liste des principales sociétés productrices dans le monde.

La seconde mine et son usine, Witkop dans le district de Marico, ont été vendues en juillet par Phelps Dodge (USA) à la South African Land and Exploration Company Ltd (SALEC qui est désignée sous le nom de Sallies Ltd par divers magazines), un groupe sud-africain basé sur place, détenu en majorité par l'australien Athlone International. SALEC a annoncé l'achèvement de son projet de construction visant à introduire plusieurs procédés métallurgiques destinés à éliminer quelques goulots d'étranglement de l'usine de traitement. Le projet a augmenté la capacité de 20 000 t/an et l'usine tourne maintenant à pleine capacité de 120 000 t/an. La compagnie a commencé aussi une vaste étude de marché sur les débouchés des produits finis et les clients potentiels. Les réserves sont suffisantes pour permettre une augmentation de production de 50 000 t/an mais la compagnie attend le résultat de l'étude de marché pour en décider.

Au plan géologique, les gisements d'Afrique du Sud sont pour partie (gîtes associés aux dolomies d'âge 200 Ma du système du Transvaal) de forme liée aux strates (ou stratiformes) et pour partie (gîtes associés aux différentes roches magmatiques du Bushveld Complex d'âge 1900 Ma) en forme en amas d'imprégnation et de stockwerks alignés parfois sur des fractures. Plus dans le détail, les spécialistes les classent dans au moins quatre types génétiques différents, correspondant à des provinces métallogéniques aux histoires géologiques distinctes :

La mine de Witkop (ferme de Wintershoek 303 JP) appartient à un premier grand groupe de minéralisations fluorées diachrones, caractérisé par une association avec les roches du Transvaal Supergroup, du Bushveld Complex, du magmatisme alcalin post-Bushveld ainsi qu'avec une métallogénèse de basse température post-Karoo et Quaternaire. Les gisements d'importance économique supérieure sont localisés dans la séquence dolomitique sommitale du Malmani Subgroup, dans la partie sud-ouest du district de Marico, au Sud de Zeerust. Ils se rangent dans le type *Mississippi Valley*, résultant de phénomènes d'émersion-dissolution-karstification-précipitations hydrothermales dans les dolomites. Les formes des corps minéralisés varient des amas karstiques en poches, pipes, brèches cimentées par la fluorine, à des gisements stratiformes ou au moins liés aux strates. Ce dernier cas est illustré par le fameux minerai « *algal* » que l'on rencontre en de nombreux gisements et indices (Zendelingspost 300 JP, Buffelshoek JP, Witkop 302 JP, Wintershoek 303 JP, Rhenosterfontein 304 JP). La fluorine s'y concentre dans une couche stromatolitique de 20 à 50 m de puissance en formant des corps lenticulaires dont l'extension en allongement va de quelques dizaines de mètres à près d'un kilomètre. En général la teneur est faible mais elle varie de quelques pour-cent à près de 80 % dans quelques rares quartiers. Par altération, le minerai *algal* donne des terres manganésifères scoriacées riches en fluorine, appelées le minerai « *kokkoman* ». On exploite aussi d'autres minerais à faciès particulier, un minerai finement cristallisé dit *blockspar* encaissé dans les dolomies sombres, et plus rarement un minerai lité dit « *banded spar* » (gisement de la ferme de Naauwpoort 328 JP). L'exploitation concentrée de 1917 à 1940 sur les amas à haute teneur s'est déplacée dans les années 70 sur le minerai algair de basse teneur de deux gisements (mines des fermes de Rhenosterfontein 304 JP et

Wintershoek 303 JP) tandis que deux autres gisements du même type (Doomhoek 305 JP et Kafferskraal 306 JP d'une part, Witkop 302 JP et Buffelshoek 301 JP d'autre part) ont été gardés en réserve. Aujourd'hui, seule la mine de Witkop sur la ferme Wintershoek 303 JP est en opération, ayant acquis les droits miniers sur l'ensemble des 6 fermes précitées.

La mine de Vergenoeg (ferme de Kromdraai 209 JR à 110 km au nord de Pretoria) exploite un gisement très particulier, avec hématite, cuivre, uranium et cassitérite, d'origine volcanogénétique qui appartient au sein de ce grand groupe à l'ensemble particulier des gisements liés au Granite du Bushveld. On y distingue des gisements volcanogéniques, des mantos dans le granite, et des gisements hydrothermaux de haute température.

Vergenoeg est un appareil volcanique encaissé dans la rhyolite du Rooiberg Group. Le gisement est un pipe en forme d'entonnoir, de 700 à 900 m de diamètre en surface et se réduisant à un diamètre de 400 m à 400 m de profondeur. Le minerai non oxydé est composé d'un mélange de magnétite, pyrite, sidérite, fluorite et grunerite, coiffé par un gossan de 50 m d'épaisseur à hématite et fluorine. La teneur moyenne varie de 20 à 40 % CaF_2 et de 50 à 60 % Fe_2O_3 , mais localement des zones plus pures atteignent 65 % CaF_2 . Les ressources étaient estimées fin 1997 à plus de 20 Mt de CaF_2 contenu. Au Sud de la mine de Vergenoeg des sondages de Metallgesellschaft AG ont reconnu (gisement de Plattekop, ferme de Kromdraai 209 JR) 1 Mt CaF_2 de réserves encaissées dans des ignimbrites et des tufs.

Aux minéralisations de type hydrothermal haute température appartenant aussi au groupe du Bushveld se rattache le gisement « monstrueux » de Buffalo (que General Mining and Finance puis Gencor ont exploité jusqu'en 1994 à la ferme de Buffelsfontein 347 KR, quelques km au nord-ouest de Naboomspruit, et qui n'est pas épuisé). Il s'agit d'un stockwerk de veines centimétriques de fluorine violette encaissé dans une enclave de leptite à gros grain (arkose métamorphisée) au milieu du granite du Bushveld. La gangue est principalement de la chlorite mais de la monazite et d'autres terres rares sont également présentes. Au début, les réserves ont été évaluées à 60 Mt à 16 % CaF_2 , ce qui était à peu près la teneur de coupure. La mine a été fermée en raison de la chute des cours. La mine d'acidspars de Zwartkloof constituée de trois corps de carbonate ferrifère minéralisés sur fractures dans la rhyolite de Rooiberg est rangée dans le même groupe, la teneur de coupure est de 17 % CaF_2 et les réserves ont été évaluées à 1 Mt CaF_2 .

- Un troisième groupe de gisement comprend des minéralisations fluorées encaissées dans des complexes alcalins et à carbonatite. Au nord-est de Pretoria, dans les intrusions alcalines de la Pienaars River, Gencor a reconnu par sondages le gisement de Wallmannsthal 278 JR estimé à 4 Mt de CaF_2 et 420 kt d'apatite contenus. Les essais de traitement pour séparer économiquement la fluorine de l'apatite ont échoué, et le gisement n'a pas encore été exploité. De même, dans le complexe à carbonatites de Kruidfontein, Metallgesellschaft et Southern Sphere ont identifié des ressources de

minerai tout-venant à 28 % CaF_2 représentant 700 kt de CaF_2 contenu, entourées d'une auréole de 4,5 Mt à 15%.

- Un quatrième groupe comprend des filons hydrothermaux de basse température. Le gisement reconnu à Hartbeestpoort 522 KQ est estimé à 50 000 t de minerai à haute teneur scheidable, accompagné par une auréole de minerai fluoré à basse teneur représentant 1 Mt de CaF_2 contenu, exploitables en open pit.

D'autres types de minéralisation ont été identifiés, jusqu'à l'Actuel, sans présenter à ce jour de concentrations économiques notables au niveau de ce mémento. L'ensemble démontre néanmoins qu'il existe en Afrique du Sud un vaste potentiel favorable à la présence de nombreuses concentrations économiquement exploitables, se déclinant entre différents types de présentations géologiques et à des époques métallogéniques distinctes. Le pays étant doté d'une bonne infrastructure et du port de Durban géographiquement bien placé pour l'export, l'ensemble est extrêmement favorable au développement de l'industrie de la fluorine sud-africaine.

5.4.4. La Mongolie

La Mongolie comporte dans la partie est et sud-est plus de 60 gisements de fluorine auxquels s'ajoutent environ 300 indices. La plupart des gisements sont regroupés dans la province fluorée transbaïkale, au sud et à l'est de Ulaanbaatar. On distingue 6 districts principaux, Bor Undur, Zuun Tsagaan Del, Har-Airak, Urgan, Berth et Chuluut Tsagaan Del. Dans le district de Bor Undur sont concentrées 70 % des ressources fluorées du pays.

Il existait, en 1997, six mines de fluorine en Mongolie, qui sont dirigées par une joint venture Mongolie-Russie, la Mongolrostsvetmet : la mine de Bor Undur et celle d'Adag dans le district de Bor Undur, la mine de Khajuu Ulaan dans le district de Zuun Tsagaan Del, la mine de Har-Airak dans le district d'Har-Airak, la mine d'Urgan dans le district d'Urgan, et la mine de Berth dans le district de Berth. Au total, Mongolrostsvesmet est monté en production régulièrement de 1993 à 1996 date à laquelle il a produit 127 kt de concentrés de spath acide à une teneur de 92-96 % et 27 kt de concentrés métallurgiques.

Une septième mine, la mine de Chuluut Tsagaan Del, a été exploitée jusqu'en 1992 par une joint venture Mongolie-Tchécoslovaquie (Mongol-Czecholovakmetal) date à laquelle elle a fermé en raison de l'inondation des travaux par la rupture d'un barrage et des difficultés économiques en Europe de l'Est.

Les spécialistes distinguent plusieurs types de minéralisation, qui se répartissent en deux grands modes de gisement : d'une part des filons et remplissages fissuraux sur zone faillée, recoupant des empilements volcano-sédimentaires et des granites, et d'autre part des lentilles et "corps métasomatiques" dans des séries sédimentaires carbonatées

(calcaires et dolomies), terminologie soviétique qui pourrait correspondre au *Mississippi Valley Type* de notre classification géologique. La notion de réserves dans les pays de l'Est à économie planifiée a toujours été très en deçà des critères français en vigueur pour la distinction entre réserves et ressources, si bien que les chiffres publiés sont à prendre avec beaucoup de prudence, même si ce pays s'est ouvert à présent à l'économie de marché.

Pour le spath acide, le gisement de Bor Undur vient en tête, avec des réserves annoncées de 8 Mt à 37 %. Il est constitué de filons qui recoupent des terrains volcano-sédimentaires et des coulées volcaniques qui s'étagent du Permien au Crétacé, et qui se sont accumulés dans une dépression volcano-tectonique (rift) recoupée par des granites jurassiques. C'est le plus gros gisement mongol avec une production démarrée en 1982 et qui est maintenant de 115 à 120 kt/an de concentrés à 95-96 % qui sont référencés dans les statistiques nationales comme acidspar (mais ne correspondent pas à la norme internationale en usage qui est >97 %), et qui résultent du traitement par flottation de 400 kt/an de tout-venant à 31 % extrait à ciel ouvert. Un tiers de l'alimentation de l'usine est fourni par la mine voisine (Adag). La mine à ciel ouvert d'Adag qui a démarré en 1988 a produit 80 000 t de tout-venant en 1992, celle d'Har-Airak 80 000 et celle de Khajuu Ulaan 100 000. Pour ces trois dernières mines, les statistiques officielles de 1997 ne font pas de différences entre tonnage tout-venant et tonnage de concentrés, si bien qu'il pourrait s'agir de tout-venant.

Pour le spath métallurgique, en 1997 deux mines étaient en activité. La production annuelle de la mine à ciel ouvert d'Urgon est de 200 000 t. Le tout-venant titre de 18,6 à 61,3 %. La minéralisation affecte des sédiments carbonatés. La production de la mine souterraine de Berth qui est exploitée depuis 1954 est de 80 000 t à 65-79 %, et les réserves étaient de trois ans en 1997. Le filon est encaissé dans un granite d'âge permien.

5.4.5. La Namibie

En Afrique, la production est largement dominée par l'Afrique du Sud. La contribution de la Namibie est beaucoup plus modeste mais il est néanmoins intéressant de citer sa production (de spath acide) dans la mesure où Solvay y a pris en 1997 le contrôle de la mine d'Okorusu afin de sécuriser ses approvisionnements. La production du pays qui avait chuté depuis 1994 est remontée à son niveau antérieur.

1991	27 816 t
1992	37 680 t
1993	43 466 t
1994	52 226 t
1995	33 559 t
1996	31 457 t
1997	23 160 t
1998	40 685 t
1999	57 600 t

Okorusu est un gisement lié aux complexes alcalins à carbonatites (cf. chap. 3). En 1998, Okorusu Fluorspar (Pty.) Ltd a réalisé des améliorations essentielles à la mine et à ses installations de concentration. La compagnie a réorganisé l'extraction dans ses mines à ciel ouvert (amas A et B) pour augmenter la teneur du tout-venant à 60 % CaF_2 au printemps 2000. La production visée est de 60 000 t (poids sec) de spath acide pour 1999 et de 80 000 t (poids sec) de spath acide pour 2000. En 1999, la compagnie a réalisé une campagne d'exploration géologique sur l'amas B qui a doublé ses réserves prouvées avec des teneurs meilleures qu'espéré. Elle a poursuivi le déblaiement des tas de stérile de l'open pit A commencé début 1998 et a mis à nu l'amas A en mai 2000. La compagnie a construit en 1998 une nouvelle usine de flottation, un atelier, un laboratoire, elle a commencé en 1999 la construction d'un nouvel atelier de broyage pour doubler d'ici 2001 la capacité de traitement à 40 t/h, elle a acheté de nouveaux matériels d'exploitation et investi dans des logements et des locaux pour les employés.

Le total ou presque de la production est expédié (55 000 t en 1999) à la maison mère Solvay S.A. pour alimenter son usine d'acide fluorhydrique de Bad Wimpfen, en Allemagne (comm. orales de Mark Dawe, Okorusu Fluorspar (Pty.) Ltd publiée par M. Miller, 1999 et 2000).

5.4.6. Le Royaume-Uni

La production du Royaume-Uni s'est maintenue de 1996 à 1998 à 65 000 t/an. Les importations ont été dans le même temps de l'ordre de 35 000 t/an. Les statistiques douanières du pays indiquent que les exportations de qualité supérieure à 97 % CaF_2 ont été en 1998 de 4 194 t principalement vers la Suède, les Pays-Bas, l'Italie et l'Allemagne (et de 96 t vers la France plus 3 t à moins de 97 % CaF_2). A l'heure où ce mémento est imprimé, la production 1999 a chuté à 42 000 t et la place future du pays au sein des producteurs mondiaux est incertaine, bien que, en 1998, le Directory of Mines and Quarries recensait encore 17 mines inscrites comme producteurs :

- dans la North England (Comté de Durham) la Fraser's Grove Mine de Durham Industrial Minerals Ltd avec son filon de Greencleugh (produit aussi du plomb et du zinc) ;
- dans les East Midlands, d'une part dans le Derbyshire, la mine de Milltown appartenant à Fernwood Aggregates (produit aussi de la barite) et, d'autre part dans le Peak District National Park, 15 autres mines :
 - . Backdale Minerals de RMC Aggregates (Eastern) Ltd (filon) ;
 - . Blakelow Lane de Deepwood Mining Co. Ltd (filons ; barite également) ;
 - . Castlegate Lane de T. & T. Broadhurst (filon) ;
 - . Chance Mine de Les Bond (filon de Earl Rake) ;
 - . Cresswell Part de Ernest Hinchcliffe Ltd (filon, aussi barite) ;
 - . Cresswell Parts de High Peak Spar Ltd (filon de Long Rake, aussi barite) ;
 - . Dirlow Rake de Laporte Minerals (aussi barite et plomb) ;
 - . Lambpart de D. W. Twigg (filons) ;

- . Middle Hay de S. Wayne (filon) ;
- . Milldam Mine de Laporte Minerals (filon d'Hucklow Edge, également barite et Pb-Zn) ;
- . Pike Hall Lane de T. & T. Broadhurst (filon, barite aussi) ;
- . Sacheveral Lane de G. Blackham (filon) ;
- . Smalldale Head de Bradwell Spar Mines Ltd (filon, barite aussi) ;
- . Tearsall Farm de Slinter Mining Co. (filon, barite aussi) ;
- . Watersaw Mine de Laporte Minerals (filon de Longstone Edge, barite et Pb aussi).

Laporte et Durham étaient en 1999 les deux principales sociétés, les autres compagnies plus modestes vendant leur tout-venant à Laporte.

Durham Industrial Minerals est installé principalement dans le Weardale où il produit du spath et des concentrés de plomb dans son usine de Broadwood (Frosterley, Bishop Auckland).

Le domaine minier des Glebe Mines de Laporte Minerals est situé dans le Parc National du Peak District juste au Sud de Sheffield. Laporte Minerals est une branche de la compagnie chimique Laporte PLC et elle a vendu jusqu'en 1999 des concentrés de spath acide aux deux usines d'acide fluorhydrique du Royaume-Uni, celle de l'Imperial Chemical Industries (ICI) à Runcorn et celle de Rhodia à Avonmouth. Ses principales mines étaient l'une souterraine (Milldam) et l'autre moitié souterraine, moitié à ciel ouvert (Longstone Edge). Elle achetait en outre la production des petites sociétés minières du district afin d'alimenter à hauteur de sa capacité l'usine de flottation qu'elle possédait à Cavendish. Laporte produisait annuellement jusqu'en 1999 de l'ordre de 50 000 t de fluorine et environ 15 000 t de barite. Sa production de concentrés de galène comme sous-produit était estimée à moins de 2 000 t/an.

En 1997-1998, face au marché de plus en plus difficile pour l'Europe, Laporte a opéré un vaste programme pour réduire ses coûts, diversifier ses produits et sous-produits (particulièrement vers la barite et vers les matériaux de construction que l'on peut fabriquer à partir des tailings et des rejets de milieux denses), et moderniser sa production de pellets de spath métallurgique. Elle a également optimisé ses méthodes de traitement par milieu dense et flottation en colonne.

Mais en juillet 1999, Laporte Minerals ayant manqué une importante vente à cause de la concurrence chinoise a pris la décision de fermer toutes ses mines du Royaume-Uni, et a annoncé la reconversion du personnel. L'affaire a créé beaucoup d'émotion dans les milieux spécialisés d'Europe. Selon les informations qui ont été alors données par *Industrial Minerals*, les mines ne seraient pas épuisées mais auraient encore des réserves de 40 ans de production au rythme actuel.

Fin 1999, le bruit courait à Londres que Durham fermerait vraisemblablement sous peu à son tour, qu'un consortium d'hommes d'affaires avait offert de racheter l'usine de Cavendish et de continuer sa production, mais que les mines de Longstone Edge et Milldam ne seraient probablement pas rouvertes et que le tout-venant pour alimenter l'usine serait pris à l'extérieur.

Mais finalement (*Industrial Minerals*, déc. 1999) à l'aube de l'an 2000 le domaine minier et les installations de concentration de Laporte Minerals ont été rachetées par la société Land Regeneration Management (LRM). La filiale créée à cet effet a pris le nom de Glebe Mines Ltd (l'ancien nom du domaine minier avant son acquisition par Laporte) et elle a annoncé son intention de reprendre toutes les activités de Laporte. *A priori* (31.12.1999), les intentions de Glebe Mines sont de réduire le personnel et la production comparativement à celle qu'avait Laporte : deux mines souterraines ne seraient pas remises en exploitation (Milldam et Sallet Hole), et la production de l'unité de traitement par flottation serait fortement réduite.

5.5. PRODUCTEURS, TRANSFORMATEURS ET CONSOMMATEURS DE FLUORINE

La liste des principales compagnies axées sur le spath fluor dans le monde et en particulier dans l'Union Européenne fait l'objet du tableau 6. Les principaux producteurs (cf. tableau 3 et § 5.3) sont bien sûr les principaux exportateurs à commencer par la Chine (de l'ordre de 1 à 1,5 Mt/an), le Mexique et l'Afrique du Sud. Les principaux clients (importateurs) sont, pour la Chine : le Japon, les USA, l'Allemagne et le Canada ; pour le Mexique : les USA et l'Amérique du Sud, ainsi que l'Europe occidentale ; pour l'Afrique du Sud : l'Europe, la CEI et le Japon. Pour la France : l'Italie et la Tunisie notamment.

Le nombre relativement limité de grands producteurs a encouragé le commerce international. La production aux USA a cessé à cause de l'augmentation des coûts opératoires et de la disponibilité d'importations relativement bon marché en provenance du Mexique, de Chine et d'Afrique du Sud.

La mise en garde qui a été faite au chapitre 5.3 quant à la fiabilité des statistiques par pays reste valable pour la distinction qui reste à faire entre producteurs miniers et transformateurs ou vendeurs.

La plupart des pays producteurs sont également consommateurs, que ce soit pour leur propre industrie du fluor et de ses dérivés, pour celle de l'aluminium, pour leur sidérurgie et, comme en Chine, pour leurs cimenteries. En Europe occidentale, la moitié des besoins de la consommation sont couverts par la production domestique. La production européenne repose pour 80 % sur trois sociétés, Minersa en Espagne, SOGEREM en France et Laporte (devenue GLEBE Mines Ltd de LRM) au Royaume-Uni. La production italienne a légèrement diminué bien qu'outre les activités de Silius en Sardaigne, la société PREALPI continue dans les Alpes Bergamasques son activité de valorisation par flottation des haldes d'anciennes mines de fluorine.

5.6. CONSOMMATION MONDIALE

Spath chimique et spath métallurgique se partagent moitié-moitié, en tonnage, la consommation mondiale. La consommation mondiale de spath fluor chimique est en moyenne de 2 à 3 Mt/an.

La consommation mondiale de spath chimique est dominée par deux grandes entités (600 à 650 kt chacune) : l'Europe de l'Ouest et le groupe USA + Canada. Elles sont suivies à parts égales de 250 kt par la Chine, le Japon, l'Amérique du Sud (Mexique compris) et le groupe Europe de l'Est + Mongolie. L'Afrique du Sud et l'Australasie consomment ensemble 60 kt.

5.7. SUBSTITUTS POSSIBLES

Parmi les minéraux de fluor autres que la fluorine, seule la cryolithe Na_3AlF_6 qui titre 54 % de fluor est classiquement utilisée pour la fabrication de l'aluminium mais il s'agit actuellement de cryolithe de synthèse. Dans le monde, les gisements ayant fourni ce minéral à l'état naturel sont des curiosités minéralogiques, on n'en connaît actuellement que quatre, et un seul a réellement donné lieu à une exploitation de cryolithe : le célèbre gisement danois d'Ivigut (Groenland). Fermé en 1963 après cent ans de production, il a été l'objet de sondages dans les années 1970 mais, malgré les espoirs que l'on avait de trouver de nouvelles réserves, on a dû se borner à écouler le reste du stock anciennement sorti, en en livrant au Danemark quelques dernières dizaines de milliers de tonnes/an pour l'industrie céramique jusqu'à son épuisement. En 1994, l'US Bureau of Mines a annoncé la découverte au Brésil, dans l'état d'Amazonas, d'un nouveau gisement de 3 Mt de réserves de cryolithe. Cette découverte n'a pas eu de suite à ce jour.

Reste la récupération de fluor à partir de l'acide fluosilicique qui est un des résidus de traitement des minerais phosphatés utilisés dans la fabrication des engrais. Que ces minerais soient d'origine sédimentaire marine, ignée alcaline, ou organique (guano), ils titrent en moyenne 3 % de fluor (piégé dans la fluorapatite). Une part de 40 % du fluor se retrouve dans l'acide fluosilicique, le reste étant inclus dans le phosphogypse et dans les engrais. Ce n'est que dans des pays producteurs de phosphates que l'on connaît actuellement des usines utilisant ces substituts : par exemple notamment aux USA, ou en Jordanie. En effet, mis à part l'intérêt économique de l'aspect recyclage sur les sites de production des phosphates, ce procédé est plus coûteux que le procédé à base de spath fluor. En outre, les réserves mondiales constituées par ces résidus potentiels de traitement du phosphate sont insuffisantes pour constituer une menace sur l'avenir de la fluorine dans la fabrication du fluorure d'aluminium.

La sellaïte MgF_2 titre 61 % de fluor mais elle n'a été à ce jour rencontrée en quantité industrielle et extraite que dans la mine de Fontante (Var), et il ne semble pas qu'elle puisse être considérée comme un substitut.

Pour les propriétés de fondant, on substitue parfois au spath métallurgique des borates comme la colemanite, du calcaire dolomitique, de l'ilménite, du manganèse, de l'olivine, de la potasse, ou des agglomérés ou briquettes composés d'oxydes d'aluminium (ou directement de bauxite), d'oxyde de calcium et d'oxyde de fer. Néanmoins, tous ces produits sont moins efficaces que la fluorine et la présence d'éléments acides (silice, alumine, colemanite) nuit à la désulfuration.

Comme source de fluor, des spécialistes ont avancé les possibilités de valorisation des gros gisements de topaze, villiaumite, bastnaésite, et même de charbon. Aucune de ces sources n'est l'objet de simulations économiques concrètes ni même envisagées actuellement :

- la topaze, fluosilicate d'aluminium de formule $Al_2[(F,OH)_2 SiO_4]$, titre en moyenne 20 % de fluor, et représente avec la fluorine le seul minéral fluoré vraiment largement réparti dans la nature ;
- la villiaumite, fluorure de sodium de formule NaF, constitue une source extrêmement rare (il en existe quelques petits gisements à peine : île de Los et trona de lacs tanzaniens ou kenyans) et son exploitabilité est donc tout aussi hypothétique ;
- la bastnaésite, carbonate fluoré complexe de formule $Ce[F/CO_3]$ est un minerai de cérium qui est parfois exploité mais sa teneur en fluor qui n'est que 8 % rend la récupération de cet élément possible seulement comme sous produit et dans des conditions de rentabilité incertaines ;
- les autres minéraux fluorés existants (herdérite, amblygonite, leucophane, apophyllite, phlogopite, lépidolite, zinnwaldite) ne sont pas relevés comme source de fluor possible en raison de leur rareté ou de leur teneur beaucoup trop faible ;
- quant aux charbons, l'idée de leur valorisation, qui reste tout à fait hypothétique aussi, repose sur des analyses qui ont donné jusqu'à 300 et même 600 ppm de fluor selon les gisements.

6. Le management environnemental de l'industrie du fluor

6.1. L'INFLUENCE DU CHLORE DES FLUIDES A CFC SUR LA COUCHE D'OZONE

La production mondiale des CFC était encore de l'ordre du million de tonnes par an à la fin des années 1980. Malheureusement, la stabilité chimique et moléculaire des CFC les préserve de toute réaction dans la troposphère, et ils finissent par atteindre la stratosphère où ils rencontrent des photons suffisamment énergétiques pour les dissocier en libérant du chlore. Les études de la haute atmosphère ayant mis en évidence l'*appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique* par le chlore ainsi que par le brome, les autorités politiques ont adopté en 1987 le *protocole de Montréal*. Celui-ci a limité la production des composés soupçonnés comme néfastes pour l'ozone, parmi lesquels la quasi-totalité des CFC.

Les dérivés fluorés sont classés en trois catégories en fonction de leur potentiel d'agressivité vis à vis de la couche d'ozone (l'ODP ou *Ozone Depleting Potential*) : les CFC sont très agressifs, les HCFC beaucoup moins (de l'ordre de 5 % des CFC) et les HFC pas du tout (absence d'atome de chlore).

Des mesures plus sévères ont été prises à Londres en 1990, puis à Copenhague en 1992, prévoyant l'arrêt de la production des CFC au plus tard en 1996. Finalement, la fabrication des CFC a été interdite à compter du 1.1.1996 pour les pays de l'Union Européenne, et de 2006 pour les pays en voie de développement.

C'est historiquement ce processus qui a entraîné le marasme économique sur le marché de l'acide fluorhydrique et par contrecoup sur celui du spath. Si le marché de l'acide fluorhydrique s'est aujourd'hui rééquilibré aux USA, il reste encore déprimé en Europe. Quant au marché du spath, il n'a pas encore retrouvé un équilibre « naturel » au plan mondial, même si une régulation le maintient en équilibre (taxes antidumping spath chinois au Mexique et en Europe).

6.2. LA CONTRIBUTION DES FLUIDES A HCFC A L'EFFET DE SERRE

Vers les années 1985, les physiciens de l'atmosphère ont établi une relation entre l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en « gaz industriels » (CO_2 , CH_4 , NO_x , O_3 troposphérique, CFC et HCFC) et l'accroissement de la température de la planète. Il s'agit de l'*effet de serre*. En particulier, les fluorocarbures contribuent à cet effet.

Pour les composés HCFC, qui comportent de l'hydrogène dans leur molécule et sont de

ce fait moins stables, les autorités ont décidé l'arrêt de la production en l'an 2020 pour les pays développés et en l'an 2040 pour les pays en voie de développement. En 1997 à Montréal puis en novembre 1998 au Caire (où participaient plus de 100 pays membres du protocole de Montréal pour le 10^e anniversaire du protocole) de nouvelles propositions furent faites pour anticiper et accélérer le retrait progressif des HCFC afin de réduire davantage l'effet de serre.

Toujours en novembre 1998 mais à Buenos Aires, la *United Nations Framework Convention on Climate Change* ou UNFCCC (convention du programme des Nations Unies sur le changement climatique) s'est réunie pour le choix des moyens nécessaires pour réduire les émissions de gaz à effet de serre suivant les décisions de la conférence de Kyoto. Bien qu'aucune mesure n'ait été prise à cette réunion, l'inclusion (depuis le protocole de Kyoto) des HCF, des perfluorocarbones et de l'hexafluorure de soufre dans la liste des gaz à effet de serre interpelle fortement les producteurs de spath fluor et l'industrie du fluor.

L'accélération du retrait a finalement été décidée, l'Europe voulant en cette matière aller plus vite que le reste du monde. Les dates de bannissement en Europe dépendent des produits : 2002 ou 2003 pour les « 140 », 2005 pour le « 22 » par exemple.

En attendant, dans la pratique, il existe des dérogations à l'interdiction du protocole de Montréal. C'est le cas de la Chine, et de certains cas où on a autorisé le recyclage.

En outre, la fraude est importante et on estime que la fabrication de ces produits a triplé depuis 1984, constituant aux USA la seconde source de fraude répertoriée après la drogue. La Russie en exporte illégalement des quantités importantes. La conférence du Caire de novembre 1998 n'a pas trouvé de parade à cette attitude que partagent sept autres pays de l'ex-URSS. Le 10 novembre 1999 un accord international a été signé en vertu du Programme des Nations Unies pour l'Environnement, qui demande aux états de créer un système de licences pour la vente à l'international de produits contenant des substances à effet couche d'ozone. Les licences porteront sur les CFC, le tétrachlorure de carbone, les halons, les hydrobromofluorocarbones, les hydrochlorofluorocarbones (HCFC) le bromure de méthyle et le chlorure de méthyle. En effet, on s'est rendu compte que la contrebande de ces produits a freiné l'introduction des substituts agréés couche d'ozone.

Les producteurs de spath soulignent néanmoins que, parmi les substances coupables, les gaz fluorés viennent pourtant loin derrière le CO₂. Dans le détail, ce sont en outre les HFC et non les HCFC qui posent le problème le plus sérieux vis à vis de l'effet de serre. La raison majeure est que de toute façon les HCFC (et les CFC) sont à terme bannis du fait de la réglementation couche d'ozone. En revanche, l'inclusion des HFC dans la liste des gaz à effet de serre menace directement le développement de ces produits censés remplacer les HCFC.

En outre, il y a polémique sur l'approche de ce problème. Si les HFC ont un effet direct

négligé sur l'effet de serre, ils ont un effet direct très positif par leurs applications dans les mousses isolantes notamment, qui contribuent aux économies d'énergie, donc à la réduction des émissions de CO₂, principal contributeur direct à l'effet de serre.

Quand on évoque les impacts de certains dérivés halogénés notamment les CFC sur la couche d'ozone atmosphérique et sur l'effet de serre, et les mesures qui ont été prises à leur encontre, il est important de souligner que le responsable de ces effets n'est pas le fluor mais le chlore. En outre, ces impacts environnementaux ne concernent que le secteur des fluides (gaz caloporteurs) et pas celui des autres débouchés de la chimie du fluor (plastiques, résines, solvants).

Pour achever le tour d'horizon des impacts environnementaux liés au fluor, nous donnerons un aperçu des avancements scientifiques et industriels les plus récents sur deux autres aspects.

6.3. LA REDUCTION DES EMISSIONS DE FLUOR DE L'INDUSTRIE DE L'ALUMINIUM

Dans le procédé de fabrication de l'aluminium (électrolyse de l'alumine dans un bain de cryolithe constitué d'un mélange de fluorures fondus à 950°C), les pertes en fluorures sont rejetées à l'état de poussières et de gaz fluorés. Ces émissions sont d'intensité variable et s'expriment en kilogrammes de fluor par tonne d'aluminium produite. La contamination des sols qui en résulte se répercute par des troubles chez de nombreuses plantes cultivées ou spontanées et chez les conifères (nécrose, troubles de la fructification et de l'évolution du tissu végétal, etc.). Par suite, elle s'accompagne d'une concentration du fluor dans les chaînes alimentaires des animaux domestiques qui se nourrissent de ces végétaux.

En France par exemple, dans la vallée de la Maurienne et sur le plateau de Lannemezan, où sont implantées des usines qui produisent de l'aluminium, les bovins étaient atteints de fluorose, affection caractérisée par des déformations osseuses, des lésions dentaires puis une cachexie fatale. Des cas d'affections professionnelles liées au fluor ont été constatés à l'époque où les émissions étaient encore insuffisamment contrôlées, c'est-à-dire jusque dans les années 1970.

Mais l'industrie française de l'aluminium s'est engagée à partir des années 1970-1980 dans la voie d'un effort considérable de la réduction des émissions fluorées, par le biais de la captation des poussières et des gaz fluorés. Les poussières sont maintenant recyclées vers la cuve d'électrolyse tandis que les gaz sont épurés par des filtres appropriés. En outre, les procédés d'électrolyse ont bénéficié d'améliorations techniques.

Le résultat a été une réduction des émissions par 20 en l'espace de 25 ans. Les progrès enregistrés dans la prévention des émissions fluorées ont permis d'amorcer une reconquête du tissu forestier des vallées montagnardes (Alpes, Pyrénées) qui sont en

France le berceau historique de l'industrie de l'aluminium.

Un rapport officiel de l'Office National des Forêts publié dans la Revue Forestière Française en mai 1994 concluait que le taux de fluor contenu dans la vallée de la Maurienne (Savoie) est tombé en 1993 à 15,9 ppm, valeur qui, selon l'O.N.F., "correspond au bruit de fond de toute grande agglomération industrielle", c'est-à-dire à un taux normalement rencontré dans de telles zones.

Ces résultats spectaculaires ne signifient pas qu'il ne reste pas des efforts à faire dans ces zones. Mais ils indiquent que la pollution du fluor par l'électrochimie de l'aluminium est aujourd'hui maîtrisée en France.

Au travers de la loi du 19 juillet 1976 relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) la France s'est dotée d'une législation qui permet d'assurer le contrôle des installations polluantes ou dangereuses en matière de protection de l'environnement, de sécurité et qui répond aux besoins d'information des populations. En cas de rejet accidentel de produits toxiques dans l'atmosphère et afin d'harmoniser les seuils de toxicité au niveau national, le ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement a notamment développé, en collaboration avec l'INERIS et l'Industrie Chimique, une méthodologie qui englobe le cas de l'acide fluorhydrique (cf. site Internet de l'INERIS : <http://www.ineris.fr/actualites/fluor.htm>).

6.4. L'ENVIRONNEMENT AU QUOTIDIEN SUR LES MINES, ET LE REAMENAGEMENT PROGRESSIF DES SITES PENDANT L'EXPLOITATION

L'industrie extractive du spath fluor est une activité extractive des plus banales, au plan de la protection de l'environnement comme au plan de la sécurité, et tant dans son volet mine que dans son volet traitement en usine. La surveillance réglementaire dont (comme les autres industries) elle fait l'objet en permanence, a montré qu'elle ne nécessite d'être régie que par les mêmes règlements, ni plus ni moins, que les autres activités extractives portant sur des minéraux industriels.

Ainsi en France, les exploitations de fluorine sont soumises au Code minier dans le cadre du régime des concessions minières, et à son règlement général des Industries extractives. Les Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) sont chargées de contrôler l'application de ces règlements sur le terrain. En outre, ces exploitations sont soumises, comme toute installation qui emploie du personnel, au Code du travail et au Code de sécurité sociale. Les usines de traitement de minerai sont régulièrement inspectées par les DRIRE dans le cadre de la loi sur les ICPE. Les DRIRE veillent à ce que les eaux d'exhaure des mines à ciel ouvert soient traitées avant leur rejet dans le milieu naturel, que les usines de traitement de minerai recyclent intégralement les eaux industrielles et qu'aucun effluent ne soit rejeté dans le milieu naturel. Les fumées des fours sont filtrées et le bon fonctionnement de la filtration est contrôlé.

Les mines à ciel ouvert bouleversent le paysage (près de 26 millions de mètres cubes de terrassements à ce jour pour les deux mines à ciel ouvert françaises en activité, Montroc et le Moulinal) mais celui-ci est remodelé par l'exploitant conformément aux plans préétablis, en accord avec les administrations concernées, les collectivités et les propriétaires du sol. Les aménagements sont variés : agricoles ou forestiers, création de zones de loisirs. Une particularité des pratiques en France est le réaménagement progressif, c'est-à-dire effectué à un bout de la carrière pendant que l'exploitation se poursuit à l'autre bout (exemple de Montroc).

Le réaménagement des mines souterraines est effectué, par l'exploitant sous contrôle de la DRIRE, selon le Code minier et suivant des normes très strictes définies par la circulaire du Département des Industries Extractives (DIE) n° 200 du 6 août 1991 du ministère de l'Industrie, Direction de l'Action Régionale et de la Petite et Moyenne Industrie, Sous-Direction de la Sécurité Industrielle.

Signe de ce souci permanent d'une gestion sûre et fiable de leur activité, en 1998 trois sociétés européennes ont obtenu la certification ISO 9002, Minersa (Espagne), SOGEREM (France) et Laporte (Royaume-Uni) qui a été repris par LRM.

7. Panorama français sur la fluorine

La fluorine est très répandue en France (cf. carte hors-texte) où elle est exploitée depuis plus d'un siècle. Son industrie représente actuellement un chiffre d'affaire de l'ordre de 100 MF et un effectif de 150 emplois directs, répartis principalement dans le Tarn et plus accessoirement dans l'Indre.

7.1. LA REPARTITION DES PRINCIPALES RESSOURCES EXPLOITABLES ET POTENTIELLES EN FRANCE

La plupart des gisements exploitables et des gisements exploités sont localisés en filons dans les massifs hercyniens ou en bordure immédiate de ceux-ci dans les premiers sédiments de la couverture mésozoïque transgressive sur le socle. Ils sont souvent liés spatialement à des fractures montrant une grande extension (principalement, sillons carbonifères et bordures de bassins d'effondrement ou de rifts permien ; en revanche, en bordure des bassins oligocènes on ne connaît que des indices). Ils sont encaissés dans les socles métamorphiques (granites, gneiss et migmatites) et plus rarement dans la couverture permienne vulcanisée des massifs hercyniens. Cet environnement géologique assez constant étant bien défini, l'autre caractéristique générale majeure de leur localisation est qu'ils ne sont pas répartis de façon uniforme sur tout le territoire.

Ainsi, la plupart des gisements économiques sont rassemblés dans différents districts dispersés dans le Massif central, et, avec une fréquence au km² comparable, dans les Maures-Tanneron-Estérel. A un moindre degré, de façon ponctuelle, des filons assez importants ont été découverts dans le socle des Vosges, ainsi que des imprégnations stratiformes subéconomiques dans des sédiments permien de ce massif (bassin de Saint-Dié). Les Ardennes ont fourni très ponctuellement quelques gîtes exploitables (Foisches).

Au contraire, on n'a pas noté de vocation économique pour la fluorine dans les Pyrénées (hormis le district considérable du Canigou, mais qui reste une trouvaille isolée à l'est de la chaîne des Pyrénées), ni dans les massifs cristallins externes des Alpes (hormis les filons du Rocheray en Savoie qui sont des gîtes très isolés aussi), ni en Corse (Monticello), ni dans le Massif armoricain (malgré une centaine d'indices trouvés). Les départements et territoires d'outre-mer en sont également exempts.

La couverture mésozoïque reposant sur le socle hercynien renferme des concentrations stratiformes de fluorine à basse teneur mais économiques en plusieurs points du Morvan, qui sont en attente d'une éventuelle exploitation. On ne connaît en revanche pratiquement pas de concentrations économiques exploitées ou potentielles dans les terrains géologiques plus récents.

7.2. LA PRODUCTION MINIÈRE FRANÇAISE

7.2.1. L'importante production minière passée

La France a produit de 1861 à aujourd'hui un tonnage de fluorine équivalent à 11 Mt CaF_2 , l'année record ayant été 1972 avec 370 000 t CaF_2 . Ce total repose sur 80 gisements de toutes tailles, ayant fourni individuellement de quelques milliers de tonnes de spath métallurgique jusqu'à plus d'1,5 Mt de spath chimique (BRGM, 1978). On trouvera dans le tableau 7 la liste et les caractéristiques des principaux d'entre eux (la coupure inférieure utilisée est 100 kt tout-venant de production + réserves).

a) La contribution de ce patrimoine à l'industrie française

Les gisements fluorés français ont connu trois "booms", le premier à la fin du XIX^e siècle avec l'apparition des procédés Bessemer et Siemens Martin pour la fabrication de l'acier, le second à partir de 1931 avec l'apparition des dérivés fluorocarbonés, et le troisième, majeur, dans la période qui va de 1950 à 1974 et où l'on enregistre une très forte croissance de la production de bauxite et d'aluminium en France. Dans cette dernière période les productions mondiales de bauxite sont d'ailleurs multipliées par 10. En 1974, elles atteignent 83,9 Mt de bauxite et 13,8 Mt de métal de première fusion et en France, la production de bauxite atteint un record historique de 3,4 Mt en 1973, au moment où celle de la fluorine est maximum (production record de 370 kt en 1972). A cette époque, la Chine commence à peine son essor de producteur de rang mondial sur le marché. Ce furent, comme pour beaucoup d'autres substances concessibles en France les années "glorieuses", comme le soulignent les auteurs de la carte minière de la France.

b) La contribution essentielle de ce patrimoine à l'optimisation des méthodes de prospection

Les gisements majeurs, de taille comprise entre 100 000 t et 4 Mt tout-venant, sont tous (sauf une exception) des gisements filoniens du type "filons en extension" et plus rarement du type "filons en cisaillement", types qui ont été décrits au chapitre 3.2.2. Ils n'auraient donc pas au plan typologique un grand intérêt mondial, s'ils n'avaient pas été dans les années 1970 l'objet d'études très fines qui ont été une contribution française décisive pour conforter dans le monde la "gîtologie" à son rang de science moderne des gisements minéraux, représentative de la seconde moitié du XX^e siècle, comme cela a été entériné par le congrès géologique international de Paris en 1980. Ces études ont en outre initié la démonstration de toute l'importance des circulations paléohydrologiques dans les socles en bordures de bassins, et le rôle des paléosurfaces continentales dans le contrôle des minéralisations économiques.

Mémento des roches et minéraux industriels : la fluorine

Gisements en activité (en caractères gras droits), en réserves (*caractères gras en italiques*) ou arrêtés classés par région (CO = mine à ciel ouvert, ST = souterraine)

Nom du gisement	Dépt.	Substance Exploitable	Type	Sociétés (date d'ouverture - date de fermeture)	Productions (P) Ressources (R) Teneur (T)
REGION CENTRE					
Chaillac (Le Rossignol)	36	F	ST	SIC (1976-actuel)	P : 500 kt CaF ₂ ; T : 50 % CaF ₂ R 150 kt CaF ₂
REGION BOURGOGNE					
Romanèche	71	Mn, F	ST	(1823-1919)	Plus de 400 kt Mn. T : 50 % Mn
Antully (Marquisat)	71	F, Ba	CO	SECME	P + R : 2 040 kt CaF ₂ T : 30 % CaF ₂
Argentolle	71	F, Ba	ST		P : 63 kt CaF ₂ , T : 50 % CaF ₂ R : 300 kt-CaF ₂
Courcelles-Fremoy	21	F, Ba	CIM		R : 960 kt CaF ₂ T : 35 % CaF ₂
Egreuil	58	F, Ba		SOGEREM (1977)	R : 800 kt CaF ₂ T : 35 % CaF ₂
Les Renauds	58	Ba, F		BRGM (1975-1976)	R 430 kt Ba SO ₄ et 200 kt à 30 % CaF ₂
Maine	71	F, Ba	ST	CFMU (1964-1980)	P : 480 kt CaF ₂ ; T 40 % CaF ₂ R : 50 kt CaF ₂
Marigny (sur Yonne)	58	F, Ba	CO	SPEMI (1929-1931)	P + R : 510 kt CaF ₂ , T 32 % CaF ₂
Pierre-Perthuis (Pontaubert)	89	F, Ba	CO	SECME	R : 2 505 kt CaF ₂ T 36 % CaF ₂
Voltennes	71	F, Ba	ST	Sté Min. d'exploitation fluorine (SMEF) (1961-1972) renoncé ?	P : 250 kt CaF ₂ ; T : 60 % CaF ₂
REGION LIMOUSIN					
La Charbonnière	87	F	ST	Cie Min. Dong-Trieu (renoncé ?)	P 350 kt CaF ₂ ; T : 60 % CaF ₂ R ?
REGION AUVERGNE					
Chavanac-Lafayette	43	F, Pb	ST	Pechiney (1968-1980) SECME (1980-1985)	P 310 kt CaF ₂ , T 40 % CaF ₂ 35 kt CaF ₂
Langeac (district)	43	F, Ba	ST CO	(1880-1975) SECME	1 100 kt CaF ₂ ; T 75 % CaF ₂
Le Beix	63	F	ST	Sté Teisset-Kessler (-1977)	360 kt CaF ₂ ; T : 80 % CaF ₂
Nizerolles	03	F, Ba	ST	Nizerolles SA (IMETAL)	P + R : 290 kt CaF ₂ T : 65 % CaF ₂
REGION MIDI-PYRENEES					
Campolibat	12	F, U		SOGEREM (1971-1975)	R : 500 kt CaF ₂ T : 50 % CaF ₂
Le Burc ou Le Burg	81	F, Cu	ST	SOGEREM (1953-)	P : 1 Mt CaF ₂ T : 70 % CaFe ₂ R : 1,0 Mt CaF ₂ T : 54 % Usine de capacité = 30 kt/an
Montruc	81	F, Cu	CO	SOGEREM (1964-)	P + R 2 Mt CaF ₂ (estimé) R : 1,5 Mt CaF ₂ T : 45 % CaF ₂ ; usine cap. = 85 kt/an
Moulinat	81	F, Cu	CO	SOGEREM ST (1946-1972) CO (1983-)	R : 1,2 Mt CaF ₂ T : 42 % CaF ₂ ;
Padiès	81	F	CO	SOGEREM (1989-1992)	P : 70 kt T : 60 % CaF ₂ R : 250 kt CaF ₂ (estimé)
Trébas	81	F, Cu	ST	Sté Min. de Trébas (1973-1980)	P : 175 kt CaF ₂ ; T : 75 % CaF ₂ R : 100 kt CaF ₂ ; usine cap. = 20 kt/an
REGION LANGUEDOC-ROUSSILLON					
Escaro	66	F, Ba	CO	(Denain Anzin Minéraux) puis	P + R en 1993 : 2 000 kt CaF ₂
Sahorre	66	F, Ba	CO	SECME (Pechiney) (1955-1993)	T : 56 % CaF ₂ ; usine à Olente
REGION PROVENCE-ALPES-COTE D'AZUR					
Fontsante	83	F	ST	SECME de Pechiney (1942-1987)	P 1750 kt à T 42 % CaF ₂ et 270 kt à T 85 % CaF ₂ R ?
Garrot La Madeleine	83	F	ST	Sté des Mines de Garrot (1960-1975)	P : 100 kt CaF ₂ T : 85 % CaF ₂
Pic Martin Saint-Daumas	83	F, Pb	ST	SIMFLUOR puis Sté des Mines de Garrot	P : 120 kt à 60 % CaF ₂ et 3 % Pb 25 kt Ba SO ₄
Maureville	06	F	ST	R.J. Antonioli puis Societa Miniera di Fragné (- 1986)	P : 80 kt spath métallurgique R : oui
REGION LORRAINE					
Maxonchamp	88 (70)	F	ST	Mines du Haut-du-Them	P 160 kt CaF ₂ ; T : 70 % CaF ₂ R ?
REGION RHONE-ALPES					
Bois Feuillet	73	F, Pb	ST	BRGM-SAINT-GOBAIN (1966-1968)	R 250 kt CaF ₂ , T 56 % CaF ₂ P 7 kt Pb + Zn, R 20 kt Pb + Zn
Saint-Etienne-de-Lugdunès	07	F, Ba	-	SOGEREM	R 120 kt CaF ₂

Tabl. 7 – Principales mines françaises de fluorine.
(coupure inférieure = production+réserves > 100 000 t tout-venant)

c) Les gisements historiques

L'exception géologique française a été le gisement d'Escaro, situé dans la commune d'Escaro à l'ouest de Vernet-les-Bains dans les Pyrénées-Orientales. Sa mine a fermé en 1991 et son usine en 1993. Le district du Canigou dont il est le fleuron vient en tête des régions productrices françaises avec 2 Mt de CaF_2 produites soit 20 % de la production française. Avec son voisin le gisement de Sahorre (situé sur la commune de Sahorre), il est encaissé dans des formations métamorphiques et se compose de nombreux corps minéralisés irréguliers de fluorine et quartz associés à sidérite et hématite, interprétés comme des corps (filoniens ou stratiformes à l'origine, la question n'est pas encore bien tranchée) qui ont été entraînés et déformés lors des plissements hercyniens puis lors du phénomène d'écaillage tectonique dans lequel ils ont été impliqués au Paléozoïque. Ils ont été exploités à ciel ouvert. Escaro a produit environ 3,5 à 4 Mt de minerai tout-venant titrant de 55 à 60 % CaF_2 . L'essentiel a été enrichi et commercialisé comme spath acide sauf 265 000 t vendues comme spath métallurgique à 70-75 % CaF_2 et 300 000 t de pellets à 45 % CaF_2 . Sahorre a produit environ 430 000 t de tout-venant à 55-60 %. Le minerai des deux mines était enrichi à l'usine de flottation d'Olette qui a appartenu à la société de concentrations de minéraux fluorés COMIFLUOR puis à Denain Anzin Minéraux et enfin à SECME.

Les autres gisements sont filoniens.

Langeac est le nom d'une commune et d'un gisement passé dans la postérité minière française, grâce son important champ filonien qui a été arrêté vers 1980, et qui a fourni une des plus grosses productions de fluorine en France avec environ 1 330 000 t de produits marchands, dont 800 000 t pour le seul faisceau filonien de Marsanges, 300 000 t de tout-venant dont 150 000 t de concentrés de spath acide pour le filon de la Dreyt, et 50 000 t de tout-venant dont 20 000 t de spath métallurgique pour le filon du Rouladou. Les filons étaient parallèles entre eux, dirigés NW-SE, et encaissés dans le socle gneissique du Haut Allier à proximité du bassin houiller de Langeac dirigé NE-SW. Avec le district voisin dit de Chavaniac-Lafayette qui a fourni un peu plus de 700 000 t de minerai à 40-45 % et 50 000 t de spath métallurgique, le district de Langeac a focalisé en Haute-Loire une activité extractive considérable pour le pays.

Le filon du Beix situé dans le Puy-de-Dôme sur la commune de Saint-Germain-près-d'Herment, à 7 km au NE de Bourg Lastic, est resté célèbre pour sa production d'un minerai d'excellente qualité (386 000 t de produits marchands titrant jusqu'à 95 % CaF_2) quasiment exempt d'impuretés, ses extraordinaires cristaux bleus ou bleu-vert, et son allure trapue (250 m de long sur 235 m de hauteur, puissance 4 m en moyenne).

Fontsante (Var) situé à mi-chemin entre Cannes et Fréjus sur la commune de Tanneron dans le socle gneissique du Massif du Tanneron était le principal champ filonien de la Provence cristalline. La mine a fermé en 1987. Composé d'une vingtaine de filons parallèles le gisement a fourni 1 750 000 t de minerai à 42 % CaF_2 (1971-1987)

concentrés sur place et 270 000 t de spath métallurgique (1925-1978). Une particularité était la présence de sellaïte MgF_2 dans certains filons où elle remplissait toute la caisse (1 m de puissance).

Dans l'Indre, le gisement du Rossignol à Chaillac a fourni un tonnage considérable (cf. chap. 7.2.3.). Il est actuellement en activité ralentie en attente de la remontée des cours.

Enfin, dans le Tarn, le district de l'Albigeois a eu (et continue à avoir) une place de poids dans la production de fluorine nationale avec les gisements du Burc (ou Le Burg), Montroc et Moulinal (cf. chap. 7.2.3.). Leurs voisins, le filon de Francimant, celui de Trébas et celui de Padiès ont été fermés respectivement en 1977, 1980 et 1992 mais les réserves du district ne sont pas épuisées et elles focalisent l'essentiel de la production nationale.

7.2.2. La structure actuelle de la profession et son bilan d'activité global

Les trois sociétés françaises exploitant actuellement la fluorine, sont, par ordre décroissant de tonnages produits :

- la Société Générale de Recherches et d'Exploitation Minières - SOGEREM (filiale du groupe Pechiney) installée dans le Tarn (81) ;
- la Société Industrielle du Centre - SIC installée à Chaillac et à Saint-Benoît-du-Sault dans l'Indre (36) ;
- les Mines du Haut du Them installées à Rupt-sur-Moselle dans les Vosges (88).

La production française de fluorine avait été, en 1995, de 352,4 kt de minerai contenant un peu plus de 150 kt de CaF_2 (et correspondant à une production marchande de 110 800 t). La production marchande est descendue en 1997 à 106 600 t. Depuis elle se maintient à ce niveau : pour 1999, on estime (chiffres USGS, 2000) la production de spath chimique à 82 000 t et celle de métallurgique à 25 000 t. Exprimée en milliers de tonnes, cette production a évolué, sur les 10 dernières années, selon le tableau 8.

Année	1989*	1990*	1991*	1992*	1993*	1994*	1995*	1996*	1997*	1998*
Extraction (xx)	450,4	514,7	399,7	296,2	237,2	350,9	352,4	295,4	250,3	224,6
Production march. de spath acide	161,4	145,8	125,6	118,0	96,2	104,5	102,3	78,0	84,1	80,8
Production de spath métallurgique	61,8	56,3	40,1	30,8	27,7	25,8	27,9	32,8	22,5	24,8
Production totale (kt)	223,2	258	188	131	130	131	125	111	107	106

Tabl. 8 - Evolution de la production française de fluorine .

(en kt ; Sources : * Association Professionnelle des Producteurs de Minéraux Industriels APPMI, de la Fédération des Chambres Syndicales françaises).

(xx) Les tonnages donnés en extraction sont de tout-venant brut, à teneur estimée de 40 à 50 % CaF_2 selon les années)

7.2.3. Les gisements actuellement exploités

Le nombre d'exploitations s'est considérablement réduit ces vingt dernières années. Cinq gisements de type filonien restent en production (données de décembre 1999) :

- deux d'entre eux sont encore activement exploités en mine à ciel ouvert, ce sont Montroc et le Moulinal près d'Albi (Tarn), appartenant à SOGEREM ;
- et un troisième l'est en souterrain : Le Burg (appelé aussi le Burc), près d'Albi (Tarn), appartenant à SOGEREM ;
- deux autres sont momentanément arrêtés et la production du site consiste en l'écoulement du stock déjà sorti (production de concentrés) ; il s'agit :
- du filon du Rossignol à Chaillac (Indre) appartenant à la Société Industrielle du Centre (SIC) ;
- et, avec un moindre tonnage, de Maxonchamp dans les Vosges appartenant aux Mines du Haut du Them, et dont M. Boruch Chomski est le concessionnaire en titre.

• *Montroc (Albigeois)*

Montroc est le fleuron du district de l'Albigeois qui constitue une province fluorée représentant plus de 5 Mt de minerai exploité. Les trois gisements qui y sont actuellement en activité sont à une quinzaine de kilomètres les uns des autres. Les filons de Montroc et du Moulinal sont très redressés, ils offrent un remplissage de fluorine assez peu colorée, très pure, légèrement siliceuse, peu ou pas barytique sur des épaisseurs pouvant dépasser 5 à 6 m. Le filon du Burc est réputé pour sa grande pureté et pour sa belle fluorine bleue qui a fourni des cristaux de renommée internationale.

Montroc est situé dans la commune de Montroc (Tarn), à 10 km au SW d'Alban, au bord de la retenue de la Razisse. Il est encaissé dans les schistes métamorphiques de l'Albigeois, au contact des schistes noirs ordoviciens de la Série Verte. Cette dernière forme le mur de l'important dyke quartzeux contre lequel s'appuie la formation fluorée, les schistes noirs, le toit de cette dernière. La minéralisation se présente sous la forme d'un filon de direction moyenne E-W avec un pendage 60 à 70° N. Le filon a été reconnu sur près d'un km de longueur et est connu sur 150 m de hauteur. Il est exploité à ciel ouvert et a déjà fourni plus de 2,9 Mt de tout-venant à 55 % de CaF₂ qui ont donné plus d'1 Mt de produits.

La minéralisation en fluorine atteint 10 à 15 m de puissance (7 à 8 m en moyenne). Il existe en outre des lentilles de fluorine orientées N 60° E localisées au toit du filon. Ces lentilles peuvent atteindre 10 m de longueur et 30 à 50 cm de puissance. Le quartz et la fluorine forment l'essentiel du remplissage. Associées à ces minéraux, on trouve notamment de petites quantités de chalcopryrite, de pyrite et de sidérite. Actuellement le

minerai titre en moyenne 42 % de fluorine. Les réserves sont évaluées au 31.12.1999 à 1,5 Mt CaF_2 avec une teneur de 45 % CaF_2 .

L'usine de flottation de Montroc, installée sur le carreau, a une capacité de traitement de 200 000 t correspondant à environ 80 000 t de produits marchands.

• *Le Moulinal (Albigeois)*

Plus à l'ouest, le filon du Moulinal est situé dans la commune de Rayssac (Tarn) à 8 km au sud d'Alban. Encaissé dans les schistes de l'Albigeois, il est dirigé sensiblement E-W, de pendage 70° N et s'étend sur un allongement de 1 500 m et une hauteur de 60 m. La fluorine constitue des lentilles sur une vingtaine de mètres de largeur au toit d'un dyke quartzeux et se développe sur des longueurs et des puissances variables. L'une d'entre elles a été suivie sur 100 m environ de longueur et 30 m de hauteur et atteignait jusqu'à 9 m de puissance. Le remplissage est constitué de quartz et de fluorine. On trouve notamment des minéraux cuprifères (chalcopyrite principalement) et ferrifères (sidérite et hématite). Des traces de barytine sont signalées.

Exploité à l'époque gallo-romaine pour le cuivre jusqu'à 25 m de profondeur, il a été exploité de 1946 à 1972 pour la fluorine en souterrain sur un allongement de 1 000 m, par la société d'électrochimie d'Ugine, fournissant 170 000 t de tout-venant à 80 % CaF_2 . Il était considéré comme épuisé en 1977. Il a été repris à ciel ouvert par SOGEREM en 1984, et le tonnage supplémentaire ainsi sorti en carrière s'élève actuellement à plus de 1 600 000 t d'un minerai titrant en moyenne 42 % de fluorine. Les réserves sont évaluées au 31.12.1999 à 1,2 Mt CaF_2 avec une teneur de 42 % CaF_2 .

La production cumulée annuelle des deux carrières, Montroc et Moulinal, varie, suivant les années, entre 200 000 et 300 000 t/an à 40 % de CaF_2 .

• *Le Burg (Albigeois)*

Le gîte est situé dans la commune de Paulinet (Tarn), à 6 km au SW d'Alban. Il est localisé au contact de la série verte et de schistes noirs attribués à l'Ordovicien, ces derniers formant le toit du filon. Celui-ci, orienté sensiblement EW (N 110° E) et penté à 65° N, a été reconnu sur 900 m de longueur et 235 m de hauteur, avec une puissance très variable de 2,50 m en moyenne pouvant atteindre 10 m. Des failles transverses N20° à N30° E tronçonnent le filon en trois colonnes subverticales. Les minéraux essentiels qui accompagnent la fluorine sont le quartz et la sidérose. A ces minéraux s'ajoutent notamment de la chalcopyrite et de la bornite localement abondantes au point de pouvoir être récupérées. A l'époque où la méthode d'extraction était encore peu mécanisée le minerai titrait en moyenne 70 % CaF_2 mais localement la teneur pouvait atteindre 95 % CaF_2 . Aujourd'hui le minerai produit titre en moyenne de l'ordre de

50 % CaF_2 . Les réserves sont évaluées au 31.12.1999 à 1,0 Mt CaF_2 avec une teneur de 54 % CaF_2 .

Le gisement a été exploité pour le cuivre avant l'époque romaine et au Moyen Âge. Exploité pour la fluorine depuis 1953 en souterrain, il est monté en production depuis les années 1970 fournissant jusqu'à ce jour plus d'1 Mt de tout-venant de qualité métallurgique à 70 % CaF_2 , dont une grande partie a été expédiée à l'usine de Pierre-Bénite (Rhône) pour la production de spath acide. L'exploitation est effectuée depuis 1979 par une méthode originale de tranches montantes remblayées à partir d'un puits qui dessert des niveaux successifs jusqu'à 235 m de profondeur. La production annuelle est en moyenne de 50 000 t à 53 % de CaF_2 .

Le minerai est traité sur le carreau du Burg, dans une laverie gravimétrique en milieu dense qui produit annuellement 20 000 t de concentrés. Une troisième usine était située à Trébas sur le gisement du même nom aujourd'hui épuisé. Elle a été arrêtée en novembre 1997 et démontée. Elle avait une capacité de 20 000 t et, après la fermeture de la mine de Trébas, elle était alimentée par le Burg et d'autres mines.

• *Le Rossignol (Marche)*

Le gisement du Rossignol est situé sur la commune de Chaillac (Indre) à 30 km au SW d'Argenton-sur-Creuse, à la bordure nord du Massif central et du district métallifère de la Marche où le socle paléozoïque, qui est recouvert par la couverture sédimentaire transgressive du Bassin parisien, recèle divers filons de fluorine qui ont été exploités (La Charbonnière, Chatenay, Le Perrault, Champotré, Baraize).

Encaissé principalement dans le socle gneissique du plateau d'Aigurande, il est constitué d'un filon de 1000 m d'allongement nord-sud penté à 70-80° W reconnu jusqu'à 250 m de profondeur actuellement, par travaux souterrains desservis par deux puits. A sa partie sommitale, il se ramifie et s'aplatit en filons couches (plateurs) plus ou moins concordants avec les dépôts de la couverture mésozoïque, qui passent latéralement, immédiatement à l'ouest, au gros gisement stratiforme de barytine de Chaillac-les-Redoutières, actuellement activement exploité par la société Barytine de Chaillac.

Le remplissage du filon est principalement de la fluorine, dite " fluorine ambrée ", avec une puissance moyenne de 2 à 3 m mais qui s'épanouit localement à 8 m. Il est parfois rubané, mais plus souvent bréchique, la fluorine étant alors associée à la barytine et à la roche encaissante sous forme de masses et d'une sorte de "béton gris". Le tout-venant titre de 50 à 60 % CaF_2 . Parmi les minéraux accessoires, on trouve quartz, hématite, pyrite, galène, et exceptionnellement blende et pyromorphite. Depuis 1920, le filon a été exploité successivement par la compagnie Schneider puis par les aciéries de Paris et d'Outreau et enfin par la SIC. Au total, il a produit environ 800 000 t de tout-venant à un rythme qui était de 25 à 30 000 t/an à la veille de la suspension de l'extraction en 1996, décidée à cause de la chute des prix et du dollar.

La SIC possède sur le carreau de la mine un lavoir gravimétrique en milieu dense d'une capacité de 25 t/h et depuis 1989 un atelier de flottation d'une capacité de 150 t/j. Son stock de 80 à 100 000 t en 1996 est en 1999 d'environ 30 à 40 000 t à 60-65 % CaF₂. Par concentration gravimétrique en milieu dense, elle obtient quatre qualités de spath :

- sable à 60 % CaF₂ ;
- concentré en gravillons de 6-15 mm dans deux gammes de teneur, 78-82 % et > 85 % (et plutôt 86-87 % CaF₂) ;
- concentré à 90-91 % en granulométrie de 1 à 6 mm ;
- grosses granulométries dont spath à 75 % ;
- et par flottation elle obtient des concentrés à 97, 98 % CaF₂ et au-delà.

• **Maxonchamp (Vosges)**

Le filon de Maxonchamp est situé à une dizaine de kilomètres au sud de Remiremont sur le versant sud de la haute vallée de la Moselle, sur les communes de Rupt-sur-Moselle (Vosges) et La Rosière (Haute-Saône). Découvert en 1933 et reconnu vers 1954, il a été mis en exploitation en 1959 par B. Chomski, qui était alors propriétaire de la mine de Ba, F, Mn du Haut-du-Them en Haute-Saône, d'où le nom de l'exploitant de l'actuelle concession de Maxonchamp : Mines du Haut du Them (décret du 19 août 1987 pour une durée de 15 ans).

Il occupe sur un allongement reconnu d'environ 600 m et une hauteur reconnue de 200 m environ une faille N 170°E avec zone broyée, dans le socle granitique et gneissique. La fluorine constitue le long de la zone broyée un chapelet de lentilles irrégulières pouvant s'épanouir jusqu'à 2,5 m de puissance. La partie nord de la caisse est la plus puissante, sur une distance de 250 m et une hauteur reconnue de quelques 200 m. La fluorine est souvent accompagnée d'un peu de galène, chalcopryrite, quartz, barytine, calcite.

Le filon a été exploité sur sept niveaux (les cinq supérieurs communiquant avec le jour) tantôt par chambres magasins d'environ 40 x 40 m (1000 à 2000 t par chambre) et tantôt par tranches descendantes obliques. Il a fourni le plus fort tonnage de fluorine des Vosges avec 150 à 200 000 t de tout-venant de bonne qualité métallurgique (la teneur ayant oscillé de 40 à 80 % CaF₂) enrichi dans un lavoir gravimétrique sur le carreau. Depuis 1971, on produit une première qualité (acidspar) triée à la main après criblage sommaire, et le reste (les ¾ du tonnage) est formé par des fines 0/20 récupérées par décantation. En 1992 environ 2500 t à 50 % de CaF₂ ont été extraites. La production a été depuis épisodique, et s'est limitée en 1999 à la vente de concentrés du stock. Fin 1999, les travaux ont été suspendus et les entrées de la mine ont été foudroyées ; le matériel roulant est parké sur le carreau où il reste un stock de minerai criblé et trié de moins de 3000 t à une granulométrie de 20-30 mm. L'existence de réserves en

allongement et en aval pendage est inconnue. On a néanmoins exploré, il y a quelques années, par sondages électriques et carottés-fond, le passage d'un filon parallèle.

7.2.4. Les réserves et les ressources

Les réserves françaises sont de deux types : des réserves vierges, non exploitées encore et dont la partie principale est à faible teneur, et des réserves correspondant aux racines de plusieurs filons à haute teneur déjà anciennement mis en exploitation mais dont le dépilage a été suspendu dans les années 1980 ou 1990 en raison de la chute des cours (exemples du filon du Rossignol, et du filon de la Charbonnière à Lussac-les-Eglises).

Les réserves vierges sont principalement constituées des gisements de fluorine stratiformes du Morvan, du gisement filonien de Bois Feuillet dans le massif cristallin du Rocheray en Savoie, et de quelques filons non encore exploités dans le Massif Central. Elles sont couvertes par des permis d'exploitation détenus notamment par la Société d'Entreprises Carrières et Mines de l'Estérel (SECME), filiale de Pechiney.

Lorsque la nécessité d'exploiter surviendra, les chiffres ci-dessous seront à réévaluer en fonction des paramètres économiques, réglementaires et environnementaux du moment, mais en attendant, ils peuvent fixer les idées dans une première approximation.

• *Pierre Perthuis (Morvan)*

Le district du Morvan est le plus ancien district productif français avec le gîte de Voltennes dont l'exploitation, aujourd'hui arrêtée, débuta en 1661 et fournit au total 920 000 t de concentré de fluorine (10 % environ de la production française). Les seules réserves exploitables certaines étaient évaluées en 1978 à 4,3 Mt et sont représentées principalement par les gîtes stratiformes localisés à la base de la série sédimentaire mésozoïque transgressive sur le socle, dans de petits lambeaux de grès, calcaires et dolomies laguno-lacustres attribués au Trias moyen ou supérieur (assise de Chitry).

Le gîte stratiforme de Pierre-Perthuis est situé sur la commune du même nom à 12 km au SW d'Avallon. Il est divisé en deux parties par la vallée de la Cure. Au total, il couvre environ 1 km² dont 48 ha exploitables. La puissance minéralisée est en moyenne de 3,5 m. Le site de la Pierre Percée, au bord de la Cure, est un pont naturel dont la voûte est coiffée par la formation fluorée silicifiée. Reconnu par sondages dans les années 1960, le gisement est vierge et son exploitation peut être effectuée à ciel ouvert. Les réserves étaient évaluées en 1978 à 4,8 Mt de minerai à 36 % CaF₂ et 9-15 % BaSO₄, riche en silice. Le tonnage de concentré récupérable était évalué à 1,25 Mt. Le taux de recouvrement est de 1,2/1. Au 31.12.1999, les chiffres de réserves des dossiers de SOGEREM tablent sur 2505 kt CaF₂ à une teneur de 36 % CaF₂.

• **Pontaubert (Morvan)**

Situé sur les communes de Pontaubert et Avallon à 3 km au SW d'Avallon, le gîte se compose de trois panneaux séparés par des thalwegs. La superficie exploitable en 1978 était de l'ordre de 30 ha avec une puissance minéralisée de 2 à 2,6 m. Les réserves ont été évaluées à 1,7 Mt de minerai à 38 % soit environ 650 000 t CaF₂ contenu, dont 500 000 récupérables. Le taux de recouvrement est de 1/1.

• **Marigny-sur-Yonne (Morvan)**

Situé sur la commune de Marigny (Nièvre) à 5 km au NW de Corbigny, le gisement est connu sur 2,5 km de long et 600 m de large. Il affecte l'assise de Chitry mais semble concentré localement dans des poches karstiques, qui ont ponctuellement donné lieu à des tentatives d'extraction artisanale (de 1929 à 1931 et de 1961 à 1964). Au total 10 000 t ont été exploitées par scheidage. Les réserves sont de 1,6 Mt à 32 % CaF₂ soit 500 000 t de fluorine contenue avec un taux de recouvrement de 3,3/1.

• **Egreuil (Morvan)**

Situé sur la commune d'Aunay-en-Bazois (Nièvre) à 12 km au SSE de Corbigny, le gîte s'allonge sur 2 km le long d'une fracture et sur 35 m de part et d'autre de cet accident. La puissance minéralisée varie de 2,5 à 6 m avec une moyenne de 4 m. La minéralisation comporte fluorine (41 %), un peu de barytine et de galène, et comme souvent dans le district, elle s'accompagne d'une intense silicification de l'assise de Chitry encaissante. Reconnu par sondages en 1977 par SOGEREM, il contiendrait 1 Mt de réserves probables à 40 % CaF₂ auxquelles s'ajouteraient un tonnage égal en possible.

• **Courcelles-Fré moy (Morvan)**

Situé sur les communes de Courcelles-Fré moy et de Thostes (Côte-d'Or) à 10 km au SW de Semur-en-Auxois, le gîte comporte deux panneaux séparés par la vallée du Serein et mesurant respectivement 300 000 et 217 000 m². La puissance moyenne est de 2 m à Villars-Fré moy et de 1,60 m à Thostes. Tout autour du panneau de Villars-Fré moy se développe aussi une auréole riche en barytine et contenant aussi de la fluorine. La minéralisation comporte outre la fluorine, de la barytine (24,3 % à Villars-Fré moy et 7 % à Thostes) et des traces de galène. Elle est accompagnée d'une silicification qui forme une carapace au-dessus du gisement. En 1978, celui-ci était concédé à la Compagnie Industrielle et Minière (CIM). Le panneau de Villars-Fré moy contient 1,66 Mt de minerai à 34,6 % CaF₂ et 24,3 % BaSO₄. Celui de Thostes contient 970 000 t à 39,7 % CaF₂ et 7,6 % BaSO₄. Au total, la quantité de CaF₂ contenu s'élève à 960 000 t, celle de BaSO₄ à 470 000 t. Il s'ajoute à ces chiffres 50 000 t de CaF₂ et 300 000 t de BaSO₄ dans l'auréole du panneau de Villars-Fré moy.

• **Antully (Morvan)**

Situé sur la commune d'Antully (Saône-et-Loire) à 10 km au SE d'Autun, le gîte est encore d'allure stratiforme et situé dans des arkoses et grès triasiques. Il constitue deux panneaux distants de 3 km : le panneau de Marquisat à l'ouest et celui de Charbonnière à l'est, couvrant respectivement environ 40 et 30 ha. La puissance moyenne est de 3,2 m. La minéralisation comporte, outre la fluorine formant le ciment des grès, un peu de barytine et de galène. Le panneau du Marquisat a été reconnu par sondages de 1966 à 1972, celui de la Charbonnière a été l'objet d'une attaque à ciel ouvert par SOGEREM en 1978. En 1978, les réserves du Marquisat étaient évaluées à 3,5 Mt de minerai à 34 % CaF_2 , avec un taux de recouvrement de 2,4/1. A la Charbonnière les travaux de développement de 1978 ont indiqué des possibilités de réserves de l'ordre de 1,4 Mt de minerai à 32 % CaF_2 avec un taux de recouvrement plus important qu'au Marquisat (5/1). Des extensions à plus faible teneur (15-20 % CaF_2) sont également connues. Au 31.12.1999, la concession minière d'Antully est détenue par la SECME, et les chiffres de réserves des dossiers de SOGEREM tablent sur 2040 kt CaF_2 à une teneur de 30 % CaF_2 .

• **Las, Mezeret, Vouchot et les Renauds (Morvan)**

Situés dans la Nièvre, les gisements de type filonien de Las, Mezeret, les Renauds et Vouchot se trouvent respectivement sur les communes de Chiddes, Tazilly et Semelay (près de Luzy), et Corancy (4 km à l'est de Château-Chinon). Ils ont été reconnus par sondages et parfois quelques travaux miniers (SOGEREM ou SECME sauf les Renauds par le BRGM) mais ils ne sont pas encore exploités. Les réserves sont évaluées respectivement à 80 000 t à 45 % CaF_2 à Las (filon Libosse), 100 000 t à 50 % à Mezeret, 220 000 t à 45 % à Vouchot et 200 000 t aux Renauds (ici marginales et associées à un gîte filonien de barytine ; le tout-venant titre 19,93 % CaF_2).

• **Nizerolles (Forez)**

Situé dans le Nord Forez sur la commune de Nizerolles (Allier) à 15 km au sud de la Palisse, le filon est encaissé dans le granite du Mayet-de-Montagne et occupe une grande zone broyée silicifiée et argilisée orientée NW-SE. L'allongement total reconnu est de 2 500 m mais le minerai exploitable constitue deux colonnes de respectivement 200 et 400 m de longueur à l'affleurement, de 2 à 3 m de puissance et fortement inclinées vers le NW, qui ont été reconnues par sondages par Pechiney jusqu'à 200 m de profondeur. Le remplissage titre 70 % CaF_2 et comporte principalement de la fluorine avec un peu de quartz, de barytine et de galène. Dans les années 1970, le gisement a fait l'objet d'un début d'exploitation, suspendu après des problèmes de venues d'eau ; le tout-

venant était enrichi à l'usine de flottation de Langeac. Les réserves qui n'ont pas fini d'être dépillées seraient encore importantes, de l'ordre de 200 à 400 000 t à 70 % CaF_2 .

• **Bois Feuillet (Massif du Rocheray)**

Situé en Savoie sur la commune de Jarrier à 2 km au nord de Saint-Jean-de-Maurienne et de ses usines électrochimiques, le filon fait partie d'un champ de filons parallèles à fluorine, plomb et zinc encaissés dans le socle du massif du Grand Chatelard juste sous sa couverture triasico-liasique. Dirigé NE-SW et subvertical, il est reconnu par galeries et sondages sur 500 m d'allongement et 425 m de dénivelée. On y distingue deux colonnes principales de 400 et 120 m de long respectivement, avec 220 m de hauteur et 2 m de puissance moyenne. Le remplissage comprend principalement fluorine et quartz, avec un peu de galène et de blende en quantités récupérables, et barytine, calcite, pyrite, marcassite, chalcoppyrite. Les réserves reconnues par un syndicat de recherches BRGM-Pechiney de 1962 à 1968 sont évaluées à 450 000 t de tout-venant à 56 % CaF_2 , et 4 % Pb+Zn soit 250 000 t CaF_2 , et 18 000 t Pb+Zn métal. Des réserves possibles de minerai à faible teneur (25-30%) existeraient dans le filon du Sapey voisin.

• **Saint-Étienne de Lugdarès (Velay)**

Situé dans l'Ardèche sur la commune de Saint-Etienne-de-Lugdarès à 35 km à l'ouest d'Aubenas, le gîte fait partie du petit district fluoré de Saint-Laurent-les-Bains. Il est localisé dans les migmatites du Velay et s'aligne sur une grande fracture E-W. Il est composé de trois filons irréguliers inclus dans la même caisse. L'ensemble est orienté E-W et a été suivi en surface sur un allongement d'environ 1 000 m. La minéralisation comporte essentiellement quartz et fluorine. Le gisement a été exploré par SOGEREM par sondages et travaux miniers préparatoires jusqu'en 1978. Les réserves étaient évaluées alors à 240 000 t à 50 % CaF_2 .

• **Compolibat (Rouergue)**

Situé dans l'Aveyron sur la commune de Compolibat, le gîte fait partie du petit district du Rouergue qui comprend les filons de fluorine anciennement exploités de Valzergues (16 km au nord) et du Kaymar (30 km au NE) célèbres pour leurs cristaux de fluorine jaune, et divers gisements de barytine. Le gisement de Compolibat est un filon encaissé dans la faille bordière qui limite à l'est le horst de Villefranche-de-Rouergue, dans des schistes du socle métamorphique. Il est dirigé N 10° E avec un pendage de 80°W, et se compose d'un faisceau de veines plus ou moins nombreuses et discontinues au sein d'une masse bréchique et mylonitique de 20 m de puissance. La minéralisation est connue sur 1 000 m d'allongement et 65 m de dénivelée. Elle comprend, avec la fluorine, des traces de barytine, pyrite, galène, blende et oxydes de fer. La teneur en CaF_2 varie de 15 à 65 % et elle est en moyenne de 30 %. Le gîte n'a jamais été exploité.

Exploré par sondages jusqu'à 65 m de profondeur au cours des années 1971-1975 par SOGEREM, il contient 300 000 t de réserves certaines à 30 % CaF₂, auxquelles s'ajouteraient 1 Mt de réserves probables et 300 000 t de réserves possibles à même teneur.

7.3. L'APPROVISIONNEMENT DE LA FRANCE, SA CONSOMMATION ET LE COMMERCE EXTERIEUR

La France est autosuffisante grâce à ses mines en activité et à ses importantes réserves et ressources, de qualités répondant bien aux spécifications du marché.

La demande de spath acide pour l'industrie chimique est en croissance modérée, mais celles de spath acide pour l'aluminium et de spath métallurgique pour l'acier sont restées à peu près stables en France. Les principaux débouchés sont la chimie (HCFC) et la sidérurgie (fondant dans les aciéries électriques tant pour la fusion que pour l'affinage en poche). Les quantités consommées pour la soudure et le verre sont bien moindres. La synthèse des fluorures d'aluminium pour servir d'électrolyte dans les usines d'électrolyse pour la production d'aluminium n'est pas effectuée en France.

La consommation française apparente est de l'ordre de 100 000 t/an (spath chimique 80 %, spath métallurgique 20 %) mais depuis 1991 elle continue à décroître rapidement (tabl. 9) :

Année	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Consommation (kt)	156,5	122,0	120,7	129,1	112,6	76,3	79,9	81,0

Tabl. 9 - Consommation française de fluorine de 1991 à 1998.

(Source : *Rapports d'activité 1992-1999 de la Fédération des Minerais et Métaux*).

Dans l'Union Européenne, la production a été divisée par deux entre 1986 et 1995, passant de 847 400 t à 417 490 t. Elle est remontée à 436 kt en 1997. Les cinq principaux producteurs sont la France, l'Espagne, l'Italie avec chacun une production annuelle de 100 à 120 kt, puis la Grande-Bretagne et l'Allemagne avec une production plus faible. L'Union Européenne reste un gros importateur de fluorine ("acidspar" et "metspar") en provenance de Chine, Afrique du Sud, Mexique, Maroc, Kenya et Namibie.

La France est nettement exportatrice avec sa production de 106 kt en 1998 alors que sa consommation n'a été que de 81 kt. Les importations et exportations françaises pour les années 1990-1998 sont résumées dans le tableau 10.

Comme grandes tendances, on relève que depuis quelques années, les importations (qui s'expliquent par la concurrence mais sont au demeurant modestes) tendent à diminuer tandis que les exportations tendent davantage à se diversifier vers des pays hors de l'UE.

Un recul très sensible des ventes de fluorine de qualité chimique *intra muros* en France s'est fait sentir lorsqu'en novembre 1995 ont été fermés les ateliers de fluorure d'Aluminium-Pechiney et ceux d'acide fluorhydrique de Rhône Poulenc sur le site de Salindres (Gard). Une compensation a été alors recherchée à l'exportation, vers la Tunisie et l'Italie notamment.

Au début de la décennie 1990 les exportations portaient davantage sur le métallurgique, et cette tendance tend à s'inverser en faveur du chimique. L'augmentation des ventes après 1994 correspond aussi à l'effet positif des mesures antidumping à l'encontre de la concurrence chinoise.

(milliers de tonnes)	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
importations									
- Acide	18,3	27,1	2,6	10,2	0,4	0,5	0,6	1,0	0,2
- Métallurgique	0,2	1,5	3,6	5,0	7,0	6,4	3,8	5,2	5,8
<i>Mexique</i>	0	0,7	1,2	0,6	2,2	2,7	3,3	4,6	2,4
<i>Chine</i>	0	0	0	0,4	0,5	0	0	0,3	0
Total importations	18,4	28,5	6,2	15,2	7,4	7,0	4,3	6,2	6,0
exportations									
- Acide	14,8	10,0	9,0	7,9	7,5	12,7	17,8	26,9	15,6
- Métallurgique	25,5	22,0	14,4	12,6	9,8	13,5	13,0	8,6	8,1
<i>Allemagne</i>	3,6	3,7	3,6	0,9	0,9	0,5	0,5	1,1	0,5
<i>Italie</i>	17,1	16,0	9,2	8,9	6,0	9,1	7,9	6,5	6,3
<i>Autres UE</i>	3,4	2,1	1,4	2,7	0,7	0,7	0,7	0,4	0,9
Total UE	24,1	21,8	14,2	12,5	7,6	10,3	9,1	8,0	7,7
<i>Slovénie</i>				0,02					
<i>Turquie</i>					0,5				
<i>Cameroun</i>				0,04					
<i>Venezuela</i>				0,01					
<i>Inde</i>				0,02					
Total exportations	40,2	32,0	23,4	20,5	17,3	26,2	31,0	35,5	23,7

Tabl. 10 - Importations et exportations françaises de fluorine de 1990 à 1998.
(en milliers de tonnes ; source : Eurostat).

7.4. LA PROCEDURE ANTIDUMPING EUROPEENNE

Le besoin impérieux de devises incite certains pays à économie planifiée (ou anciennement à économie planifiée) qui ne connaissent pas les contraintes économiques, sociales et environnementales des pays occidentaux, à augmenter leurs parts de marché sur les matières premières en pratiquant des prix très bas. Cette manœuvre est maintenue

jusqu'à élimination de tous les concurrents. Parvenus ainsi à une situation de monopole, ils peuvent alors relever leurs prix. Pour le tungstène et l'antimoine, ce fut l'attitude de la Chine il y a quelques années. Ce pays a renouvelé la tactique pour la fluorine.

Mais désormais les lois internationales prévoient que lorsque les prix atteignent le niveau du dumping, les autres pays producteurs ont la possibilité d'engager des procédures antidumping. C'est pourquoi, en avril 1992, sur une plainte déposée par Eurométaux, la Commission des Communautés Européennes a ouvert une procédure antidumping concernant les importations de spath fluor originaires de la Chine.

En mars 1994, une mesure communautaire a fixé un prix plancher de 113,5 écus/t filtercake base sèche, valeur entrée Union Européenne. La conversion en dollars dépend du taux de change ; en 1995 la conversion donnait 147 USD/t ; en janvier 2000, avec la remontée du cours du dollar, la conversion (l'écu ayant été remplacé à valeur égale par l'Euro) donne de l'ordre de 115 USD/t. Cette mesure communautaire prenait fin le 6 mars 1999, mais sa reconduction (à l'identique) a été prise le 18 septembre 2000 (règlement n° 20.11/2000). Heureusement pour les producteurs européens, le marché fluctue largement au-dessus de ce prix-plancher, en fonction de la qualité du produit offert. Mais il reste une sécurité.

Le spath métallurgique n'est malheureusement pas couvert actuellement par une action antidumping. Ce serait de toute manière difficile à codifier en raison des produits de qualités trop variables qui sur ce marché peuvent répondre aux spécifications industrielles.

Au sein la profession européenne (comme l'indique Peter Huxtable dans *The Mining Journal Ltd* 2000), comme au Mineral Resources Policy Sector de EuroGeoSurveys (l'association des Services géologiques de l'U.E.), on espère que les récentes initiatives volontaires de la profession et les recommandations données en 2000 par la DG Entreprise à la Commission Européenne sur le développement durable viennent de créer un contexte plus favorable à une reprise de cette industrie en Europe comme on la voit déjà dans l'Amérique du Nord et en Asie.

Conclusion, perspectives d'évolution

L'industrie de la fluorine joue un rôle important dans le monde, et la place de l'Europe occidentale, et celle de la France en particulier, sont bonnes.

Avec des réserves en quantité importante, la France est assurée d'une autonomie pour ses besoins pendant plusieurs décennies au rythme actuel de consommation, et de possibilités d'exportation si la concurrence est loyale.

La situation des producteurs européens qui a été soulagée par la décision de la Commission Européenne de septembre 2000 sur la prolongation de la mesure antidumping envers le spath acide chinois et par les taxes internes mises en place par la Chine elle-même, est maintenant dans l'attente des modalités précises des législations environnementales concernant la protection de la couche d'ozone et surtout l'effet de serre.

Les décisions prises dans le domaine de l'environnement pèsent de façon importante sur l'avenir de l'industrie du spath fluor. Le niveau de production des dérivés fluorés (HCFC et HFC) en France sera directement fonction des réglementations adoptées en Europe et en France pour la protection de la couche d'ozone et contre l'effet de serre. Le marché du spath fluor en France en dépendra directement.

Les spécialistes indiquent que la demande mondiale de l'industrie chimique des dérivés du fluor devrait continuer à croître. Outre la mise au point de fluides de substitution, il reste aussi à ce secteur le champ très prometteur des plastiques et des solvants.

La demande de l'industrie de l'aluminium devrait, elle aussi, conserver voire accroître son importance. En revanche, le marché de la sidérurgie reste moindre et stationnaire.

Remerciements

- en France :

(à la SOGEREM) à Patrick Bretin et Olivier Jullin pour la cordialité de leur accueil et leurs contributions dévouées et essentielles au fond et à la forme du texte, à Philippe Bains et Michel Mascarino pour les visites en mine ;

(à la Société Industrielle du Centre) à Jean-Pierre Chambard, Joël Jamet et Emmanuel Hertz pour la qualité de leur accueil et les renseignements détaillés fournis ;

(aux Mines du Haut du Them) à Boruch Chomski qui a bien voulu relire le manuscrit ;

- au Mexique :

à Luis Chavez, Director General, et Sergio Almazán, Director de Operación, COREMI ;

à Eduardo Rodriguez Luna, CEDOREM ;

- en Grande Bretagne :

à Greg Chapman, British Geological Survey ;

- en Namibie :

à Gabi Schneider, Ministry of Mines and Energy.

Bibliographie

Anonyme (1997) - CFC. Remplacement des CFC (chlorofluorocarbones) et développement de technologies alternatives dans le secteur du froid et de la climatisation. Site Internet du CENERG (Centre d'Etudes Energétiques de l'Ecole nationale supérieure des Mines de Paris, <http://www.emse.fr/environnement/fiches/00066.html>)

Anonyme (1999) – Le protocole de Montréal. Site Internet du Secrétariat des Nations Unies pour l'ozone <http://www.unep.org/ozone/mont t fr.htm>

Anonyme (1999) – CFC et HCFC. Transition et substitutions. Le guide pratique de l'environnement à l'usage des PME-PMI. Site Internet de l'Ass. Orée (Entreprises et Collectivités :Partenaires pour l'Environnement) <http://www.oree.org/PRATIQUE/CA-F21.htm>

Anonyme (1999) – Retrait progressif des CFC des produits médicaux de Rhône Poulenc Rorer. Site Internet Rhône Poulenc <http://www.rhone-poulenc.com/framf/nw980087.htm>

Anonyme (1999) - Laporte Minerals under new ownership. *Industrial Minerals*, Late News, Fillers and Extenders, december 1999, p. 74.

Anonyme (1999) – Accord politique européen sur l'avenir des CFC et des HCFC. Décisions du Conseil des Ministres de l'Union Européenne du 21.12.1999. Substituts aux CFC et aux HCFC. Site Internet Dehon Contact, <http://www.g-bourqu1.fr/cfc.htm>

Anonyme (2000) – Les matières premières minérales, édition 1999. Référence « Chiffres clés », Observatoire des Matières Premières, Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, 202 p.

Anonyme (2000) – Promoting sustainable development in the EU minerals industry, outlining the contribution and role of EuroGeoSurveys. *EuroGeoSurveys Opinion*, EGS Mineral Resources Policy Sector, Brussels, 15 january 2000, 4 p.

Anonyme (2000) – Promoting sustainable development in the EU non-energy extractive industry. Communication from the Commission, n° COM(2000) 265, Commission of the European Communities, Brussels, 20 p.

Armines (1999) – Le protocole de Montréal relatif à des substances appauvrissant la couche d'ozone. Site Internet de l'association Armines de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de St-Etienne : <http://www.agora21.org/ozone/ozone07.html>

Béziat P., Bornuat M. (1994) - Carte minière de la France métropolitaine à 1/1 000 000. *Ed. BRGM*, une carte 116 x 106 cm et sa notice explicative, 102 p.

- Blès J.-L. (1982) - Etude structurale des schistes et des filons de fluorine de l'Albigeois. *Documents du BRGM*, n° 36, 58 p., 8 pl. h.-t.
- Bonte J. (1995) - Etude de la pollution atmosphérique par les composés fluorés au voisinage des usines d'aluminium. Rapport Ministère de l'Agriculture, INRA.
- Bouladon J., de Graciansky P.Ch. (1985) - Les minéralisations dites de couverture (plomb, zinc, cuivre, uranium, barytine, fluorine,...) du Trias au Pliocène, en France. Leurs relations avec les phénomènes connexes de l'ouverture de la Téthys et de l'Atlantique nord. *Chron. Rech. Min.*, n° 480, p. 17-33.
- BRGM (1998) - European Minerals Yearbook, 2nd edition, 1997. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg 1998, pp. 14 et 232-238.
- Calas G. (1971) - Etude des fluorines zonées de Valzergues (Aveyron) : principe d'un thermomètre géologique basé sur l'étude de centres colorés. Thèse Doct. 3^e Cycle Sciences nat., option Minéralogie, Univ. Paris VI, 60 p.
- Canon S.A. (1999) – EOS Series. Site Internet sur les propriétés et la fabrication des objectifs photographiques Canon de la série EOS en fluorine synthétique, <http://eosseries.ifrance.com/eosseries/serieI/serieL.html>
- Carroué J.-P. (1978) - Le gîte de barytine des Renauds (Sémelay, Nièvre). Rap. BRGM n° 78 RDM 006 FE.
- Cartier A., Huard M. (1980) - Les gisements de fluorine d'Escaro et de Sahorre (Pyrénées Orientales). Livret-guide Excursion 203C, Actes du 26^e Congrès géol. intern. Paris, fasc. G22, pp. 56-62, éd. BRGM.
- Chambre Syndicale de l'Aluminium (1996) - Aluminium, Santé et environnement. Pechiney.
- Chermette A. (1986) - La fluorite. Ed. Gaston Lachurié, Paris, 172 p.
- Chermette A. (1995) - Où en est le spath fluor ? *Mines et Carrières, Industrie Minérale*, vol. 77, août-septembre 1995, p. 32-34.
- Chbihi A., Gmira A. (1998) - La fluorine au Maroc : cas de la mine d'El Hammam. *Chronique Recher. Min.*, n° 531-532, p. 117-126.
- Claret J.-L. (1995) – Retour d'expérience : l'ammoniac et la réfrigération. Rapport réf. SEI/BARPI-ED0389 février 1995, Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles, Service de l'Environnement Industriel, Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques (SEI/DPPR) du Ministère de l'Environnement, Imprimerie Nationale, 127 p.

- Collectif (1999) – Fluorspar '99, Abstracts and biographies, 9-11th may 1999, San Luis Potosí, Mexico. Abstracts of the Industrial Minerals' 6th international fluorspar conference, *Industrial Minerals*, may 1999, p. 51-55.
- Couturier P., Fortuné J.-P., Vassal M. (1980) - Les gisements de fluorine de Mont-Roc et du Burc (Tarn). Livret-guide Excursion 203C, Actes du 26^o Congrès géol. intern. Paris, fasc. G22, p. 158-163, éd. BRGM.
- Fédération française des Minerais et métaux (1999) - L'industrie des minerais, minéraux industriels et métaux non ferreux. Chiffres-clés 1998. Ed. octobre 1999, Paris.
- Féraud J. (1994) - Les gisements minéraux de la feuille Fréjus-Cannes. In : Toutin-Morin et coll., Notice explicative de la Carte Géologique à 1/50 000 (2^o édition), éd. BRGM.
- Fulton R. B. (1998) - Fluorspar. *Industrial Rocks and Minerals*, nov. 1998, p. 107.
- Goossens J. (1991) - La mine de fluorine du Rossignol à Chaillac (Indre). Congrès de la Soc. Industrie Minérale Poitiers 1991. *Mines et Carrières*, octobre 1991, p. 48-49.
- Guillou-Gotkovsky E. (1999) - La mine de fluorine de Valzergues, Aveyron. Un vol. x+230 p., 400 photos, ill., impr. Ed. de la Drouette, Etienne Guillou éd., Le Perray-en-Yvelines, E-mail eguillo@club-internet.fr
- Harben P. W. (1999) - Fluorspar. *The Industrial Minerals HandyBook* third edition, a Guide to Markets, Specifications & Prices. Industrial Minerals Information Ltd., Worcester, Surrey, UK, p. 75-79.
- Hodge B. L. (1998) - Fluorspar. Metals and Minerals Annual Review 1998. *Industrial Minerals*, p. 131-132.
- Hodge B. L. (1999) - Fluorspar. Industrial Minerals Annual Review 1999. *Industrial Minerals*, p. 125-126.
- Huxtable P. (1998) - European acidspar : an overview of production. *Industrial Minerals*, may 1998, p. 49-53.
- Huxtable P. (2000) - Fluorspar. *Mining Annual Review 2000. The Mining Journal Ltd*, 4 p.
- Jébrak M. (1985) - Contribution à l'histoire naturelle des filons F-Ba du domaine varisque français et marocain : essai de caractérisation structurale et géochimique des filons en extension et en décrochement. *Document BRGM n° 99*, 510 p.

- Jébrak M. (1996) - Manuel de gîtologie (mise à jour 1999). Département des Sciences de la Terre, Université du Québec à Montréal, Canada. Site Internet <http://www.unites.uqam.ca/sct/gitologie/mjg0.htm>.
- Journal Officiel des Communautés européennes (1992) - Avis d'ouverture d'une procédure antidumping concernant les importations de spath fluor originaires de république populaire de Chine. *J.O.* n° C 105 du 25.4.1992, p. 23-24.
- Lécuyer P. (1972) - Méthodologie de la prospection du fluor par hydrogéochimie. Rap. BRGM 72MET/GCA 006 (confidentiel).
- Lhégu J. (1975) - Etude de la disponibilité et des besoins futurs en minerais fluorés compte tenu de la lutte antipollution et de nouvelles applications possibles. Rap. pour la Commission des Communautés Européennes, BRGM, n° 75 SGN 125 MET, inédit, viii + 105 p.
- Lhégu J. (1978) - Les ressources de la France en fluorine. Collection Les Gisements miniers français, Comité de l'Inventaire des Ressources Minières métropolitaines. Rap. BRGM.
- Lhégu J., Soulé de Lafont (D. (1980) - Les gisements stratiformes de fluorine du Morvan. Livret-guide Excursion 203C, Actes du 26° Congrès géol. intern. Paris, fasc. G22, pp. 17-23.
- Lhégu J., Touray J.-Cl. éd. (1980) - Les gisements français filoniens et stratiformes de fluorine et de barytine. Livret-guide Excursion 203C, Actes du 26° Congrès géol. intern. Paris, fasc. G22, p. 5-62, éd. BRGM.
- Lhégu J., Jébrak M., Touray J.-Cl. (1988) - Fluorite and barite deposits in France. Proc. 7th IAGOD Symposium, éd. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller, Stuttgart), p. 297-307.
- Lougnon J. (1985) - Contribution à la connaissance de la gîtologie de la région Vosges-Alsace-Moselle après 14 années de prospection de la part du BRGM. Rap. BRGM n° 85 DAM 038 OP4, 580 p., juillet 1985 (Maxonchamp p. 313-316).
- Martini J.E.J., Hammerbeck E.C.I. (1998) - Fluorspar, *in* The mineral resources of South Africa (M.G.C. Wilson & C.R. Anhaeusser, eds) : 6th edition, Handbook 16, Council for Geoscience, Silverton & Pretoria, p. 269-279.
- McCaffrey L. P. (1998) - Distribution and causes of high fluoride groundwater in the western Bushveld area of South Africa. PhD, Department of Geology, University of Cape Town, Rondebosch, South Africa.

- Meary A., Touray J.-Cl., Galland D., Jébrak M. (1985) - Interprétation de l'anomalie en Europium des fluorines hydrothermales ; données de la résonance paramagnétique électronique : application au gîte de fluorine de Montroc (Tarn, France). *Chemical Geology*, n° 48, p. 115-124.
- Miller M. (1998) - Fluorspar. *USGS Mineral Commodity Summaries*, january 1998, p. 61.
- Miller M. (1999) - Fluorspar 1998 Annual Review. *USGS Mineral Industry Surveys*, june 1999, p. BB1-BB13.
- Miller M. (1999) - Fluorspar in the first quarter 1999. *USGS Mineral Industry Surveys*, june 1999, p. 1-3.
- Miller M. (1999) - Fluorspar in the second quarter 1999. *USGS Mineral Industry Surveys*, november 1999, p. 1-4.
- Miller M. (2000) - Fluorspar in the fourth quarter 1999. *USGS Mineral Industry Surveys*, march 2000, p. 1-4.
- Miller M. (2000) - Fluorspar. *USGS Mineral Commodity Summaries*, february 2000, p. 64-65.
- Miller M. (2000) - Fluorspar in the first quarter 2000. *USGS Mineral Industry Surveys*, june 2000, p. 1-4.
- Miller M. (2000) - Fluorspar in the second quarter 2000. *USGS Mineral Industry Surveys*, september 2000, p. 1-4.
- Miller M. (2000) - Fluorspar 1999 Annual Review. *USGS Mineral Industry Surveys*, august 2000, p. 28.1 - 28.13.
- Mouron R. (1998) - Fiche technique Fluorine. Les Techniques, n° III-IV/98. *Revue de la Société de l'Industrie Minérale*. Supplément à nov. 1998, p. 105-107.
- Pavillon M.J. (1998) - Fluor, Fluorine, Fréons. *Encyclopedia Universalis*.
- Pierrot R., Picot P., Fortuné J.-P., Tollon F. (1976) - *Inventaire minéralogique de la France* n° 6 : le Tarn (81), pp. 31-32, 73 et 105. Ed. BRGM.
- Prévôt J.C., Dangeard A., Martel-Jantin B., Warhurst A., Laurent S., Andriof J. (2000) - Voluntary initiatives and sustainable development in the non-energy extractive industry. *Contract ETD/99/502472*, European Commission, DG Enterprise, Industrial Affairs 1, Basic and ICT Industries, Final report BRGM-MERN-MEED n° BRGM/RC-50180-FR, June 2000.

- Regueiro M., Martins L., Arvidsson S (2000) - Minerals in Europe : the risk of outsourcing. *EuroGeoSurveys Opinion* n° 9, EGS Mineral Resources Policy Sector, Brussels, 27 march 2000, 10 p.
- Rémy F., Thibon A., Lescure J., Féraud J. (1974) - Sur l'exploitation de la fluorine dans le champ filonien de Fontante (massif du Tanneron, Var). *Bull. BRGM* (2) II, n° 5, p. 477-486.
- Routhier P. (1980) - Où sont les métaux pour l'avenir ? Les provinces métallogéniques ; essai de métallogénie globale. *Mémoires du BRGM*, n° 105, 409 p. ill.
- Samama J.-Cl. éd. (1980) - Les paléosurfaces et leur métallogénèse. *Mémoires du BRGM*, n° 104, 414 p.
- Sivade M.-A. (1989) - Les filons et stratiformes à fluorine, blende, galène, barytine du Grand Chatelard (massifs cristallins externes, Savoie) : relations, rôle de la distension liasique, remobilisation alpine. Thèse Doct. Univ., Spéc. Matières prem. minérales et énergétiques, Lab. Géol. app. Univ. Paris VI, viii+226 p.
- Slansky M. (1977) - Disponibilité et besoins futurs en minerais phosphatés compte-tenu de la lutte antipollution et de nouvelles applications possibles. *Ed. BRGM*, 68 p.
- Soléty P. (1966) - Les gisements de fluorine de la Provence cristalline (Maures, Tanneron, Estérel). *Mémoires BRGM*, n° 39, 262 p.
- Soulé de Lafont D., Lhégu J. (1980) - Les gisements stratiformes de fluorine du Morvan (sud-est du bassin de Paris, France). Actes du 26^e Congrès géol. intern. Paris, fasc. E2, *Mémoires BRGM* n° 112, 40 p.
- Sy D. (1983) - Géologie et géochimie métallifère de Chaillac (Indre). Contribution à l'exploitation et à la valorisation d'un gisement de barytine. Thèse Doct. 3^e Cycle, Univ. Paris VI.
- Thibaut P.M. (1999) - Note de synthèse sur la production de barytine en France. Le gisement de Chaillac. Note technique BRGM/REM/99/063, novembre 1999.
- Thibieroz J. (1982) - Typologie des gîtes de fluorine. Répartition des gisements en France et dans les régions voisines. *Bull. BRGM* (2), II, 4, p. 437-449.
- United Nations (1999) - Geology and mineral resources of Mongolia. Atlas of mineral resources of the ESCAP region. *Economic and Social Commission for Asia and the Pacific* (ESCAP), New York, vol. 14, p. 127-131, 152-155 et 178-179.

- Valette O. (1983) - Karsts et filons à fluorine dans le faisceau synclinal du Morvan : le gisement d'Argentolle (Saône-et-Loire). *Documents du BRGM*, n° 58, 299 p.
- Varney M. de (1992) - Les non-ferreux résistent. Rubrique Grands Marchés, Matières Premières, *Le Monde*, 12.10.1992, p. 19.
- Vialaron Ch. (1995) - La fluorine dans le département de la Haute-Loire. *Ed. Ch. Vialaron*, Blesle, 54 p.
- Vialaron Ch. (1997) - Les gisements fluorés et sulfurés de Barlet-Marsanges près Langeac. *Ed. Ch. Vialaron*, Le Puy-en-Velay, 160 p.
- Vignes J.-L., André G. et Kapala F. (1998) - Données sur les principaux produits chimiques, métaux et matériaux. 7^e édition 1997-1998, pp. 131-132. *Ed. du Centre de Ressources pédagogiques en Chimie : Economie et Industrie – EXC-1* (ENS de Cachan), Union des Physiciens et Soc. fr. de Chimie.
- Wen Lu Professor (1998) - Chinese Industrial Minerals. Article "Fluorspar" pp. 68-75. *Industrial Minerals Information Ltd*, Joyce Griffiths editor, Worcester Park, Surrey.
- Xuefeng Rao (1997) – Genesis of strata-bound ore deposits in central Guangxi, south China : fluid inclusion and isotope constraints. PhD, Department of Geology and Geophysics, Yale University, New Haven, USA.
- Ziserman A. (1980) - Les gisements de Chaillac (Indre) : la barytine des Redoutières, la fluorine du Rossignol. Association d'un gîte stratiforme de couverture et d'un gîte filonien de socle. Actes du 26^e Congrès géol. intern. Paris, fasc. E3, *Mémoires BRGM*, n° 112, 36 p.

ANNEXE 1

Statistiques du Mexique

(extraits fournis par le *Centro de Documentacion sobre los Recursos Minerales (CEDOREM)* le Service minier national du Mexique dépendant du *Consejo de Recursos Minerales (COREMI), Poder Ejecutivo Federal*), 20/8/1999, d'après *l'Anuario Estadístico de la Minería Mexicana 1998, edición 1999 en préparation*)

Production du Mexique en tonnage et valeur, par qualité, 1997-1998
(tonnes et prix courants)

Qualité	1997		1998*	
	Tonnes	Valeur (Pesos)	Tonnes	Valeur (Pesos)
Métallurgique	262 260,00		267 331,80	
Chimique	290 579,90		330 711,60	
TOTAL :	552 839,90	5 368 138,00	598 043,40	670 451 700,00

* Chiffres préliminaires

Source : Direction Générale des Mines, SECOFI

Production du Mexique en tonnage par entités fédératives et par municipales,
1997-1998
(tonnes)

Gisements et régions	1997	1998
	Tonnes	Tonnes
Acuna	38 163,90	40 709,40
Muzquiz	105 470,00	117 618,00
COAHUILA	143 633,90	158 327,40
Inde		12 000,00
DURANGO		12 000,00
Zaragoza	409 206,00	427 716,00
SAN LUIS POTOSI	409 206,00	427 716,00
TOTAL :	552 839,90	598 043,40

Exportations du Mexique en tonnage et valeur ; par pays facturés et catégorie, 1997-1998
(kilos et dollars courants)

	1997		1998	
	Kilos*	Dollars	Kilos*	Dollars
Spath fluor avec un contenu en CaF ₂ en poids, inférieur ou égal à 97%				
Allemagne			4 050 525,00	332 143,00
Argentine	200 950,00	20 400,00	300 950,00	33 000,00
Bésil	11 045 521,00	925 274,00	13 132 178,00	1 017 200,00
Canada	7 494 504,00	771 949,00	10 096 365,00	913 069,00
Chili	420 315,00	75 500,00	137 110,00	13 300,00
Colombie	40 000,00	4 180,00	630 000,00	76 820,00
Cuba			2 000,00	396,00
Equateur			520 000,00	54 100,00
Salvador	15 000,00	4 100,00		
Etats-Unis	119 815 109,00	7 882 894,00	117 022 089,00	7 709 444,00
Guatemala	40 000,00	10 800,00	2 000,00	860,00
Italie	23 134 581,00	1 534 699,00	21 213 200,00	1 441 793,00
Japon	6 590 690,00	361 631,00		
Pays Bas	10 771 460,00	754 001,00		
Pérou	463 900,00	64 235,00	280 040,00	36 180,00
Royaume-Uni et Irlande	61 566 407,00	4 197 012,00	52 346 005,00	3 664 221,00
Trinidad et Tobago	699 033,00	79 475,00	920 000,00	108 098,00
Turquie			1 030 000,00	83 355,00
Venezuela	492 000,00	76 303,00	350 000,00	52 000,00
Total	242 789 470,00	16 762 453,00	222 032 462,00	15 535 979,00
Spath fluor avec un contenu en CaF ₂ , en poids, > à 97 %				
Canada	58 664 941,00	5 372 225,00	98 849 434,00	9 405 869,00
Chili	390 370,00	66 379,00	362 480,00	76 840,00
Colombie	5 000,00	1 175,00	100 000,00	22 500,00
Equateur	10 025,00	2 656,00	20 000,00	5 020,00
Etats-Unis	9 488 690,00	1 272 424,00	6 961 993,00	608 503,00
Italie			1 000,00	94,00
Pays Bas	120 000,00	16 800,00		
Pérou	446 100,00	64 256,00	540 000,00	85 260,00
Royaume-Uni et Irlande			2 078 514,00	207 851,00
Venezuela	240 000,00	34 354,00	131 000,00	19 765,00
Total	69 365 126,00	6 830 269,00	105 044 421,00	52 000,00
TOTAL :		23 592 722,00		25 967 681,00

* Poids brut

Sources : Banque Nationale du Commerce Extérieur, S.N.C.

Importations du Mexique en tonnage et valeur ; par catégorie et origine, 1997-1998
(kilos et dollars courants)

	1997		1998	
	Kilos*	Dollars	Kilos*	Dollars
Spath fluor avec un contenu en CaF ₂ , en poids, inférieur ou égal à 97%				
Canada	10,00	20,00		
Etats Unis	11 658,00	1 099,00	143 570,00	8 595,00
Italie	1,00	11,00		
Total	11 669,00	1 130,00	143 570,00	8 595,00
Spath fluor avec un contenu en CaF ₂ , en poids, > à 97 %				
Australie	5 444,00	5 464,00		
Canada			45,00	92,00
Chine	1 361,00	1 688,00	17 739 041,00	2 251 422,00
Etats Unis	13 531 831,00	854 517,00	6 114 401,00	361 479,00
Kenya			9 548 189,00	1 178 349,00
Total	13 538 636,00	861 669,00	33 401 676,00	3 791 342,00
TOTAL :		862 799,00		3 799 937,00

* Poids brut

Sources : Banque Nationale du Commerce Extérieur, S.N.C.

Production mondiale en tonnage, 1997-1998, classée par pays
(milliers de tonnes métriques)

Pays producteurs	1997	1998*
Brésil	60	60
Chine	2 400	2 400
Espagne	120	120
France	110	110
Kenya	90	90
Maroc	104	104
Mexique**	552,84	598,04
Royaume-Uni et Irlande	67	65
Afrique du sud	217	217
Autres pays	899	824
TOTAL :	4 619,84	4 588,04

* Chiffres estimés

** Chiffres préliminaires

Sources : Mineral Commodity Summaries ; Bureau of Mines ; E.U.A et Direction générale des Mines, SECOFI (pour le Mexique).

ANNEXE 2

Adresses utiles

Association Professionnelle des Producteurs de Minéraux Industriels (APPMI), Section Spath Fluor,

Fédération des Minéraux Industriels, des Minerais, Minéraux Industriels et des Métaux non-ferreux,

Chambre Syndicale des Industries Minières françaises,

30 avenue de Messine

F - 75 008 – Paris

tél. 0033 (0)1 45 63 02 66

fax 0033 (0)1 45 63 61 54

SOGEREM

Direction, services administratifs et commerciaux :

49 rue des Taillades

F – 81 990 – Albi le Sequestre

tél. 0033 (0)5 63 48 74 14

fax 0033 (0)5 63 48 74 10

E-mail sogeremcomm@amt.pechiney.fr

Mine et Usine du Burg

F – 81250 Paulinet

Mine et Usine de Montroc

F – 81250 – Montroc

SIC (Société Industrielle du Centre)

Siège social :

Mine du Rossignol
B.P. n° 1
F – 36310 - Chaillac

Tél. 0033 (0)2 54 25 76 95

E-mail sic@mai.org

Site Internet <http://www.mai.org/sic>

Direction Commerciale :

M. Jean-Paul CHAMBARD
36 avenue de Wagram
F - 75 008 – Paris

tél. 0033 (0)1 55 37 15 30
fax 0033 (0)1 55 37 15 31

Usines à Rougé (fer), Villepail en Mayenne (schistes) et Chaillac

Mines du Haut du Them

M. Boruch CHOMSKI, Directeur
42 rue Sibuet
F – 75 012 Paris

Tél. 0033 – (0)1 46 28 10 61
Fax 0033 – (0)1 43 40 68 26

CEFIC

Le CEFIC (*European Chemical Industry Council* ou Conseil Européen des Fédérations de l'Industrie Chimique) comprend un groupe de travail sectoriel du spath fluor. Créé en 1972, il a son siège à Bruxelles :

Avenue E. van Nieuwenhuysse 4, bte 1

B - 1160 Bruxelles, Belgium

Tél. +32 2 676 72 11

Fax +32 2 676 73 00

Mail@cefic.be

www.cefic.org

BRGM
SERVICE RESSOURCES MINÉRALES

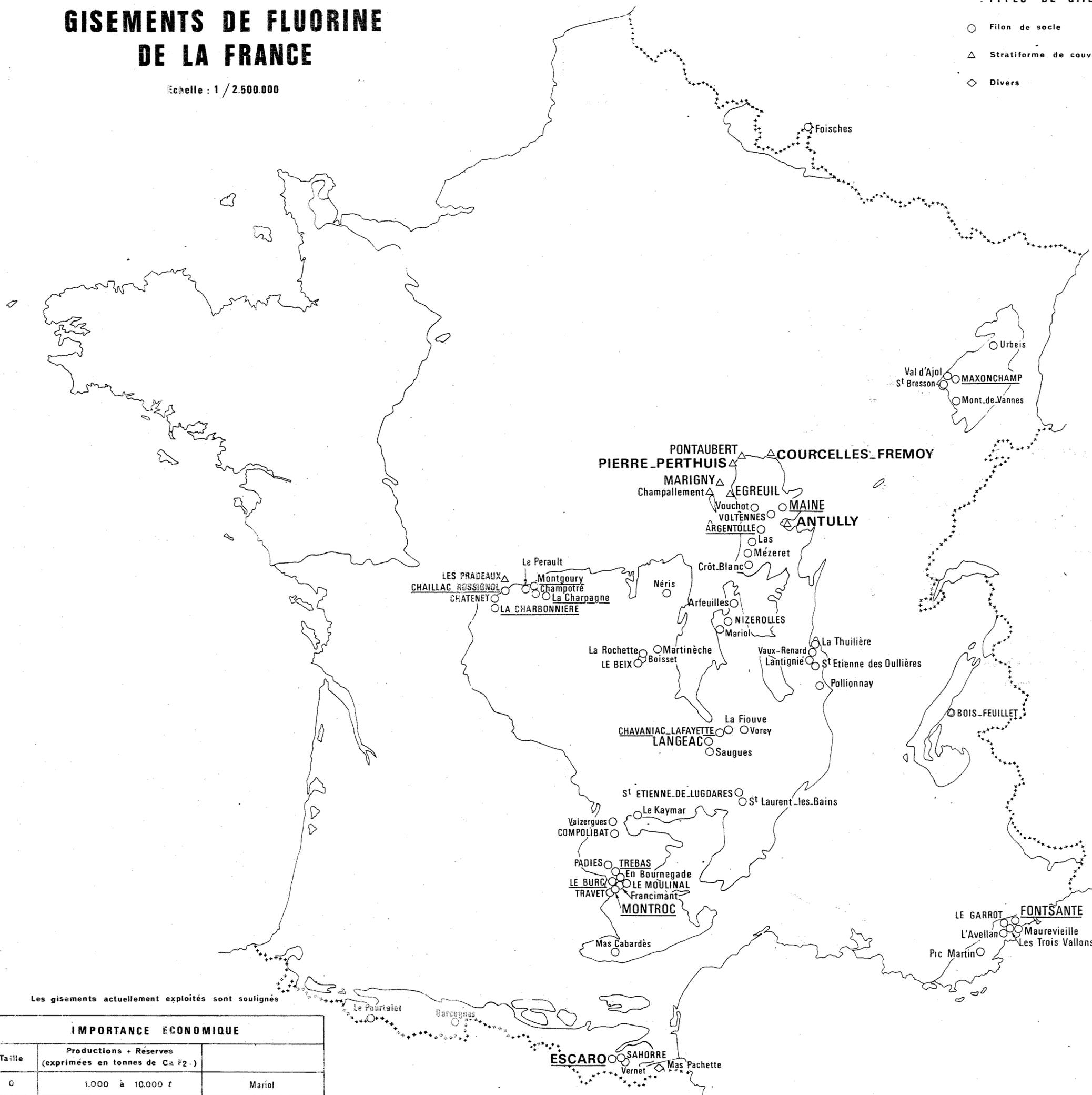
3 Avenue Claude Guillemin - BP 6009 – 45060 Orléans cedex 2 - France - Tél. : 02.38 64 39 36

GISEMENTS DE FLUORINE DE LA FRANCE

Echelle : 1 / 2.500.000

TYPES DE GITES

- Filon de socle
- △ Stratiforme de couverture
- ◇ Divers



Les gisements actuellement exploités sont soulignés

IMPORTANCE ECONOMIQUE

Taille	Productions + Réserves (exprimées en tonnes de Ca F ₂ .)	
0	1.000 à 10.000 t	Mariol
1	10.000 à 100.000 t	Martinèche
2	100.000 à 500.000 t	CHAILLAC
3	500.000 à 1.000.000 t	EGREUIL
4	1.000.000 à 2.000.000 t	ANTULLY

(Plusieurs gîtes de taille 0 du Tarn et de Provence n'ont pas été indiqués)

Rapport BRGM R 40825

Mémento des roches et minéraux industriels : la fluorine