BULLETIN

de

L'A.MI.S

Numéro 45 2ième trimestre 2005

1

Les minéraux des complexes alcalino-ultramafiques de la péninsule de Kola (Russie)

par Jacques Geyssant, président de l'A.MI.S (Conférence du 8 novembre 2003)

Cette conférence, donnée le samedi 8 novembre 2003 à une réunion de l'A.MI.S, fait suite à la participation de quelques membres de l'A.MI.S. à une excursion minéralogique dans la péninsule de Kola, organisée par ABC Mines, du 24 juillet au 11 août 2003.

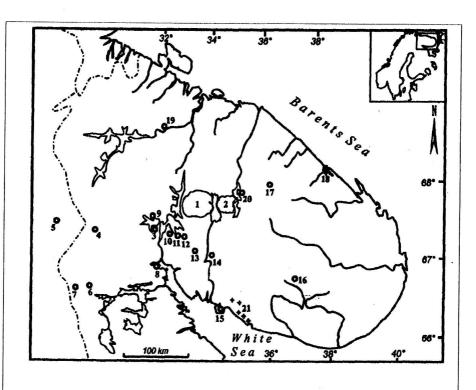
I - CONTEXE GEOLOGIQUE

La péninsule de Kola fait partie du bouclier balte, constitué de terrains antérieurs au Cambrien et à l'orogénèse Calédonienne.

1- Structure géologique:

La carte géologique à 1/500.000e de 1993 de la partie NE du bouclier balte montre bien la structure dominante orientée WNW-ESE à NW-SE, correspondant à l'accolement de blocs ("terranes"), résultant de différentes orogénèses précambriennes.

- -bloc de Murmansk (rivages de la mer de Barentz) constitué d'orthogneiss et de roches métamorphiques d'origine sédimentaire de 2,6 à 2,9 Ma (Archéen supérieur).
- -bloc central de Kola: orthogneiss et métasédiments de 3,2 à 2,6 Ma. Archéen avec intrusions de granodiorite à 1.840 + ou 50 millions d'années et intrusions paléozoïques principales de Khibiny, Lovozero et Kovdor.
- -bloc belomorien au S (rivages de la mer blanche) avec des orthogneiss de l'Archéen supérieur (2,9 Ma) et des métasédiments très plissés du Protérozoïque inférieur (2,4 à 2,5 Ma) avec des intrusions de granites pegmatites à 1,75 1,85 Ma.
- -une zone de suture entre le bloc de Kola au N et celui bélomorien au S, avec des formations d'arc volcanique métamorphisées (1,9 à 1,94 Ma), dans le



Palaeozoic complexes: 1 - Khibina, 2 - Lovozero, 3 - Niva, 4 - Kovdor, 5 - Sokli, 6 - Vuoriyarvi, 7 - Sallanlatva, 8 - Kandaguba, 9 - Mavraguba, 10 - Africanda, 11 - Ozernaya Varaka, 12 - Lesnaya Varaka, 13 - Salmagora, 14 - Ingozero, 15 - Turiy Mys, 16 - Peohny, 17 - Kontozero, 18 - Ivanovka, 19 - Seblyavr, 20 - Kurga, 21 - Terskiy Coast pipe

Fig.1 - Localisation des intrusions alcalines paléozoïques dans la péninsule de Kola.

3

faciès granulite HP (8 à 15 Kb, cad de 30 à 60 km de profondeur). On y observe également des intrusions de gabbros (métagabbros) et d'anorthosites (métaanorthosites) dans les faciès granulites ainsi que des blastomylonites résultant de mouvements de coulissement entre blocs.

2 - Nature des roches

-Roches sédimentaires, en général détritiques, à l'Archéen ce sont des dépôts de plateforme : grès, conglomérats mais aussi roches sédimentaires riches en aluminium (bauxites) qui par métamorphisme donnent des roches à disthène (niveau de plus de 400 m d'épaisseur non exploité).

Après métamorphisme polyphasé, on observe des quartzites, des micaschistes, des paragneiss mais aussi des schistes ardoisiers (dans le faciès schistes verts) et des quartzites à magnétite, correspondant à des dépôts rythmés de sédiments siliceux (détritiques) ou précipités et d'oxydes de fer précipités en milieu marin. Ce sont les fameux "Banded Iron Formation" B.I.F. de l'Archéen supérieur (2,760 +ou- 7 Ma), exploités à Olenogorsk.

-Dans le Protérozoique inférieur (de 2,5 à 1,6 Ma), existence de deux zones de rift très porteuses en minéralisations :

*au N celui de Pechenga, avec Cu Ni Co dans des roches à 1,98 Ma,

*au S rift <u>d'Imandra</u> avec l'intrusion magmatique de Monchegorsk (roches ultrabasiques à basiques, harzburgite, pyroxénite, gabbros et diabase) de 2,5 à 2,45 Ma. On y trouve cuivre, cobalt, palladium et platine dans des intrusions stratiformes mises en place en 50 Ma.

Dans ces deux rifts, remplissage de plus de 10 km de volcanites, métasédiments et ultrabasites (Monchegorsk par ex.) mais avec un métamorphisme "faible" : schistes verts ou amphibolite, tandis que le substratum (socle) de ces rifts avait subi un ultramétamorphisme (dépassant le faciès granulite) très HP (plus de 10 Kb ~plus de 40 km) avec coesite, grenat magnésien, saphirine (cordiérite désilicifiée).

3 - La croûte continentale (structure et épaisseur) et le sondage superprofond de Zapolyarny

La partie supérieure de la croûte continentale est donc constituée par des terrains archéens et protérozoïques de 2,9 à 1,65 Ma, ayant subi plusieurs phases orogéniques et métamorphiques, accompagnées d'intrusions acides

(granites) et basiques (gabbros, diorites...).

4

Cette partie supérieure de la croûte continentale, avec une épaisseur de 3 à 7 km, est délimitée vers le bas par un horizon, bien visible par les méthodes de prospection géophysiques (gravimétrie, magnétisme, ondes sismiques). Cette discontinuité avait été interprétée dans les années 60, comme étant le "MOHO" (limite croûte-manteau). En réalité il s'agit de la <u>discontinuité de Conrad</u>, à l'intérieur de la croûte continentale dont l'épaisseur est comprise entre 35 et 48 km dans la péninsule de Kola.

Cette erreur d'interprétation est à l'origine du sondage de Zapolyarny dans le N de Kola, car les Soviétiques espéraient atteindre la fameuse discontinuité de Mohorovicie (le "MOHO").

Ce sondage qui a débuté en mai 1970, a pris fin en 1989 (avec la chute de l'URSS, par manque de crédits), à 12.262 m de profondeur, n'ayant traversé que des roches connues en surface : le Protérozoïque supérieur (de 0 à 6.842 m) et l'Archéen (de 6.842 à 12.262 m). Il a permis des observations surprenantes : faiblesse du degré géothermique : 210° à 12.262 m de profondeur; fracturation importante entre 7 et 10 km avec circulation de saumures dans des fractures ouvertes, malgré la pression lithostatique (les solutions minéralisées sont à l'origine des nombreux gisements métallifères de la région de Pechenga).

II - LE MAGMATISME PALEOZOIQUE et les ROCHES MAGMATIQUES CARACTERISTIQUES

1 - Ce magmatisme paléozoïque suit la fermeture de l'océan lapétus qui a donné naissance à la chaîne calédonienne, en avant du bouclier Fennoscandinave (à l'W), vers -440 - 420 millions d'années.

Dans l'avant pays de la chaîne, dans la partie E de ce bouclier, se sont formés, par effondrement, de grandes caldeiras qui ont été remplies par des roches sédimentaires et volcaniques. Au Dévonien, ces structures d'effondrement sont accompagnées par de <u>nombreuses intrusions magmatiques alcalines</u>, environ 22 dans la péninsule de Kola.

Il y a trois groupes principaux formant les massifs de Lovozero-Khibiny, de Kurga et de Kovdor.

Ces intrusions sont constituées par des associations de roches magmatiques variées :

- *des roches ultrabasiques (péridotites, pyroxénites), ultramafites
- *des roches alcalines sous saturées (syenites néphéliniques)
- *des carbonatites calciques et dolomitiques

A ces massifs s'ajoutent des dykes et des pipes sur la côte de la Mer Blanche, dans le golfe de Kandalaksha, constitués de roches magmatiques très variées dont des roches alcalines sous saturées et des brèches à kimberlite diamantifères (nombreux microdiamants de 0,1 à 1 mm, sous forme d'octaèdres).

Les âges isotopiques des différents massifs alcalins paléozoïques ont été réalisés sur roche totale (carbonatite, pyroxénite, ijolite, syénite néphélinique) ou sur des minéraux de ces roches (phlogopite, zircon, baddeleyite, apatite). Ils s'échelonnent entre 364 +ou- 3 et 380 +ou- 4 millions d'années suivant la méthode utilisée (Rb-Sr, Sm-Nd, Ar-Ar, U-Pb, Th-Pb), c'est-à-dire Dévonien supérieur à Carbonifère inférieur.

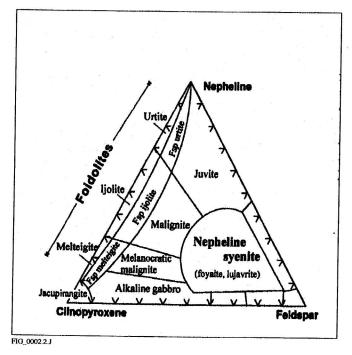


Fig. 2 – Classification des roches alcalines basée sur la composition modale.

<u>2 - Les roches magmatiques des complexes alcalins</u> sont extrêmement variées et leur nomenclature ancienne basée sur la description pétrographique de ces roches liées à divers gisements (dont celui de Fen en Norvège) était très complexe.

Actuellement on distingue trois ensemble pétrographiques : les carbonatites, les roches plutoniques silicatées et les roches métasomatiques associées à l'intrusion des carbonatites.

- <u>a Les carbonatites</u> dont l'origine magmatique est désormais bien acquise, ont souvent l'aspect de marbre métamorphique à minéraux (ou cipolin). Elles sont calcitiques ou dolomitiques et souvent bréchiques. Elles forment des filons (dykes) de quelques m à quelques dizaines de m d'épaisseur.
- <u>b Les roches plutoniques silicatées</u> comprennent des roches ultrabasiques : des ultramafites et des roches alcalines sous saturées (syénites néphéliniques).

Les ultramafites comportent des roches contenant plus de 80% d'olivine [olivinite (dunite) constituée d'olivine et de clinopyroxène] ainsi que des pyroxénites.

On a également des ultramafites à micas (phlogopite).

- Dans les roches alcalines sous saturées à feldspathoïdes (néphéline), on distingue, à côté des syénites néphéliniques (foyaïte, lujavrite), des roches plus riches en néphéline comme l'urtite ou l'ijolite qui est enrichie en aegyrine.
 - <u>c Les roches métasomatiques</u> qui sont associées aux intrusions de carbonatites proviennent de la transformation des roches préexistantes par les fluides liées au magmatisme : phénomène de <u>fénitisation</u> (très développé dans le gisement de Fen en Norvège).

Fénites avec de l'albite ou de l'orthose très perthitique et de l'aegyrine.

<u>Conclusion</u>: Magma d'origine mantellique provenant de la fusion partielle des péridotites du manteau.

III - LE COMPLEXE ALCALINO-ULTRAMAFIQUE DU KOVDOR

Il se situe dans la partie SW de Kola, près de la frontière finlandaise. Sa superficie est d'environ 40 km². La petite ville minière de Kovdor est bâtie sur le pluton près de la grande mine à ciel ouvert et reçoit les fumées de l'usine de traitement, rabattues par les gigantesques terrils résultant de l'exploitation.

7

Ce complexe composé de roches alcalines et d'ultramafites, est intrusif dans un grand synclinorium de gneiss et amphibolites de l'Archéen, coupé par un accident NE-SW sur lequel se situe la plupart des grands massifs alcalins de Kola.

Il a une structure annulaire de "type central" et les contacts subverticaux qui le limitent lui donne l'allure d'un neck intrusif.

1 - Constitution du massif du Kovdor

Du cœur du massif vers la périphérie, on observe la succession suivante:

<u>a - au centre, des olivinites</u> (péridotites et dunites) forment des reliefs surélevés par rapport aux étendues marécageuses sur les roches à micas, plus facilement altérables.

Ces roches ont été mises en place lors de la première phase magmatique intrusive. Elles sont essentiellement constituées par de l'olivine (85 à 95%), 5 à 10% de titanomagnétite, des minéraux accessoires (pérovskite, pyrrrhotine et chalcopyrite) et aussi diopside, phlogopite, clinohumite et apatite.

- <u>b des pyroxénites</u> entourent les ultramafites sauf au N. Elles sont presque monominérales à base de cristaux subidiomorphes d'aegyrine-diopside avec parfois phlogopite, amphibole, titanite et apatite.
- <u>c des roches à mélilites et monticellite</u> dans la partie N du massif. Ce sont des roches très particulières comme la turjaïte à mélilite, aegyrine diopside, néphéline et phlogopite ou la monticellitite presque monominérale avec parfois magnétite, phlogopite, olivine, pérovskite et spinelle.
- <u>d les roches du complexe à phlogopite</u> se trouvent à la périphérie Nord du noyau central à olivinites. Elles sont formées par l'association de phlogopite-diopside-olivine (grains fins), associées à des lentilles (niveaux pegmatitiques) à grains grossiers et géants (jusqu'à plus de 1m) de phlogopite-diopside et diopside-amphibole.

La carrière de phlogopite de Kovdor est basée sur la zone riche en lentilles pegmatitiques à phlogopite-forstérite et phlogoite-diopside, avec une production de 300 à 1.500 kg/m³ de cristaux de phlogopite entre 0,5 et 1m de diamètre. Il est vert car c'est une variété riche en Mg.

La partie haute du gisement est altérée en vermiculite, également exploitée.

<u>e - le complexe à minerai de fer et carbonatites</u> comprend les roches les plus originales du massif. A côté des carbonatites calciques et dolomitiques, une séquence de roches à base de calcite-magnétite-forstérite-apatite est activement exploitée pour ses hautes teneurs en Fe, P, Zr et métaux rares. Ces

roches ont été appelées "phoscorites" à Palabora en Afrique du Sud.

Dans les minerais de fer riches en calcite, on peut facilement trouver de beaux et brillants octaèdres de magnétite (jusqu'à 5 cm de côté).

Les minéraux remarquables sont associés aux carbonatites :

la kovdorskite, blanc rosé à bleu (décrite en 1969)

la bobbiérite, bleue

la labuntsovite (silicate complexe) orangée

la ferriphlogopite est rouge brun

la baddéleyite en cristaux pouvant atteindre 2 cm est marron plus ou moins clair

la francolite ou carbonate-fluorapatite, dans la zone d'altération des carbonatites, forme des encroûtements de teinte blanche, brune et orangée, parfois colorée en bleu-vert (influence de minéraux de cuivre brochantite et pseudo-malachite).

la manasséite, rare carbonate de Mg et Al, de couleur rouge orangé.

2 - Genèse du massif de Kovdor

La série allant des ultrabasites aux carbonatites s'est différenciée durant un processus polyphasé, à partir de magmas primaires néphéliniques. Les inclusions primaires des cristaux d'olivine, clinopyroxène, mélilite des les températures ultramafites aux carbonatites. montrent aue d'homogénéisation étaient de 1130 à 1300° pour les ultramafites, 950 à 1060° pour les roches mélilitiques, 965 à 1020° pour les ijolites et 620 à 900° pour Cependant l'évolution conduisant phoscorites-carbonatites. phoscorites et carbonatites implique au moins deux réservoirs mantelliques alimentant en plusieurs fois, une chambre magmatique où se seraient produites les différenciations à l'origine des intrusions successives. La mise en place des phoscorites et carbonatites a été datée par la méthode U-Pb sur la baddéleyite à 380 +ou- 4 Ma. D'autres âges obtenus sur l'apatite, le zircon, la phlogopite et la tetraferriphlogopite sont concordants et compris entre 376 et 380 Ma.

IV - LE MASSIF DE LOVOZERO

Ce pluton alcalin de 650 Km², le second de Kola par la taille, est séparé de celui des Khibiny, par le profond lac d'Umbozero. Il a la forme d'un fer à cheval de 25 km par 25 km, orienté vers l'Est. Il forme un vaste plateau

8

atteignant 1.200 m à l'W, incliné vers l'Est (400 m), bordé de pentes très raides au-dessus de la taïga environnante, couvrant les terrains précambriens.

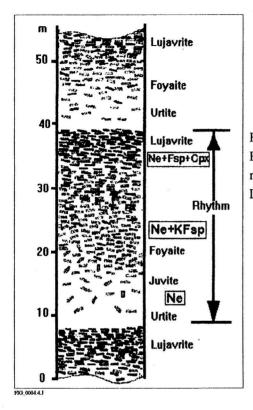


Fig.3-Représentation schématique d'un rythme du complexe stratifié de Lovozero.

1 - Structure et constitution du massif

Le pluton de Lovozero a la forme d'un laccolithe de structure très simple, constitué de couches différenciées subhorizontales, reconnues par gravimétrie jusqu'à plus de 10 km de profondeur.

Ce vaste corps de syénite néphélinique est composé de trois complexes de roches magmatiques :

Syénites à feldspaths poecilitiques

Complexe stratifié à lujavrite-foyaïte-urtite

Syénites néphéliniques à eudialyte (eudialuite-lujavrite)

2 - Pétrographie et minéralogie des roches alcalines de Lovozero a - Les syénites à feldspaths poecilitiques sont des roches leucocrates à gros grains, avec de grands cristaux de microcline (jusqu'à 15 cm), contenant de

10

nombreuses inclusions poecilitiques de néphéline, sodalite ou noséane. Ces syénites renferment de nombreuses lentilles pegmatitiques avec des minéraux rares comme la belovite (phosphate complexe de cerium), la lomonossovite (silicate de Ti, Na et P), la murmanite, la lamprophyllite, l'eudialyte, la lovozérite (silicate de Na, Ca, Zr, Ti), la loparite, la lorenzenite, la villiaumite etc.

<u>b - Le complexe stratifié à lujavrite-foyaïte-urtite</u> est comparable à celui d'Ilim aussaq au Groënland et constitue l'exemple type de l'intrusion alcaline stratifiée. Le complexe a une épaisseur de plus de 2,5 km (reconnue par sondage); il est bien visible sur les pentes du massif où se superposent les associations rythmiques de quelques dizaines de mètres chacunes, constituées de bas en haut par de l'urtite, surmontée par la foyaïte, suivie par la lujavrite. L'urtite est une roche massive, gris sombre, à grains fins, composée essentiellement de néphéline avec très peu d'aegyrine et de feldspath.

La foyaïte est une roche gris clair, à gros grains, constituée de néphéline, de larges lattes de microcline et d'un peu d'aegyrine.

La lujavrite a été définie dans le massif de Lovozero et nommée d'après l'ancien nom du massif "Lujavrurt". C'est une syénite néphélinique à gros grains, avec une structure trachytique orientée, formée par des lattes de feldspaths définissant des plans parallèles. Le clinopyroxène (aegyrine) est abondant ainsi que l'arfvedsonite et les cristaux aplatis d'eudialyte.

Dans les pegmatites de ces complexes stratifiés, on peut trouver lamprophyllite, lorenzenite, murmanite, ussingite (silicate de Na et Al), chkalovite (silicate de Na et Be) et d'autre minéraux rares.

<u>c - Les syénites néphéliniques à eudialyte</u> forment un complexe épais de plus de 800 m au-dessus du complexe stratifié précédent. Aucune stratification n'est visible dans cet ensemble où les 300 m supérieurs sont constitués par de la lujavrite à eudialyte à gros grains mais moins bien cristallisée que la syénite sous jacente. Dans cette masse de roches alcalines à néphéline, on observe de nombreuses lentilles, parfois sur plusieurs milliers de mètres d'extension et quelques dizaines de mètres d'épaisseur, de syénite à noséane ou à sodalite poecilitique, ainsi qu'un niveau riche en loparite près du contact inférieur avec le complexe stratifié.

<u>d - Certaines roches (urtite, lujavrite)</u> sont exploitées pour leur teneur en loparite et en eudialyte, à partir de deux mines souterraines, à Karnassurt et à Umbozero et d'une carrière à ciel ouvert sur le plateau, dans de la lujavrite (jusqu'à 90% d'eudialyte). Nous reviendrons sur ces exploitations dans le chapitre sur les richesses minières de Kola.

La petite ville de Revda, à quelques km au Nord du massif fut construite entre 1945 et 1950, par les 17.000 prisonniers de guerre russes, libérés par les Finlandais et considérés comme des traîtres à la patrie.

<u>3 - La genèse du massif de Lovozero</u> a pu être déchiffrée grâce aux études isotopiques Sr-Nd qui ont prouvé l'origine mantellique du magma sans contamination crustale.

Contrairement à ce qui s'est produit dans le pluton du Kovdor, les premières phases du magmatisme alcalino-ultramafique sont conservées à l'extérieur du pluton de Lovozero, à la périphérie de la caldeira dont les bords sont subverticaux. Cette caldeira dont la subsidence a été de 7 à 8 km, est située dans un bloc de métatonalite (gneiss à grenat et biotite) de l'Archéen supérieur, très homogène et stable. Cette stabilité a permis le développement des processus de différenciation au sein de la chambre magmatique, à l'origine du remarquable complexe stratifié au sein des syénites néphéliniques.

V - LE MASSIF DES KHIBINY

C'est l'intrusion alcaline la plus vaste (1.350 km²) de la péninsule de Kola, à quelques km à l'W de celle de Lovozero. C'est une véritable petite chaîne de montagnes, dénudées (Khibiny signifie toundra), dominant (point culminant à 1.200 m) la taïga (forêts de conifères et de bouleaux) de la région d'Apatity (ville de 80.000 habitants, abritant le plus grand centre de recherches du Nord de la Russie, à 1.200 km de St-Pétersbourg et qui doit son nom aux exploitations d'apatite du massif des Khibiny).

Le massif des Khibiny a la forme de deux "fers à cheval" emboîtés, ouverts vers l'Est, ce qui correspond à sa structure géologique. En effet ce pluton alcalin géant, le plus important sur Terre, est constitué d'anneaux circulaires ouverts et centrés sur un cœur de syénite néphélinique alcaline : la foyaïte (définie dans la Sierra de Foya, au Portugal).

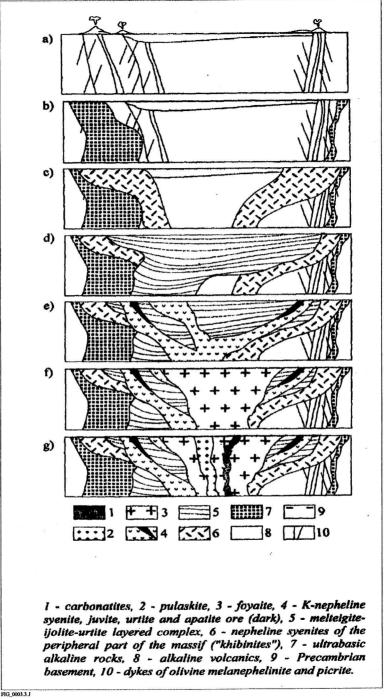


Fig.4 – Schéma de la formation du massif des Khibiny montrant la succession des phases intrusives.

- 1 Age de l'intrusion. Les isochrones Rb-Sr sur les syénites néphéliniques ont donné un âge de 367,5 + ou- 5,5 millions d'années. Des âges similaires ont été obtenus sur d'autres roches intrusives et le dernier événement thermique a été daté à 363 + ou 0,8 millions d'années par la méthode ⁴⁰Ar/³⁹Ar sur de la phlogopite. C'est-à-dire que la mise en place du pluton des Khibiny est contemporaine de celle des autres plutons de Kola au Dévonien supérieur.
- 2 La structure profonde du massif des Khibiny est connue par de très nombreux sondages pour la recherche du minerai d'apatite et par les données géophysiques (anomalies gravimétriques en particulier). Cela a permis l'établissement d'un modèle en 3D de l'intrusion montrant une structure conique jusqu'à plus de 12 km de profondeur, sans relation avec le massif oriental voisin de Lovozero.
- 3 Les principaux faciès pétrographiques des différents complexes magmatiques correspondent aux intrusions magmatiques multiphasées qui se sont succédées des plus anciennes à la périphérie aux plus récentes au cœur.
- <u>a- Les khibinytes</u> (nom local) sont les variétés (nombreux faciès pétrographiques) de syénite néphélinique constituant la partie externe du massif, sous la forme d'un arc d'une quinzaine de km. Ce sont des roches massives, à grains grossiers, gris--vert, avec de la néphéline qui peut s'altérer en véritable "poudre de sucre". Dans la partie interne de l'arc, les khibinytes ont une structure trachytoïdale, due à la présence de lattes de feldspath K.Na, d'aegyrine et d'autres minéraux remarquables, subparallèles aux contours de l'arc.

Une autre variété de syénite néphélinique, riche en potassium, à grands cristaux (15 cm) de feldspath piégeant de nombreuses inclusions de néphéline et d'aegyrine, a été appelée **rischorrite** (du nom du Mont Rischorr, dans les Khibiny, où elle a été décrite).

<u>b - Les ijolites</u> succèdent vers l'intérieur aux khibinytes, avec un pendage régulier de 10° à 30° vers le centre du massif. Elles sont régulièrement stratifiées de façon rythmique sur plusieurs km d'épaisseur. Chaque séquence est constituée par la succession du haut vers le bas, de melteigite riche en clinopyroxène (aegyrine) puis d'ijolite et d'urtite où la teneur en néphéline est

très importante (70 à 90%). Ces roches ont une structure magmatique orientée, due à l'allongement des minéraux mafiques : aegyrine, titanite, lamelles de lamprophyllite et de biotite.

- <u>c Les roches à apatite-néphéline</u> sont associées aux rischorrite-ijoliteurtite, dans une zone étroite de la partie sud du massif. Elles constituent le minerai exploité pour l'apatite dont la teneur en P₂O₅ varie de 5 à 20%. On observe un enrichissement en sphène et titano-magnétite dans la partie supérieure du gisement. L'apatite contient 40 à 41% de P₂O₅, 1,8 à 3,5% de S_rO., 9.000 à 11.000 ppm de Terres Rares (REE) et 500 à 900 ppm d'ytrium. Elle se présente soit finement grenue vert clair, dans la variété dominante, soit en cristaux en aiguilles vert jaune clair ou en agrégats à gros grains gris fumé. La néphéline sous-produit de la production du concentré d'apatite, contient 33% d'Al₂O₃, 15% de Na₂O, 7% de K₂O, 150 ppm de Rb et 40 ppm de Ga. La présence de nombreuses micro-aiguilles d'aegyrine et la teneur en fer en limite l'utilisation pour la céramique.
- d Les foyaïtes qui occupent la partie centrale du massif sont des roches à gros grains, gris clair à noir, avec 50 à 60% de feldspath potassique en cristaux poecilitiques (perthite), 30 à 35% de néphéline, 5 à 10% de pyroxène (aegyrine-augite), 1 à 5% d'amphibole (arfvedsonite), hastingsite, eudialyte, astrophyllite, aenigmatite, apatite, sodalite, cancrinite et natrolite.
 - <u>e Un complexe de dykes (plus de 180) et quelques pipes</u> traversent toutes les roches alcalines du massif. Leur composition est extrêmement variable depuis les phonolites, trachytes jusqu'à des néphélinites et tingaïte (microsyénite néphélinique définie au Brésil).
 - f Un stockwerk de carbonatites a été mis en évidence dans une série de sondages dans l'Est du massif (sous le lac Umbozero). C'est un système dense de filons de carbonatites variées à apatite, aegyrine et phlogopite ou à rhodochrosite-ankérite avec de nombreux minéraux rares riches en cerium.
 - **g Les pegmatites alcalines**, présentes dans presque toutes les roches décrites précemment, constituent une véritable "Mecque" pour les minéralogistes : **environ 80 nouveaux minéraux ont été décrits** dans les Khibiny et la plupart, dans ce cortège pegmatitique et les filons hydrothermaux tardifs.

-Les pegmatites des syénites néphéliniques contiennent de l'aegyrine, souvent en agrégats fibreux vert foncé, de l'arfvedsonite très foncée et de nombreux minéraux accessoires plus rares (lamprophyllite, aenigmatite...).

-Les pegmatites d'ijolite-urtite sont riches en beaux cristaux d'eudialyte de couleur rouge violacé vif et en lattes de fénaksite sur de l'aenigmatite noire.

Les pegmatites à néphéline-sodalite-aegyrine-microcline contiennent aussi lomonossovite, lovozerite, villiaumite.

-Les pegmatites de rischorrites contiennent de belles gerbes d'astrophyllite et de la fersmanite.

4 - Modèle génétique du massif des Khibiny :

Les études pétrologiques sur la parenté des diverses roches magmatiques ainsi que les données géophysiques sur la structure profonde du pluton, ont permis d'établir un modèle génétique de la mise en place de cette intrusion multiphasée.

- -Une caldeira s'est formée au contact de l'Archéen supérieur et du Protérozoïque inférieur avec une activité volcanique à sa périphérie.
- -Intrusion de roches alcalines ultramafiques dans la partie externe et septentrionale de la caldeira.
- -Intrusion de khibinites le long des failles coniques externes de la caldeira.
- -Effondrement de la caldeira avec le développement du complexe stratifié ijolite -melteigite dans la partie centrale.
- -Une série de failles coniques recoupent ce complexe et permettent l'intrusion des syénites à apatite (urtite-juvite).
- -Une nouvelles série de failles permet la montée des foyaïtes de la partie centrale au cœur du massif.
 - -Les filons de carbonatites sont mis en place les derniers.

La source du magma dans le manteau devait être située vers 50 à 60 km de profondeur, à une température de 990 à 1.050°C. Les données géophysiques permettent de situer la discontinuité de MOHO (base de la croûte continentale) à 43 km. On peut en déduire que l'origine du magma alcalino-ultramafique était située dans le manteau supérieur à 10-15 km sous la limite croûte-manteau.



VI - Les RICHESSES MINIERES de KOLA et la POLLUTION qui RESULTE de leur EXPLOITATION

Les richesses minières liées aux massifs alcalino-ultramafiques ont été évoquées dans les chapitres précédents; le socle précambrien renferme également d'importants gisements de cuivre, nickel, fer en exploitation et de nombreux gisements (plus de 100) reconnus et à développer.

Le marché intérieur russe est alimenté dans les proportions suivantes par l'industrie minière de Kola : 100% pour l'apatite, 80 à 90% pour la phlogopite-vermiculite, 12% pour le minerai de fer, 14% pour le cuivre, 43% pour le nickel, 40% pour le cobalt, 100% pour la baddeleyite, 35% pour la néphéline (céramiques et également pour la production de l'aluminium), et une proportion importante pour les métaux rares et les matériaux de construction variés.

<u>1 - L'apatite</u> est extraite dans la grande carrière de Kovdor où le concentré est un sous-produit de l'élaboration du concentré de minerai de fer (magnétite). En effet, le minerai extrait contient en moyenne 16% d'apatite, ce qui a permis la production de 3 millions de tonnes par an, de concentré. Actuellement la production n'est que de 1,7 millions de tonnes par an.

La majeure partie du concentré d'apatite : 10 millions de tonnes par an (20 millions de tonnes en 1985) est produite dans les exploitations des Khibiny, avec les deux grandes carrières centrale et de l'Est (60%) et les trois mines souterraines de Kirovsky (près de la petite ville minière de Kirovsk, proche d'Apatity), de Yukspor et de Ravumchorr (40%).

NB: En 1975 les ingénieurs soviétiques ont réalisé un tir nucléaire souterrain au fond d'une galerie de 200 m, creusée au flanc d'une montagne au cœur du massif des Khibiny. Cet essai nucléaire destiné à l'exploitation de l'apatite, créa un vaste glissement de terrain et un affaissement du sommet de la montagne. Nous l'avons observé depuis quelques centaines de mètres et apparemment la radioactivité du site est très faible (les produits radioactifs ont dû rester confinés dans les roches vitrifiées par l'explosion).

La production de néphéline, sous-produit de la flottation utilisée dans la concentration de l'apatite, est de 1 million de tonnes par an. Elle est utilisée pour la céramique, la production d'aluminium, de soude, de potasse, de ciment et de gallium.

- **2 Phlogopite et vermiculite** sont extraites dans deux carrières de Kovdor. 415.000 tonnes de minerai donnent après traitement, 50.000 tonnes de vermiculite, tandis que 60 à 70.000 tonnes de minerai de phlogopite donnent 15 à 20.000 tonnes de phlogopite pure.
- <u>3 Les concentrés de minerai de fer</u> sont produits à partir de deux gisements : celui lié au magmatisme alcalin paléozoïque du Kovdor et ceux, plus nombreux, liés aux "B.I.F." de l'Archéen.

A Kovdor, le minerai contenant en moyenne 38% de magnétite, est extrait d'une immense carrière de 3x2 km et de 320 m de profondeur. Après traitement la production annuelle de concentré à 63,8 - 63,9% de fer s'élève à 3,8 millions de tonnes. Les réserves prouvées s'élèvent à 2,5 milliards de tonnes de minerai de fer en place.

A Olenogorsk, les quartzites à magnétite (et cummingtonite) contenant en moyenne 32% de fer sont exploitées dans quatre carrières où sont extraites annuellement 10 millions de tonnes de minerai qui donnent 5 millions de tonnes de concentré.

- 4-Le cuivre et le nickel proviennent des exploitations de la région de Pechenga. Dans trois mines souterraines et une carrière, sont extraits des sulfures (association de pyrrhotite, pentlandite, chalcopyrite et magnétite). Après concentration des minerais près des exploitations, ceux-ci sont traités dans la région de Monchegorsk où les anciens gisements sont épuisés. Ces usines, très polluantes (rejet de SO₂ et de métaux lourds), produisent cuivre, nickel, cobalt, métaux précieux et acide sulfurique.
- 5 La baddeleyite Zr0₂ est produite conjointement avec l'apatite et le concentré de magnétite à Kovdor, à partir du minerai "phoscorite" constitué de calcite-magnétite-forstérite-apatite, baddeleyite et minéraux des terres rares. La production est de 6.200 tonnes annuelles et elle est presque entièrement exportée au Japon.
- <u>6 La loparite</u> est exploitée dans le massif de Lovozero pour ses teneurs en niobium (8 à 12% de Nb₂0₅), tantale et terres rares (REE). Elle est contenue (2 à 10%) dans certains niveaux de la syénite néphélinique appelée urtite, exploitée dans deux mines souterraines qui produisent 1 million de tonnes par an de concentré. Celui-ci est traité à Solikamsk, dans l'Oural

18

occidental, pour en extraire le niobium (80% de la consommation russe), le tantale (70%) et les métaux des terres rares comme le cerium.

7 - Les problèmes environnementaux liés à l'activité minière sont omniprésents autour des sites d'extraction de Kola : amas de stériles énormes (haldes) s'ajoutant aux résidus du traitement des minerais par flottation ("tailings") (6 milliards de tonnes au total). L'élaboration des concentrés d'apatite a produit 700 millions de tonnes de résidus dont la teneur en néphéline est de 50 à 52%, répartis sur 200 hectares.

Les concentrés de magnétite à partir des "B.I.F." ont entraîné le rejet de 160 millions de tonnes à 60 à 70% de quartz.

Dans la région de Pechenga, 170 millions de tonnes de stériles sont répartis sur plus de 1.000 hectares.

Les scories ("slags") résultant du traitement des minerais de Cu-Ni sont de 45 millions de tonnes à Pechenga et de 36 millions de tonnes à Monchegorsk.

8 - La pollution atmosphérique et la contamination des eaux sont aussi très importantes : 415.000 de tonnes de SO₂ sont rejetées annuellement dans l'atmosphère, les pluies acides qui en résultent, ont détruit la forêt autour de Monchegorsk sur des dizaines de milliers d'hectares.

50.000 tonnes par an de poussières contenant des éléments fluorés sont rejetées par les usines de traitement (Pechenga, Monchegorsk) ainsi que pour les métaux lourds : 1.600 tonnes de nickel, 880 tonnes de cuivre, 50 tonnes de cobalt (données de 1996).

On estime que 560 millions de m³ par an d'eaux polluées sont rejetées dont la moitié fait l'objet d'un traitement insignifiant et plus de 90 millions de m³ (17%) ne font l'objet d'aucun traitement.

Ces eaux transportent 600.000 tonnes de sulfates, 1.100 tonnes de nitrates, 470 tonnes de composés fluorés, des métaux lourds (dont 48 tonnes de nickel).

Le résultat de toutes ces atteintes à l'environnement est particulièrement visible autour des centres miniers et de traitement de Pechenga au Nord et de Monchegorsk dans la partie centrale de Kola. La déforestation due à l'acidification des sols et les pollutions par les métaux lourds s'étendraient sur plus de 2 millions d'hectares dans la péninsule de Kola.

CONCLUSION

La péninsule de Kola est constituée par un socle précambrien très varié (âge compris entre 3,2 et 1,6 milliards d'années), commun avec la Finlande et la Carélie et résultant de plusieurs orogenèses superposées.

Mais l'originalité de cette partie NE du bouclier baltique est due à l'intense magmatisme dévonien, à l'origine des plus grands plutons alcalins sur Terre. La richesse minéralogique provient de l'existence de ces roches alcalines sous saturées rares et de leurs pegmatites ainsi qu'aux intrusions de carbonatites qui leur sont associées.

Les richesses minières (métaux stratégiques) de Kola ont provoqué, à l'époque de l'URSS, son isolement. L'ouverture aux scientifiques occidentaux ne s'est faite que dans les années 90.

La prise de conscience des nombreux problèmes environnementaux est très récente mais rien n'est fait actuellement pour y remédier.

QUELQUES MINERAUX des PLUTONS ALCALINS de la PENINSULE de KOLA (RUSSIE)

Dans l'inventaire minéralogique de Kola, parmi les 848 minéraux décrits, 190 l'ont été pour la première fois dans les intrusions de roches alcalines, d'ultrabasites et de carbonatites d'âge Dévonien supérieur (- 365 à - 380 millions d'années).

Silicates:

Aegyrine (Pyroxène) Na Fe (Si₂ O₆)
Aenigmatite Na₂ Fe₅ Ti Si₆ O₂₀
Akermanite (Mélilite) Mg Ca₂ Si₂ O₇
Arfvedsonite (Amphibole) Na₃ (Fe,Mg)₄ FeSi₈ O₂₂ (OH)₂
Astrophyllite (K,Na)₃ (Fe,Mn)₇ Ti₂ Si₈ O₂₄ (0,OH)₇
Cancrinites (Feldspathoïdes) (Na, Ca, K)₆₋₈ (Al₆ Si₆ O₂₄)
(SO₄, CO₃, Cl)₁₋₂ 1-5H₂O
Chkalovite Na₂ Be Si₂ O₆
Eudialyte Na₁₂ Ca₆ Fe₃ Zr₃ (Si₃ O₉)₂ [Si₉ O₂₄ (OH)₃]₂
Fénaksite K Na Fe Si₄ O₁₀
Diopside (Pyroxène) Ca Mg (Si₂ O₆)

Fersmanite Na₅ Ca₁₁ Ti₅ Nb₃ Si₈ O₄₆ F₂

```
Hastingsite (Amphibole) Na Ca<sub>2</sub> (Fe<sup>2+</sup>, Mg)<sub>4</sub> Fe<sup>3+</sup> (Al<sub>2</sub> Si<sub>6</sub>)
               O22 (OH)2
              Kalsilite (Feldspathoïde) K Al Si O4
              Labuntsovite Na, K, (Ba, K), (Fe, Mg, Mn) 1+x Ti<sub>8</sub>, (Si<sub>4</sub>, O<sub>12</sub>),
(O,OH)<sub>8</sub> 10H<sub>2</sub>O
               Lamprophyllite Na<sub>2</sub> (Sr,Ba)<sub>2</sub> Ti<sub>3</sub> (SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (OH,F)<sub>2</sub>
               Lovozerite Na<sub>2</sub> Ca (Zr,Ti) Si<sub>6</sub> (O,OH)<sub>18</sub>
               Lorenzenite (Ramsayite) Na<sub>2</sub> Ti<sub>2</sub> Si<sub>2</sub> O<sub>9</sub>
               Magnesio-Astrophyllite (Na,K)<sub>4</sub> Mg<sub>2</sub> (Fe,Mg,Mn)<sub>7</sub> Ti<sub>2</sub> Si<sub>8</sub> O<sub>24</sub>
(O,OH,F)<sub>7</sub>
               Monticellite Ca Mg (SiO<sub>4</sub>)
               Murmanite Na<sub>3</sub> Ti<sub>4</sub> Si<sub>4</sub> O<sub>17</sub> F<sub>5</sub> H<sub>2</sub>O
               Natrolite (Zeolite) Na<sub>2</sub> (Al<sub>2</sub> Si<sub>3</sub> O<sub>10</sub>)<sub>2</sub> H<sub>2</sub>O
               Néphéline (Feldspathoïde) Na<sub>3</sub> K (Al<sub>4</sub> Si<sub>4</sub> O<sub>16</sub>)
               Noséane (Feldspathoïde) Na<sub>8</sub> (Al<sub>6</sub> Si<sub>6</sub> O<sub>24</sub>) (SO<sub>4</sub>)
               Phlogopite (Mica) K<sub>2</sub> (Mg Fe)<sub>6</sub> (Al<sub>2</sub> Si<sub>6</sub> O<sub>20</sub>) (F, OH)<sub>4</sub>
               Sodalite (Feldspathoïde) Na<sub>8</sub> (Al<sub>6</sub> Si<sub>6</sub> O<sub>24</sub>) Cl<sub>2</sub>
               Spinelle Ma Ala O4
               Tétraferriphlogopite (Mica) K Mg<sub>3</sub> [(Fe,Al) Si<sub>3</sub> O<sub>10</sub>] (OH)<sub>2</sub>
               Titanite-Sphène Ca Ti (SiO<sub>4</sub>) (O, OH, F)
               Ussingite Na<sub>2</sub> Al Si<sub>3</sub> O<sub>8</sub> (OH)
               Vermiculite (Mg, Fe, Al)<sub>3</sub> (Al, Si)<sub>4</sub> O<sub>10</sub> (OH)<sub>2</sub> 4H<sub>2</sub>O
Oxydes et hydroxydes:
               Baddelevite Zr O<sub>2</sub>
               Franconite (Na, Ca)<sub>2</sub> (Nb,Ti)<sub>4</sub> O<sub>11</sub> 9H<sub>2</sub>O
               Loparite (Ce) (Ce, Na, Ca)<sub>2</sub> (Ti, Nb)<sub>2</sub> O<sub>6</sub>
               Magnétite Fe Fe<sub>2</sub> O<sub>4</sub>
               Manasséite Mg<sub>6</sub> Al<sub>2</sub> (CO<sub>3</sub>) (OH)<sub>16</sub> 4H<sub>2</sub>O
               Pérovskite Ca Ti O<sub>3</sub>
               Tantalite (Mn, Fe) (Ta, Nb)<sub>2</sub> O<sub>6</sub>
               Titano-magnétite Fe<sub>2</sub> Ti O<sub>4</sub>
Halogénures:
               Fluorocérite (Ce, La) F<sub>3</sub>
               Villiaumite Na F
Phosphates:
               Apatite Ca<sub>5</sub> (PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>
               Belovite Na Sr<sub>3</sub> Ce (PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> F
               Bobiérrite Mg<sub>3</sub> (PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 8H<sub>2</sub>O
               Francolite Ca<sub>5</sub> (PO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (F,OH)
               Kovdorskite Mg<sub>2</sub> [PO<sub>4</sub>] (OH), 3H<sub>2</sub>O
```

Lomonossovite Na₂ Ti₂ O₂ (Si₂ O₇) (PO₄)

20

Professeur Hubert CURIEN (1924-2005)



Hubert Curien est décédé dans la nuit du dimanche 6 février 2005 dans sa maison de Loury (Loiret).

Avec lui disparaît, pour beaucoup un ami, un grand scientifique et un grand homme politique qui a su marquer de son empreinte une large période de la fin du XXe siècle, ce que l'on a appelé, à juste titre "Les années Curien".

Hubert Curien est né le 30 octobre 1924 à Cornimont dans les Vosges. Ses parents étaient tous deux fonctionnaires : son père receveur municipal et sa mère directrice d'école. Toute sa vie il restera fidèle à ses origines vosgiennes et aux valeurs que lui ont inculquées ses parents. Vosgien, il en a gardé une certaine simplicité mais aussi une grande résolution et ténacité dans la réalisation de ses projets. Ne disait-il pas que : "Les vosgiens sont résolus, on les dit têtus, mais ils ne sont pas compliqués et puis ils ont foi dans les valeurs fondamentales". Attaché aux valeurs républicaines, sa vie est le fruit de la réussite de l'école publique et sa carrière sera un exemple de dévouement

à la République. Son premier diplôme, peut-être l'un de ceux dont il est le plus fier, est le certificat d'études, où il obtient la première place en 1936. Toute sa vie il se souviendra du détail de l'examen et d'une petite impertinence qui lui valut une mauvaise note en composition française, heureusement compensée par ses autres résultats très bons. Entré au Lycée d'Epinal en 5°, il doit, à cause de la guerre, revenir au collège de Remiremont. C'est dans ce collège que se manifeste son goût pour la science et sa future orientation grâce à son professeur de physique, Lucien Barthélémy. Il se remémorera toujours les préceptes de ce premier guide : "une méthode qui consistait à regarder d'abord, puis à réfléchir et enfin à tenter d'expliquer". Il rejoint ensuite le lycée Saint Louis à Paris. Durant les vacances de l'été 1944, après une discussion avec le maréchal ferrant de Cornimont, il entre dans la Résistance et rejoint le maquis local de la Pierre-Piquante. A son retour au lycée Saint-Louis, après la Libération, ses condisciples s'étonnent de son engagement et lui font part des craintes qu'ils avaient eues qu'il "soit recalé au concours". Ceux-ci, comme le dira Hubert Curien, n'ont "retenu de la guerre que les tickets d'alimentation et la malnutrition". Hubert Curien, quant à lui, avait su répondre, bien précocement, à son premier rendez-vous avec l'Histoire.

En 1945, il est recu aux concours d'admission de l'Ecole Polytechnique et de l'Ecole Normale Supérieure (E.N.S.), il opte pour cette dernière. Il y découvre le monde de la physique en pleine évolution et plein essor. Sur les conseils d'Yves Rocard, il s'oriente vers la Cristallographie et commence sa thèse au sein du laboratoire de minéralogie (alors à la Sorbonne et qui deviendra le laboratoire de minéralogie et cristallographie en 1948). Ce laboratoire est particulièrement impliqué dans les développements de la radiocristallographie par rayons X qui était alors une discipline encore très jeune où il fallait trouver des réponses à de nombreuses questions cruciales et où beaucoup de méthodes de détermination étaient encore à inventer. En 1951, il soutient sa thèse sur « l'Etude des ondes élastiques et diffusion thermique des rayons X dans le réseau cubique centré : application au Fer » et est invité, la même année, au prestigieux Congrès Solvay. Il poursuit sa recherche sur la théorie de la diffusion Compton des rayons X dans les cristaux (sujet qui est encore étudié dans le laboratoire), les défauts dipolaires dans le fluorure de lithium. Il s'intéresse ensuite au diagramme de phase du gallium : il est le co-découvreur de trois phases métastables, β , γ , δ , pour lesquelles il détermine les structures cristallines. Ce qui était loin d'être simple, en

particulier pour la phase γ du gallium qui offrait des difficultés expérimentales importantes et qui possède une structure complexe, difficile à analyser avec les moyens restreints de l'époque. Par la suite, Hubert Curien oriente ses recherches sur les macles (associations de cristaux suivant des lois définies) et leur représentation théorique. Il introduit avec Υ. Le Corre (1958) et ensuite Donnay (1959) la théorie des groupes de couleur imaginée par A. V. Choubnikov et propose, avec R. Kern (1957-58) une théorie causale de leur apparition. Ses charges ultérieures l'éloignent peu à peu des travaux de recherches ce qui ne l'empêchera pas d'être toujours un scientifique actif. Ainsi, il a écrit un article du plus haut intérêt sur les cristaux dans l'Encyclopedia Universalis (dernière édition, 2001, Albin Michel)

L'enseignement a été pour Hubert Curien une activité essentielle qu'il a poursuivie toute sa vie même lorsqu'il était ministre de la recherche (beaucoup se souviennent des gardes du corps qui l'accompagnaient alors). Assistant (1949), Maître de Conférence (1953) puis Professeur (1956) à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris à la Sorbonne (puis à l'Université Pierre et Marie Curie à Jussieu), il enseigne la Minéralogie et la Cristallographie, d'abord sous la direction de Charles Mauguin et de Jean Wyart, puis il ouvre de nouveaux enseignements de 3e cycle de Cristallographie à la Sorbonne. En parallèle, il est professeur de 1954 à 1970 à l'E.N.S. pour la préparation de l'agrégation de Physique et de Chimie. Il continuera à assurer ses cours de Cristallographie jusqu'en 1994. Ses étudiants se souviennent de ses remarquables notes de cours qui ont été d'un précieux secours dans la compréhension de la cristallographie. Ils se souviennent aussi de son extraordinaire talent d'enseignant et de son éloquence qui rendaient des plus agréables des sujets aussi rébarbatifs que la théorie des groupes, l'analyse tensorielle ou la diffraction des rayons X.

A partir des années 1960, Hubert Curien s'engage dans des postes de responsabilités administratives de plus en plus importantes. Il devient vite un grand administrateur de la Recherche et marquera de son passage un nombre impressionnant d'institutions. En 1966, il est nommé directeur scientifique de la physique du C.N.R.S. (Centre National de la Recherche Scientifique) lors de la création du premier collège de direction scientifique. Il devient directeur général du C.N.R.S. en 1969, où il poursuit la mise en place des Laboratoires Associés, des Actions Thématiques Programmées et des Comités des Relations Industrielles, les futurs C.R.I.N.. En 1973, il est Délégué Général à la Recherche Scientifique et Technique (D.G.R.S.T.) où il crée les allocations de recherche au bénéfice des jeunes doctorants.

particulier pour la phase γ du gallium qui offrait des difficultés expérimentales importantes et qui possède une structure complexe, difficile à analyser avec les moyens restreints de l'époque. Par la suite, Hubert Curien oriente ses recherches sur les macles (associations de cristaux suivant des lois définies) et leur représentation théorique. Il introduit avec Υ. Le Corre (1958) et ensuite Donnay (1959) la théorie des groupes de couleur imaginée par A. V. Choubnikov et propose, avec R. Kern (1957-58) une théorie causale de leur apparition. Ses charges ultérieures l'éloignent peu à peu des travaux de recherches ce qui ne l'empêchera pas d'être toujours un scientifique actif. Ainsi, il a écrit un article du plus haut intérêt sur les cristaux dans l'Encyclopedia Universalis (dernière édition, 2001, Albin Michel)

L'enseignement a été pour Hubert Curien une activité essentielle qu'il a poursuivie toute sa vie même lorsqu'il était ministre de la recherche (beaucoup se souviennent des gardes du corps qui l'accompagnaient alors). Assistant (1949), Maître de Conférence (1953) puis Professeur (1956) à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris à la Sorbonne (puis à l'Université Pierre et Marie Curie à Jussieu), il enseigne la Minéralogie et la Cristallographie, d'abord sous la direction de Charles Mauguin et de Jean Wyart, puis il ouvre de nouveaux enseignements de 3° cycle de Cristallographie à la Sorbonne. En parallèle, il est professeur de 1954 à 1970 à l'E.N.S. pour la préparation de l'agrégation de Physique et de Chimie. Il continuera à assurer ses cours de Cristallographie jusqu'en 1994. Ses étudiants se souviennent de ses remarquables notes de cours qui ont été d'un précieux secours dans la compréhension de la cristallographie. Ils se souviennent aussi de son extraordinaire talent d'enseignant et de son éloquence qui rendaient des plus agréables des sujets aussi rébarbatifs que la théorie des groupes, l'analyse tensorielle ou la diffraction des rayons X.

A partir des années 1960, Hubert Curien s'engage dans des postes de responsabilités administratives de plus en plus importantes. Il devient vite un grand administrateur de la Recherche et marquera de son passage un nombre impressionnant d'institutions. En 1966, il est nommé directeur scientifique de la physique du C.N.R.S. (Centre National de la Recherche Scientifique) lors de la création du premier collège de direction scientifique. Il devient directeur général du C.N.R.S. en 1969, où il poursuit la mise en place des Laboratoires Associés, des Actions Thématiques Programmées et des Comités des Relations Industrielles, les futurs C.R.I.N.. En 1973, il est Délégué Général à la Recherche Scientifique et Technique (D.G.R.S.T.) où il crée les allocations de recherche au bénéfice des jeunes doctorants.

Sa carrière prend une nouvelle orientation en 1976, lorsqu'il accepte la présidence du C.N.E.S. (Centre National d'Etude Spatiales) qui traverse alors une période de crise à cause d'un manque de solidarité entre les différents partenaires européens. Il supervise le 1^{er} lancement, réussi, de la fusée Ariane

fin 1979, et créé peu après la société Arianespace qui a dépassé depuis longtemps la centaine de lancements. Beaucoup voient, aujourd'hui, en Hubert Curien le "père spirituel" de la fusée européenne. En 1978, il engage le programme SPOT d'observation de la Terre ainsi que le système de localisation Argos. En parallèle, de 1979 à 1984, il est le premier président de l'E.S.A. (Agence Spatiale Européenne). A ce poste il réussit à convaincre les autres pays membres de donner à l'Europe les movens de se maintenir dans la course vers l'espace entre les Etats-Unis et l'U.R.S.S. Diplomate, il sait établir et maintenir une coopération étroite avec ces deux géants : avec les soviétiques, il organise en 1982 le vol du 1er spationaute français, Jean-Loup Chrétien, puis, avec les étasuniens, en 1985, le vol de Patrick Baudry sur la navette spatiale. En 1984, Hubert Curien commence ses activités ministérielles au Ministre de la Recherche et de la Technologie. Il expliquait, avec cette touche d'humour qui lui était habituelle, son entrée dans cette fonction : « lors d'un lancement réussi à Kourou..., j'étais monté sur un tonneau pour dire quelques mots comme le veut l'usage, j'ai été accueilli par un tonnerre d'applaudissement.... Et Laurent Fabius, qui devait constituer un nouveau gouvernement, s'est alors dit que, s'il me suffisait de monter sur un tonneau pour être acclamé, je ferais un ministre très populaire ». Hubert Curien a assuré la fonction ministérielle sous l'autorité successive de quatre premiers ministres (L. Fabius, M. Rocard, E. Cresson, P. Bérégovoy). Il a su à la fois maintenir une priorité sur la recherche tout en restant un défenseur des programmes technologiques. De 1984 à 1986 il réussit à doper les effectifs et les crédits de recherche et, de 1988 à 1993, les crédits publics de la recherche ont été augmentés en termes réels de 15%. En près de 10 ans la part des dépenses de recherche est passée de 1.97 à 2.42% du PIB ce qui a permis à notre pays de rattraper un retard fort préjudiciable. On lui doit la réussite du programme technologique Eureka, lancé par le président François Mitterrrand. Apprécié par la grande majorité de la classe politique, Hubert Curien a fortement marqué l'histoire de la recherche scientifique française. Il a aussi marqué la recherche européenne : en 1994, il devient président du Conseil du Centre Européen de Recherche Nucléaire (C.E.R.N.).

En 1993, il est nommé à l'Académie des sciences. Il en est le président de 2001 à 2003. Entre temps, il a été président de la Fondation de France. Ces dernières années il était membre du Haut Conseil pour la Recherche et pour la Coopération Scientifique et Technologique.

Une autre facette de ses nombreuses activités a été son implications dans la vie associative. Il a été membre du Comité Exécutif de l'Union Internationale de cristallographie (IUCr, de 1963 à 1969) et président de la Société française de Minéralogie (1967), de l'Association française de Cristallographie (1969), de la fondation de l'E.N.S., etc. Il a aussi été, plus modestement, membre d'associations qui lui ont particulièrement tenu à cœur comme l'A.MI.S. (Association des amis de la collection de la Sorbonne)

Enfin n'oublions pas que Hubert Curien a été plus qu'un support pour les musées de minéralogie parisiens en général et de la collection de Jussieu en particulier. Au début de sa carrière scientifique, il a été proche de ce groupe de jeunes hommes, Claude Guillemin, Henry-Jean Schubnel et Pierre Bariand qui chacun allait se trouver à la tête d'un des trois musées de Paris. Il leur est resté toujours fidèle. Cet attachement à la minéralogie muséale a permis à ces musées de rester à la tête des musées internationaux durant une période où un certain nombre d'entre eux ont périclité. Modeste récompense de cet attachement, il se verra dédié, en 1968, un minéral trouvé à Mounana, Franceville, au Gabon : la curienite, Pb(UO₂)₂V₂O₈.5H₂O.

Malgré tous les honneurs, ses responsabilités et ses fonctions prestigieuses, Hubert Curien a toujours gardé un caractère aimable, un humour fin et une grande disponibilité avec les plus modestes, même dans des périodes où ses responsabilités étaient écrasantes. Il a su mener à bien avec clairvoyance, compétence, diplomatie et volontarisme des projets d'une rare complexité. Savant d'origine, il aimait la science et les valeurs qu'elle véhicule. Par un juste retour, l'immense majorité des scientifiques lui vouait une réelle admiration. Hubert Curien nous a aussi montré que pouvoir ne rime pas toujours avec conflit, prises de position "fracassantes" et recherche de la glorification. Il restera longtemps pour beaucoup une référence et un modèle.

Fonctions et titres

Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie Paris (1956-94), Cristallographe

Directeur Scientifique pour la physique au Centre National de la Recherche Scientifique (1966-69),

Directeur Général du Centre National de la Recherche Scientifique (1969-73)

Délégué Général à la Recherche Scientifique et Technique (1973-76)

Président du Centre National d'Etudes Spatiales (1976-84)

Ministre de la Recherche et de la Technologie (1984-86 puis 1988-

92)

Ministre de la Recherche et de l'Espace (1992-93)

Président du Conseil Scientifique de la Défense (1986-93)

Président de la Fondation Européenne de la Science (1979-84)

Président de l'Agence Spatiale Européenne (1981-84)

Vice-président du Comité Européen de Développement de la Science et de la Technologie (CEE) (1983)

Président du Conseil du Centre Européen de Recherches Nucléaires (CERN) (1994-96)

Président de la Fondation de France (1998-00)

Membre de l'Académie des Sciences depuis 1993

Président de l'Académie des Sciences (2001-03)

Grand Officier de la légion d'honneur

Nous remercions "La Liberté de l'Est", "Le Monde" ainsi que "L'Association française de Cristallographie" qui ont fourni une partie de la matière de cette notice. On trouvera une description très détaillée de l'influence scientifique de Hubert Curien dans l'ouvrage "Hubert Curien, pour une politique internationale de la science", édité en 1994 par les presses de l'Ecole Normale Supérieure.

La vie de la collection

Tristes nouvelles

Les premiers mois de l'année 2005 ont été particulièrement tristes. Trois personnes proches de la collection nous ont quitté. Le 6 février, Hubert Curien est décédé, terrassé par une soudaine maladie. Membre de la première heure de notre association, il lui a toujours apporté ses encouragements et son soutien (voir texte du bulletin). Le 30 mars suivant, Patrice Dublanchy s'est éteint. Bien qu'il n'était qu'un collectionneur de minéraux modeste et sans prétentions, il vouait un véritable culte à la collection de minéraux de Jussieu. Aussi, lorsque que notre association a été fragilisée, en 1999, par la défection de plusieurs membres du conseil d'administration, il a accepté, sans hésiter, d'en être le trésorier. Il n'est resté qu'une année à ce poste car la terrible maladie qui allait l'emporter, s'était déclarée et l'a contraint à abandonner toute activité. Le 2 avril, Eliane Badol mourrait après de longs mois de souffrances. Eliane n'était pas membre de l'AMIS, mais en tant que responsable financier du laboratoire de minéralogie-cristallographie de Paris, elle a assuré, jusqu'en 2001, la gestion des finances de la collection. Malgré son caractère tranché, c'était une vraie amie qui savait mettre de côté les frictions que la complexité de la comptabilité publique a le don de générer. Eliane a toujours su témoigner d'une grande affection auprès de tous les membres permanents de la collection.

Les nouvelles acquisitions

Après ces sinistres nouvelles, abordons un sujet plus agréable : celui de l'enrichissement de la collection. Malgré une année 2004 difficile, l'AMIS a connu un solde d'exercice légèrement positif (comme c'est le cas depuis 1999). Ce bilan positif a permis d'aborder plus sereinement l'année 2005. En janvier, il a été possible d'acquérir un très beau grenat de Tongbei, Fujian, Chine (AMIS). Il est constitué de trois cristaux de quartz légèrement fumé de 7 à 11 cm, partiellement recouverts de petits cristaux (2 à 3mm) de grenat spessartite. Ces cristaux sont gemmes, d'une très belle couleur orangé et souvent bien séparés les uns des autres. Par sa présentation et son esthétique, cet échantillon, malgré sa dimension assez modeste, est l'un des plus beaux connus pour ce gisement exceptionnel. Ce même mois, nous avons reçu en don (AMIS) une calcite de Sambava (voir bulletin 44) présentant trois macles de macles (8x6x6cm). Après ces acquisitions, j'ai participé à la grande migration vers Tucson.

Cette manifestation a été, cette année, assez décevante. Il n'y a pas eu de grandes nouveautés si ce n'est des andorites de Bolivie dont les plus grandes atteignent 10cm mais sont de mauvaise qualité (en fait il semble que les plus belles pièces, mieux formées, aient été négociées très tôt et qu'elles n'ont pas été visibles). La mine d'Imiter (Maroc) a fourni quelques spécimens de minéraux d'argent et d'argent natif assez prometteurs. Là aussi, ces minéraux ont été négociés sous le manteau et peu de personnes les ont vu. On pourrait citer encore de nombreux exemples du même type. On a aussi noté un lot assez important de quartz plus ou moins laiteux avec des cristaux octaédriques bleus de fluorite en inclusions. Les cristaux de quartz atteignent une dizaine de centimètres et ceux de fluorite quelques millimètres. Ils ont été trouvés à Miandrivazo (prov. de Fianarantsoa, Madagascar).

Nouvelles découvertes ou pas, les problèmes, que l'on rencontre à Tucson, sont d'un autre ordre. Ils sont la conséquence du succès que rencontre la minéralogie. Actuellement, il y a suffisamment de grands collectionneurs (individuels et institutionnels) pour que tout spécimen ou lot intéressant soient vendus rapidement. Le principal problème des grands marchands (les top dealers) n'est pas de trouver un acquéreur mais plutôt de trouver des minéraux de qualité. Certains voient dans cette situation une bulle spéculative. C'est probable, mais il faut reconnaître que, si bulle il y a, elle met du temps à exploser car cela fait près de 30 ans que les prix des minéraux (de qualité) ne cessent de monter. Il faut cependant remarquer que les hauts prix (les high prices, i.e. à partir de 30KUSD) sont surtout appliqués à des minéraux répondant à des critères bien spécifiques. Les principaux sont que le minéral soit connu, ou « à la mode », qu'il ait un bon pedigree (gisement classique ou provenance d'une collection connue), qu'il soit négocié par un « top dealer » et, enfin, qu'il réponde à un ensemble de critères bien acceptés chez les collectionneurs étasuniens (absence de cassures, belle esthétique, bonne couleur, bon éclat, poids acceptable, dimensions entre 2.5 et 18cm, soit la largeur d'un pouce et la longueur d'une main, etc.). Cette énumération suit, à peu près, un ordre décroissant.

Les acquéreurs aux moyens modestes peuvent se consoler en se disant que la cote de leur collection augmente. On peut aussi les rassurer en remarquant que la situation n'est pas si désespérée qu'il y paraît. Les effets de mode sont parfois éphémères, une étiquette (un pedigree) ne fait pas un bon échantillon (certains ne se gênent pas pour fabriquer des étiquettes de prestige). Les hauts prix, sur les découvertes récentes, concernent souvent des minéraux d'une

qualité jusqu'alors inconnue. Il est donc possible d'acquérir des spécimens de qualité moindre (mais largement supérieure à ce que l'on trouvait il y a 10 ou 20 ans) pour des prix correctes. On peut aussi essayer d'acheter en amont des marchands qui ont la réputation d'être chers, mais l'expérience montre que c'est encore chez eux que l'on trouve les spécimens de qualité satisfaisante et que l'on perd beaucoup de temps chez les autres fournisseurs (ce qui n'empêche pas quelques rares bonnes surprises).

En ce qui concerne la collection, il a été possible d'acquérir cette année une londonite de Madagascar (AMIS). La londonite est un borate de béryllium, aluminium et césium proche de la rhodizite (où le potassium est dominant sur le césium). Cette espèce, décrite en 2001, a été découverte, dans des pegmatites proches du mont Ibity qui avait déjà fourni de la rhodizite. Le spécimen acquis est un cristal jaune de 5.5cm sur une gangue de pegmatite (elbaite, feldspath, quartz). Les plus grands cristaux connus, pas trop cassés, atteignent 7cm, mais sont souvent restaurés. Depuis près de 5 ans, j'étais à l'affût d'un spécimen de ce minéral. Comme il n'était proposé que par petites quantités, il a fallu un certain temps pour se faire une idée correcte de ce qui avait été trouvé de mieux. D'un autre coté, cet approvisionnement, au goutte à goutte, a empêché qu'il se produise un effet de mode et les prix demandés pour cette rare espèce restent corrects. Autre acquisition malgache, un cristal de 10cm de quartz à fluorite de Miandrivazo (don à l'AMIS). La troisième acquisition (AMIS) est une calcite de Sokua (Guangdong, Chine), constituée de quatre cristaux scalénoédriques (6 à 8cm) sur lesquels se sont perchés des cristaux « tête de clous ». Ce spécimen où deux faciès cristallins cohabitent met bien en relief les problèmes liés à une reprise de croissance cristalline, à ce que les physiciens appellent une homoépitaxie. La quatrième acquisition est une scolécite de Nasik (Inde) extraordinaire formée d'une « demi-boule » de cristaux dépassant 10cm et un faisceau de cristaux sur le côté. L'ensemble, très esthétique, atteint environ 30x30x15cm. C'est l'une des meilleures (sinon la meilleure) scolécite connue. Elle a été trouvée il y a plus de 20 ans et je l'ai vu la première fois en 1986 à Bombay chez un marchand indien qui l'a conservée en collection jusqu'à cette année. Comme cette pièce est relativement fragile, j'ai mis une condition à l'achat: il fallait qu'elle arrive d'abord à la collection en bon état. Ce fut chose faite... trois mois plus tard. Je n'ai pas assisté cette année au show principal et d'après les échos que j'ai eus, le thème retenu, les minéraux de Chine, a été décevant. Il y avait cependant, dans cette exposition, un spécimen qui valait le déplacement. Il

30

s'agit d'un cristal d'émeraude de 13 cm (1869 carats) situé sur le côté d'un dôme de gangue constitué de cristaux de mica phlogopite (et non pas de calcite comme le prétendait l'étiquette) et de calcite. Il s'agit d'une des plus belles émeraudes naturelles connues. Elle a été trouvée en Caroline du Nord à proximité de la ville d'Hiddenite, en novembre 2003. Elle a été acquise par le musée de Houston pour une somme avoisinant le million de dollars et, vue sa qualité, la plupart des connaisseurs ont trouvé que c'est un prix avantageux pour Houston (au rythme actuel, l'AMIS mettra environ 50 ans pour dépenser une somme similaire!).

L'exposition météorite

L'exposition météorite a connu un grand succès, grâce, entre autres, aux nombreux articles que nous avons eus dans la presse générale et spécialisée. Elle a été prolongée jusqu'au 16 mai (officiellement, car elle n'a été remballée que le 23). Grâce à elle, la collection se relève de la mauvaise année 2004 (durant laquelle nous avons du fermer 2 mois) et retrouve un nombre de visiteurs comparable aux meilleures années.

La nuit des Musées

La collection a participé à la nuit des Musées, le 14 mai 2004. Cette manifestation est la première du genre, elle fait suite au printemps des musées auquel nous avons participé ces dernières années. Le principal changement est qu'au lieu d'ouvrir (gratuitement) la journée, il faut maintenant ouvrir le soir ou la nuit. La collection a donc été ouverte jusqu'à 23 heures. Je dois reconnaître que je ne croyais pas beaucoup au succès de cette initiative et que j'ai été très surpris des 454 visiteurs que nous avons accueillis entre 18 et 23 heures. L'an prochain, si nous sommes ouverts, il faudrait quelques volontaires de l'AMIS pour gérer ce flux.

L'avenir de la collection

L'emménagement au sous-sol de la barre 46-00, durant plusieurs années, se confirme. Un architecte a été sélectionné. Les plans sont prêts. Ils prévoirent un maintien du nombre de vitrines, un maintien de la surface d'exposition, un accès handicapés (via un ascenseur), des toilettes (handicapé et normale), etc. Seuls les bureaux et les salles de stockage verront leurs surfaces réduites. C'est un moindre mal dont il faudra s'accommoder. Nous sommes actuellement dans l'attente des diverses autorisations pour que les travaux commencent. Les délais restent toujours flous. Il est plus que probable que le déménagement de la collection ne commencera pas avant le début de l'année 2006.

A.MI.S

Association des Amis de la Collection de Minéraux de la Sorbonne.

Tour 25 - Rez de chaussée Case 73 4, place Jussieu 75252 PARIS Cedex 05