

Archives

Bulletin

de

L'A.M.I.S

numéro 35/36

31ème / 4ième trimestre 2000

LES MINERAUX METAMICTES ET LEUR GRANDE UTILITE POUR LES GENERATIONS FUTURES.

François Farges

(Conférence du 14 octobre 2000)

Université de Marne la Vallée - Institut Universitaire de France

Stanford University - Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris

A. Généralités

1. Introduction

Les minéraux métamictes sont des minéraux qui ont subi de forts dégâts d'irradiation depuis leur cristallisation et qui ont perdu leur cristallinité atomique d'origine (tout en conservant, le cas échéant, leurs faces cristallographiques). Ils deviennent alors des minéraux amorphes (sans périodicité cristalline) comme dans la zirconolite. Leurs propriétés physiques sont alors fortement modifiées comme leur densité (-10%), biréfringence.....

2. Origine de l'état métamictite

Les dégâts d'irradiation sont liés à la désintégration des différents isotopes de l'uranium (^{238}U et ^{235}U) et du thorium (^{232}Th) qui sont présents dans ces minéraux, soit à l'état d'éléments majeurs, soit à l'état de traces. Même à l'état de traces, U et Th peuvent détruire de manière significative la structure de leur minéral hôte. Le zircon est le minéral métamictite le plus abondant, dont la présence d'actinides dans la structure est souvent détectable à l'œil nu à travers la couleur verte (Fig. 1)



Figure 1 : Zircons taillés (Sri-Lanka, Thaïlande) de diverses couleurs : blanc, cognac, lie de vin, marrons, bleus(chauffés) et verts. Ces derniers sont particulièrement radioactifs et sont appelés par les gemmologistes « zircons bas », ce qui équivaut à un zircon métamictite. La couleur verte est liée à l'uranium 4+ en remplacement du zirconium dans la structure du zircon et est à l'origine de l'état métamictite.

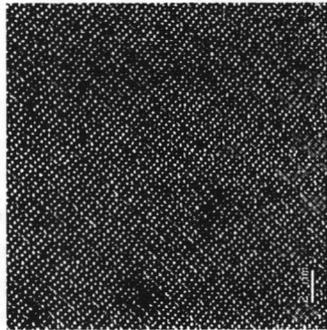


Fig. 3a — structure initiale : on observe bien l'alignement des atomes, prouvant la structure périodique de la zirconolite.

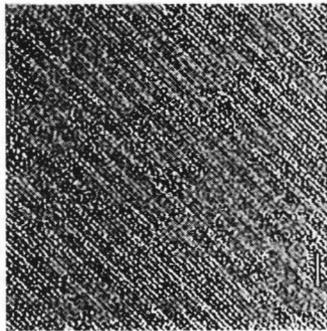


Fig. 3b — structure initiale légèrement bombardée : on observe quelques "fous" dans l'alignement des atomes.

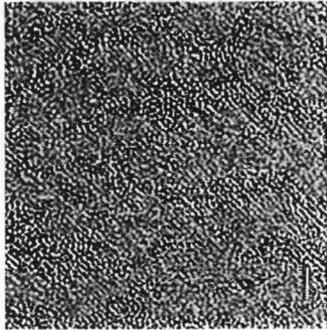


Fig. 3c — idem, avec un bombardement très avancé : très peu de domaines alignés sont encore observables.

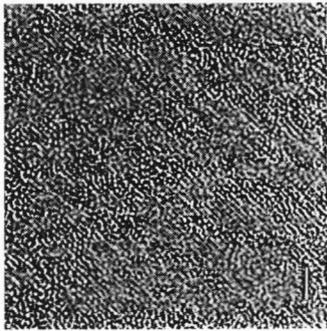


Fig. 3d — état final, très bombardé : on ne reconnaît plus de périodicité atomique.

Figure 2 : Images au microscope électronique de la structure de la zirconolite (source Wang, laboratoire Ewing, USA)(échelle environ 1cm pour 100nm)

La figure 2 montre un exemple de progression de l'état métamictique (reproduit en laboratoire grâce à un bombardement de particules alpha) dans une zirconolite de synthèse originellement cristallisée :

B. Minéraux métamictes pour le collectionneur

1. Echantillons visibles à la collection

A la collection de la Sorbonne, il existe beaucoup de minéraux métamictes (surtout en réserves). Un est particulièrement esthétique et se trouve dans la vitrine 17b Il s'agit d'un splendide monocristal de zircon vert de Ampanobe à Madagascar de dimensions 2,5 par 4 par 10 centimètres. (Figure 3)



Figure 3 : vitrine 17 de la Collection de la Sorbonne

On trouvera également au Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris d'autres échantillons, dont les cristaux d'euxénite, bétafite et davidite issus des explorations françaises à Madagascar. Le plus gros cristal de zircon du monde est au Muséum et provient de Mud Tanks en Australie, mais il n'est pas radioactif (encore moins métamictique).

2. Où trouve t-on des minéraux métamictes dans la nature ?

Un peu partout car les zircons uranifères sont assez communs. Mais peu d'échantillons sont spectaculaires pour le collectionneur, les musées ou les gemmologistes. La Scandinavie et Madagascar ont largement contribué à la richesse des collections française, surtout au début du siècle lors des études de Lacroix.

Parmi les origines les plus connues citons :

Europe :Langesunfjord, Arendal(Norvège), Ytterby (Suède)

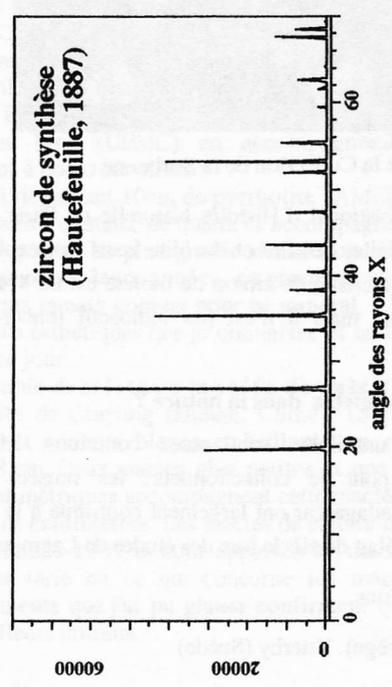
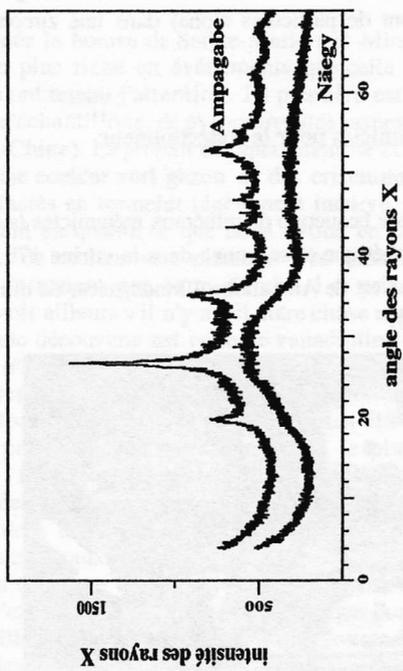


Figure 4 : Spectres de diffraction des rayons X d'un zircon 100% cristallin (de synthèse à gauche) et de deux zircons (à droite) : l'un est partiellement métamictique (on observe encore des raies de diffraction mais pas très fines ; origine : Amparabe, Madagascar, Collection de la Sorbonne, Paris) et l'autre est totalement métamictique (pas de raies de diffraction observable ; origine : Naegy, Japon, Collection du MNHM, Paris)

Amériques : Webster, Kinkle (New-York), Taos (Nouveau Mexique), Jacuripanga, Morro do Velho (Brésil), Ontario/québec

Asie : Ratnapura (Sri-lanka), Naegy, ishikawa (Japon)

Afrique : Ampanabe, Antsirabe (madagascar), Afrique du Sud ...

3. Considérations de santé publique envers les minéraux radioactifs

Il est important de signaler que certains de ces minéraux sont fortement radioactifs. Heureusement, la radioactivité de ces minéraux est essentiellement de type alpha (émission de noyaux d'hélium) et demeure donc peu nuisible à l'environnement et aux humains. Cette radioactivité est facilement arrêtée par des protections simples comme du verre, du plomb en épaisseurs de quelques millimètres ainsi que la peau. De ce fait le CEA ne classe pas les minéraux métamictes comme matières radioactives, mais comme matières nucléaires. Il est donc possible à tous de les manipuler sans en référer aux autorités de la sûreté nucléaire.

Néanmoins, la dose de radioactivité reçue lorsqu'on manipule ces échantillons est largement supérieure à la radiation actuellement admise par la législation. Il est donc nécessaire de prendre un minimum de précautions pour éviter une exposition trop forte aux rayonnements. Ainsi, il est quand même recommandé de ne pas garder de tels échantillons dans sa poche toute une vie (!!), de se laver les mains 2 fois au savon après leur manipulation. En fait, le plus grand danger (si minime soit-il) est lié à l'émission de radon (un gaz radioactif issu de la désintégration de l'uranium) qui est toxique pour l'homme, mais à des doses infiniment plus élevées que celles émises par un échantillon métamicté. On recommande alors de les confiner dans un endroit étanche ou ventilé (suivant les nécessités).

4. Comment identifier un minéral métamicté ?

C'est assez difficile, et quelquefois pas univoque dans les cas complexes non identifiables à l'oeil nu comme dans les oxydes complexes de la série du pyrochlore/zirconolite. Il faut tout d'abord prélever 3 échantillons. Un échantillon sera étudié tel quel alors que les 2 autres seront chauffés dans un four (en général 800-1400°C pendant quelques heures, sous atmosphère normale (air) et sous atmosphère réductrice) pour faire cicatriser les dégâts d'irradiation et recouvrer la structure originelle.

Deux méthodes expérimentales sont nécessaires : (1) l'analyse chimique (par exemple microsonde électronique) et (2) l'analyse cristallographique (par diffraction des rayons X) (Fig. 4).

Notez que l'état métamicté n'a pu être identifié que récemment (fin du XIX^e siècle). En effet, avant la découverte de la radioactivité et de la diffraction des rayons X (avant 1887) il était impossible de connaître cet état de la matière. On imagine alors

très bien la perplexité des minéralogistes comme Lacroix après leurs découvertes de minéraux automorphes ne diffractant pas les rayons X (!!) ce qui n'a pas manqué de poser énigmes et doutes aux premiers découvreurs de minéraux métamictes.....

C. Facteurs contrôlant l'état métamictic

Comme ce phénomène est lié à une décroissance de radioactivité avec le temps dans une structure donnée, 3 facteurs contrôlent particulièrement l'avancée de l'état métamictic dans un minéral :

- La structure même du minéral, apte à encaisser plus ou moins facilement ces dégâts. Ce facteur est lié souvent à la stabilité de la structure du minéral dans les conditions thermodynamiques (= pression et température) où le minéral est confiné durant l'accumulation des désintégrations. Si ces conditions sont différentes de celles qui ont prévalu lorsque le cristal s'est formé dans une roche (par exemple: cristallisation d'un zircon dans un granite, puis refroidissement du pluton et stabilisation d'une température « ambiante » pendant de très longues périodes de temps).
- La teneur actuelle en actinides (Th et U) qui a décliné par rapport à la teneur initialement présente dans le cristal. On comptera aussi les produits issus de la désintégration des actinides, notamment le plomb. Cette propriété est largement utilisée pour dater les roches et les minéraux. Mais nous verrons qu'en présence d'une quantité trop forte de dégâts, ces méthodes géochronologiques sont affectées par des pertes en actinides ou en plomb du minéral à dater.
- Le facteur temps est également d'importance, puisque l'état métamictic d'un minéral augmentera avec le temps. De nombreux métamictes sont âgés de plus de 500 millions d'années (mais pas tous !).

Nous allons maintenant détailler ces points.

1. Influence de la structure du minéral sur l'état métamictic.

L'étude de la minéralogie systématique montre deux choses très étranges :

- Les oxydes d'uranium (uraninite/pechblende : 88.1 poids% d'uranium) et de thorium (thorianite: 87.9 poids% de thorium) ne sont pas métamictes alors qu'un zircon avec 0.1 poids% d'uranium le sera.
- ThSiO_4 cristallise sous 2 formes: quadratique (thorite, forme α) et monoclinique (huttonite, forme β). Si la thorite naturelle est quasiment toujours métamictic, la huttonite ne l'est jamais.

Il existe donc des minéraux beaucoup plus sensibles aux dégâts d'irradiation que d'autres. Pendant longtemps on a cru que certains minéraux comme le zircon, le pyrochlore (etc) étaient des structures peu stables aux dégâts d'irradiation alors que la monazite (ou la huttonite) étaient résistants à l'état métamictic.

En fait, des expériences en laboratoire ont été menées pour recréer artificiellement l'état métamicté dans des minéraux par bombardement intensif de particules alpha. On s'est alors aperçu que des minéraux jamais métamictés dans la nature le devenaient en laboratoire. Pour comprendre ceci, il faut quantifier l'état métamicté, c'est à dire estimer la dose de radioactivité reçue par un échantillon. Il ne s'agit pas de mesurer sa radioactivité actuelle car il s'agit d'une radioactivité résiduelle qui n'a rien à voir avec la radioactivité d'origine. On définit plutôt la quantité de noyaux alpha reçue par l'échantillon depuis sa cristallisation et par milligramme (mg) d'échantillon.

2. Estimation de la quantité de particules α par milligramme (α/mg)

Il faut connaître la teneur actuelle en Th et U ainsi que l'âge du minéral. Si la teneur actuelle est facilement mesurable grâce aux microsondes électroniques ou nucléaires, l'âge requiert des méthodes plus sophistiquées comme la radiochronologie. Grâce à ces méthodes, on détermine l'âge des minéraux en mesurant les quantités relatives des différents isotopes de l'uranium (^{238}U et ^{235}U) et du plomb (^{206}Pb , ^{207}Pb et ^{208}Pb). Comme le plomb 206 est uniquement issu de la désintégration de l'uranium 238, on peut en déduire l'âge du minéral (de la même manière, le plomb 207 est issu de la désintégration de l'uranium 235) à partir de la constante de temps de cette réaction (constante de temps aussi appelée "période": elle vaut 7.04×10^8 et 4.46×10^9 ans, respectivement, pour l'uranium 235 et 238

Figure 5 et 6

Une valeur typique de particules α par milligramme pour un minéral métamicté est d'environ 10^{16} - 10^{18}

3. Processus de métamictisation

On observe qu'à doses de particules α par milligramme égales, il subsiste encore des différences: la thorite est métamicté alors que la huttonite ne l'est pas.

On a alors observé que la huttonite possédait une faculté à auto-cicatriser ses propres dégâts d'irradiation que la thorite ne possède pas. La plus forte stabilité de la huttonite lui permet de recristalliser car elle est stable dans les conditions normales de température et de pression auxquelles un minéral est exposé depuis sa cristallisation. Par contre, la thorite est un minéral qui n'est pas stable dans les conditions ambiantes de température et de pression car elle ne se forme qu'à forte température et pression.

Mais, avec des doses encore plus fortes (pas encore connues dans la nature: au delà de 10^{20} α/mg : il faudrait que la terre soit âgée de ~ 100 milliard d'années ou plus, ce qui n'arrivera jamais car elle disparaîtra dans 4-5 milliards d'années lorsque le Soleil mourant l'absorbera), on a observé un état métamicté dans la huttonite ainsi que bien d'autres minéraux n'étant jamais métamictés (comme le quartz !). Il existe donc une compétition entre l'auto-cicatrisation d'un minéral et sa dose d'alpha cumulée. Lorsque

le premier de ces 2 paramètres l'emporte, le minéral ne devient pas métamict. Dans le cas contraire, le minéral devient métamict. Ainsi on peut expliquer pourquoi thorianite et uraninite ne sont jamais métamictes alors que des oxydes beaucoup moins riches en actinides le sont. Uraninite et thorianite sont des formes très stables et donc ne peuvent pas s'amorphiser aussi facilement qu'un zircon.

4. Mécanismes à l'échelle de l'atome

Avant de comprendre ce qui se passe au niveau atomique dans un minéral qui devient métamict, il faut déjà comprendre comment les actinides naturels (Th et U) se localisent dans la structure d'un minéral hôte comme le zircon.

Grâce au rayonnement synchrotron (une source très intense de rayons X), il est possible de sonder la structure fine des zircons contenant de l'uranium et du thorium. On dit souvent que les actinides remplacent le zirconium dans la structure du zircon à cause du rayon (ionique) similaire de ces atomes). En fait, des études fines montrent que ce n'est pas si simple que cela.

On simule une désintégration de cet uranium central par l'émission d'une particule alpha (Figure 7). La particule alpha est projetée à très grande vitesse dans la structure et va choquer les atomes situés sur sa trajectoire. Les atomes choqués sont alors déplacés de leur position théorique et un état amorphe local va s'installer.

5. Cinétique d'un dégât d'irradiation

On a pu modéliser les effets cumulés sur la structure du zircon au bout de millions d'années, grâce à des calculs sur ordinateur (dynamique moléculaire) (Figures 8)

Au delà de 10^{16} alpha par mg, on obtient une structure totalement amorphisée dans laquelle les atomes se sont réorganisés

D. Applications pour les générations futures.

La nature nous offre des exemples de matériaux qui ont subi de très forts dégâts d'irradiation ($\sim 10^{18}$ α /mg) pendant de très longues périodes de temps (10^9 ans). Certains de ces minéraux restent cristallisés, d'autres deviennent métamictes. Parmi ceux qui deviennent métamictes, on observe que l'uranium reste sous sa forme initiale, l'uranium tétravalent (comme dans la zirconolite par exemple). Par contre, dans certains zircons (Madagascar notamment), des zircons montrent que l'uranium s'est désintégré en uranium hexavalent (forme très soluble de l'uranium et donc potentiellement contaminante).

Il est donc possible d'utiliser ces matériaux, les zirconolites, pour contenir les déchets nucléaires très fortement radioactifs, issus de la combustion de l'uranium enrichi dans les centrales nucléaires. Les déchets nucléaires très fortement radioactifs (comme le plutonium ou l'américium) sont aussi issus du démantèlement des nombreux missiles stratégiques, suite aux accords bilatéraux de désarmement. Figure 9

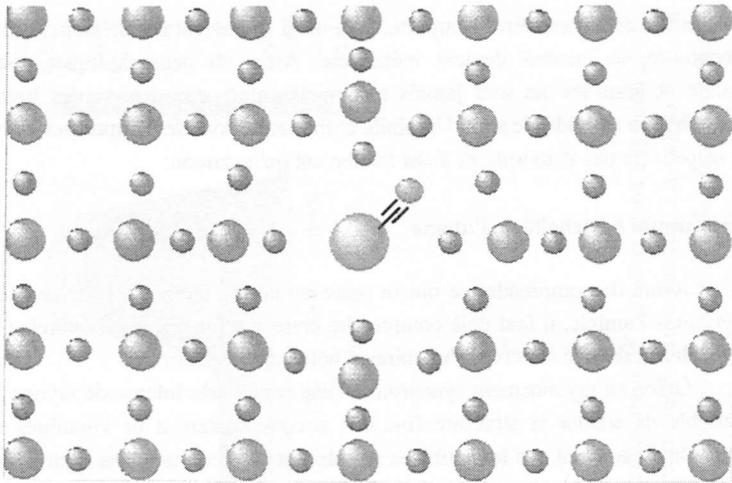
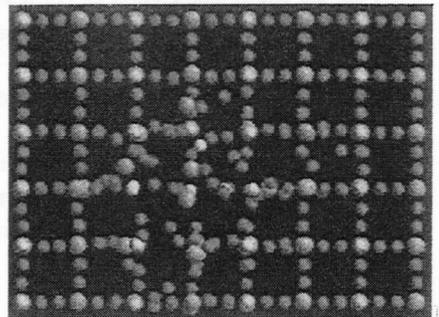
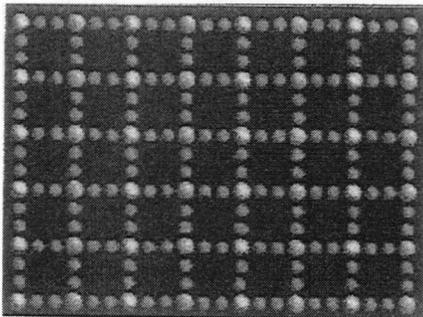
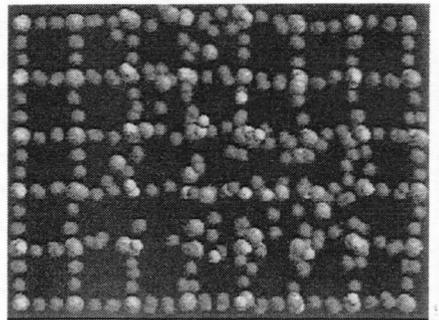


Figure 7 : Création d'un dégât d'irradiation



8 a, : à $t=0$ secondes, la structure initiale avant l'éjection d'une particule alpha (figure 7) par un atome (en bas à gauche)

8e, : à $t= 34$ nanosecondes, les atomes déplacés par la particule alpharicochent sur plein d'atomes voisins: une cascade de collisions est simulée ;



8f, à $t=180$ nanoseconde, lescascades résonnent entre elles, ce qui fait vibrer la structure.

Figure 8 : Modélisation des effets cumulés sur la structure du zircon ; calculs sur ordinateur de dynamique moléculaire. Nous ne représenterons que 3 étapes extrêmes.a,e,f

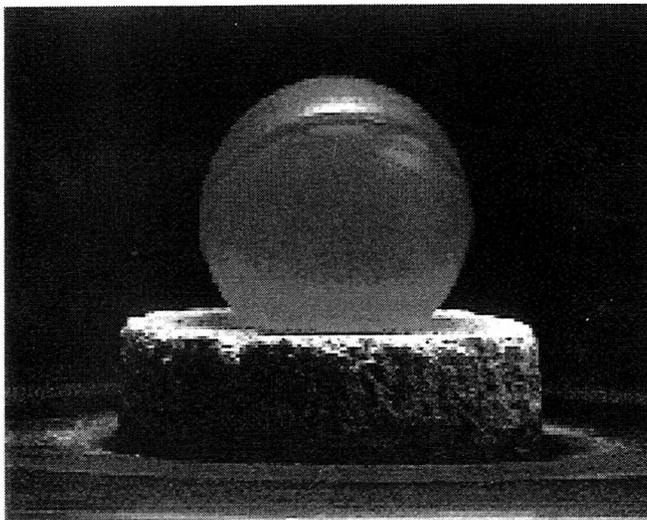


Figure 9 : boule de plutonium (1cm de diamètre environ) utilisée comme source de chaleur pour les missions Apollo(auto-incandescente)

Si le plutonium est beaucoup plus radioactif que l'uranium, les minéraux naturels sont beaucoup plus vieux que ces déchets nucléaires. Les deux facteurs se compensent car les doses de radioactivité encaissées par des zirconolites de synthèse dopées au plutonium est de l'ordre de 10^{13} au bout de 20 ans. Il est donc possible de stocker ces déchets dans des zirconolites et leurs équivalents synthétiques, pendant au moins 10^5 ans, ce qui est largement suffisant pour que le plutonium se désintègre en isotopes stables.

E. Prospectives

Au travers de ce petit papier, j'espère avoir montré une application inattendue de la minéralogie moderne, qui est à cheval entre les sciences naturalistes, les sciences des matériaux, la physique/chimie et les sciences mathématiques et de l'information. J'espère aussi avoir montré que les minéraux métamictes, fort mal aimés à cause de leur complexité et de leur manque d'esthétisme, ont une importance actuelle très forte et contribuent à faire entrer la minéralogie dans le monde moderne des sciences à haute technologie. Ce fait est très important car de nombreux géochimistes et physiciens (connus) auraient beaucoup à apprendre de la vraie minéralogie dont la complexité n'a pas d'égale dans nos esprits, sinon notre curiosité. Egalement, les développements récents de la minéralogie moderne ont été nombreux et plus du ressort de la physique théorique que du naturalisme; la géochimie française étant encore engluée dans une certaine innocence poétique des mécanismes atomistiques sur lesquels elle fonde pourtant ses théories globales mais qu'elle dédaigne par manque de curiosité.

Ainsi, la construction d'une nouvelle source de rayonnement synchrotron en France (projet SOLEIL) est fondamentale pour encourager la jeune minéralogie française (ce cours n'aura jamais pu voir le jour sans le rayonnement synchrotron) qui renaît actuellement de cendres peu fertiles laissées par certains de nos aïeux, qui n'avaient pas vu arriver un vent nouveau.

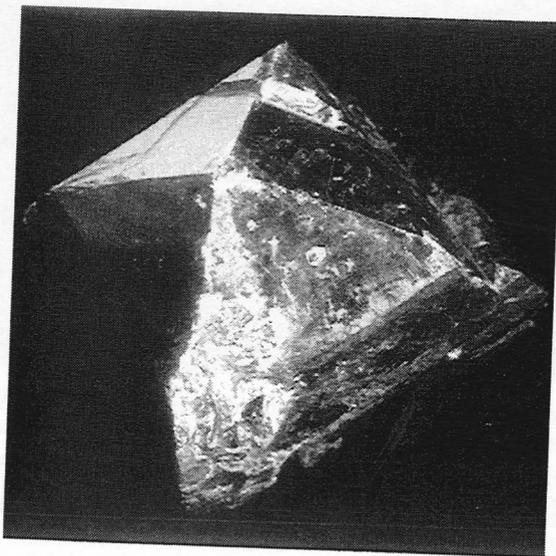


Figure 10 : Cristal de zircon naturel : le verrez-vous comme avant, désormais ?

Ce papier est consultable sur Internet en couleurs et animé à l'adresse suivante :
<http://www.univ-mlv.fr/~farges/metamictite/>

Remerciements. L'auteur remercie de nombreux collègues et amis pour les sources iconographiques et notamment les laboratoires des professeurs Ewing (Ann Arbor, USA) et Salje (Cambridge, GB).

Bibliographie (essentiellement en anglais) : se reporter au site internet

Table 1 — Liste des principaux minéraux métamictes.

(a) oxydes		(b) oxydes (suite)	
• groupe du pyrochlore, série de la zirkelite/zirconolite		• <u>série fergusonite-(Y) - formanite-(Y)</u>	
Zirconolite	(Ca,Fe,REE,Zr,Th)(Zr,Nb,Ti,Ta,Fe)Ti ₂ O ₇	Fergusonite -(Y)	YNbO ₄
Polymignite	(Ca,Fe,REE,Zr,Th)(Zr,Nb,Ti,Ta,Fe)Ti ₂ O ₇	Fergusonite -(Ce)	(Ce,La,Nd)NbO ₄
Zirkelite	(Ca,Th,Ce)Zr(Ti,Nb) ₂ O ₇	Fergusonite -(Nd)	(Nd,Ce)NbO ₄
• <u>groupe de la crichtonite</u>		Fergusonite-(Y)	YNbO ₄
Davidite-(Ce)	(Ce,La)(Y,U)(Ti,Fe) ₂₀ O ₃₈	Fergusonite-(Ce)	(Ce,Nd,La)NbO ₄ · 0.3(H ₂ O)
Davidite-(La)	(La,Ce,Ca)(Y,U)(Ti,Fe) ₂₀ O ₃₈	Fergusonite-(Nd)	(Nd,Ce)(Nb,Ti)O ₄
• <u>groupe du pyrochlore, série de la betafite, avec Ti > (Nb,Ta)</u>		Formanite-(Y)	YTaO ₄
Betafite	(Ca,Na,U) ₂ (Ti,Nb,Ta) ₂ O ₆ (OH)	• <u>série baddeleyite - uraninite</u>	
Stibiobetafite	(Sb,Ca) ₂ (Ti,Nb,Ta) ₂ (O,OH) ₇	Tazheranite	CaTiZr ₂ O ₈
Yttrobetafite-(Y)	(Y,U,Ce) ₂ (Ti,Nb,Ta) ₂ O ₆ (OH)	Calzirtite	CaZr ₃ TiO ₉
Plumbobetafite	(Pb,U,Ca)(Ti,Nb) ₂ O ₆ (OH,F)	Cerianite-(Ce)	(Ce,Th)O ₂
• <u>groupe du pyrochlore, série du pyrochlore, avec Nb > Ti</u>		• <u>oxydes non encore classés</u>	
Pyrochlore	(Na,Ca) ₂ Nb ₂ O ₆ (OH,F)	Zirconolite-2M	CaZrTi ₂ O ₇
Calciobetafite	Ca ₂ (Ti,Nb) ₂ (O,OH) ₇	Zirconolite-3T	CaZrTi ₂ O ₇
Kalipyrochlore	(K,Sr) _{2-x} Nb ₂ O ₆ (O,OH) · n(H ₂ O)	IMA98.059	(Bi,U,Ca,Pb) _{1+x} (Nb,Ta) ₂ O ₆ (OH) · n(H ₂ O)
Strontiopyrochlore	Sr ₂ Nb ₂ (O,OH) ₇	(c) phosphates (très peu métamictes)	
Bariopyrochlore	Ba,Sr) ₂ (Nb,Ti) ₂ (O,OH) ₇	• <u>série Xenotime-(Y) - Wakefieldite-(Ce)</u>	
Ytropyrochlore-(Y)	(Y,Na,Ca,U) ₁₋₂ (Nb,Ta,Ti) ₂ (O,OH) ₇	Xenotime-(Y)	YPO ₄
Ceripyrochlore-(Ce)	(Ce,Ca,Y) ₂ (Nb,Ta) ₂ O ₆ (OH,F)	• <u>groupe de la monazite</u>	
Plumbopyrochlore	(Pb,Y,U,Ca) _{2-x} Nb ₂ O ₆ (OH)	Monazite-(La)	(La,Ce,Nd)PO ₄
Uranpyrochlore	(U,Ca,Ca) ₂ (Nb,Ta) ₂ O ₆ (OH,F)	Monazite-(Ce)	(Ce,La,Nd,Th)PO ₄
• <u>groupe du pyrochlore, série de la microlite avec Ta > Nb</u>		Monazite-(Nd)	(Nd,Ce,La,Pr,Sm,Gd)(P,Si)O ₄
Microlite	(Na,Ca) ₂ Ta ₂ O ₆ (O,OH,F)	Cheralite-(Ce)	(Ce,Ca,Th)(P,Si)O ₄
Stannomicrolite	(Sn,Fe)(Ta,Nb,Sn) ₂ (O,OH) ₇	Brabantite	CaTh(PO ₄) ₂
Stibiomicrolite	(Sb,Ca,Na) ₂ (Ta,Nb) ₂ (O,OH) ₇	• <u>groupe du rhabdophane</u>	
Bariomicrolite	Ba ₂ (Ta,Nb) ₂ (O,OH) ₇	Rhabdophane-(Ce)	(Ce,La)PO ₄ · (H ₂ O)
Plumbomicrolite	(Pb,Ca,U) ₂ Ta ₂ O ₆ (OH)	Rhabdophane-(La)	(La,Ce)PO ₄ · (H ₂ O)
Natrobistantite	(Na,Cs)Bi(Ta,Nb,Sb) ₄ O ₁₂	Rhabdophane-(Nd)	(Nd,Ce,La)PO ₄ · (H ₂ O)
Bismutomicrolite	(Bi,Ca)(Ta,Nb) ₂ O ₆ (OH)	Brockite	(Ca,Th,Ce)(PO ₄) · (H ₂ O)
Uranmicrolite	(U,Ca) ₂ (Ta,Nb) ₂ O ₆ (OH)	Tristramite	(Ca,U,Fe)(PO ₄ ,SO ₄) ₂ · 2(H ₂ O)
• <u>série de la columbite</u>		Grayite	(Th,Pb,Ca)PO ₄ · (H ₂ O)
Magnocolumbite	(Mg,Fe,Mn)(Nb,Ta) ₂ O ₆	Ningyoite	(U,Ca,Ce) ₂ (PO ₄) ₂ · 1-2(H ₂ O)
Manganocolumbite	(Mn,Fe)(Nb,Ta) ₂ O ₆	(d) silicates	
Ferrocolumbite	FeNb ₂ O ₆	• <u>nesosilicates :</u>	
Manganotantalite	MnTa ₂ O ₆	zircon	ZrSiO ₄
Ferrotantalite	FeTa ₂ O ₆	coffinite	USiO ₄ - U(SiO ₄) _{1-x} (OH) _{4x}
• <u>série polycrase-(Y) - loranskite</u>		thorite	ThSiO ₄
Polycrase-(Y)	(Y,Ca,Ce,U,Th)(Ti,Nb,Ta) ₂ O ₆	huttonite	ThSiO ₄
Uranopolycrase	(U,Y)(Ti,Nb,Ta) ₂ O ₆	thorogummite	Th(SiO ₄) _{1-x} (OH) _{4x}
Yttrocrasite-(Y)	(Y,Th,Ca,U)(Ti,Fe) ₂ (O,OH) ₆	hafnon	HfSiO ₄
Fersmite	(Ca,Ce,Na)(Nb,Ta,Ti) ₂ (O,OH,F) ₆	Umbozerite	Na ₃ Sr ₄ ThSi ₈ (O,OH) ₂₄
Euxenite-(Y)	(Y,Ca,Ce)(Nb,Ta,Ti) ₂ O ₆	• <u>nesosubsilicates :</u>	
Samarskite-(Y)	(Y,Fe,U)(Nb,Ta) ₅ O ₄	Titanite	CaTiSiO ₅
Ishikawaite	(U,Fe,Y,Ca)(Nb,Ta) ₄ O ₄ (?)	Gadolinite-(Y)	Y ₂ FeBe ₂ Si ₂ O ₁₀
Yttrocolumbite-(Y)	(Y,U,Fe)(Nb,Ta) ₄ O ₄	Gadolinite-(Ce)	(Ce,La,Nd,Y) ₂ FeBe ₂ Si ₂ O ₁₀
Yttrotantalite-(Y)	(Y,U,Fe)(Ta,Nb) ₄ O ₄	Melanocerite-(Ce)	(Ce,Th,Ca) ₅ (Si,B) ₃ O ₁₂ (OH,F) · n(H ₂ O)
Loranskite-(Y)	(Y,Ce,Ca)ZrTaO ₆ (?)	• <u>sorosilicates :</u>	
• <u>série de l' aeschynite</u>		Yttrialite-(Y)	(Y,Th) ₂ Si ₂ O ₇
Aeschynite-(Y)	(Y,Ca,Fe)(Ti,Nb) ₂ (O,OH) ₆	Ekanite	ThCa ₂ Si ₈ O ₂₀
Aeschynite-(Ce)	(Ce,Ca,Fe)(Ti,Nb) ₂ (O,OH) ₆	Iraqite-(La)	K(La,Ce,Th) ₂ (Ca,Na) ₄ (Si,Al) ₁₆ O ₄₀
Aeschynite-(Nd)	(Nd,Ce)(Ti,Nb) ₂ (O,OH) ₆	Tritomite-(Y)	(Y,Ca,La,Fe) ₅ (Si,B,Al) ₃ (O,OH,F) ₁₃
Vigezzite	(Ca,Ce)(Nb,Ta,Ti) ₂ O ₆	Tritomite-(Ce)	(Ce,La,Ca,Y,Th) ₅ (Si,B) ₃ (O,OH,F) ₁₃
Niobo-aeschynite-(Ce)	(Ce,Ca)(Nb,Ti) ₂ (O,OH) ₆	Karnasurtite-(Ce)	(Ce,La,Th)(Ti,Nb)(Al,Fe)(Si,P) ₂ O ₇ (OH) ₄ · 3(H ₂ O)
Niobo-aeschynite-(Nd)	(Nd,Ce)(Nb,Ti) ₂ (O,OH) ₆	Tranquillityite	Fe ₈ (Zr,Y) ₂ Ti ₃ Si ₃ O ₂₄
Rynersonite	Ca(Ta,Nb) ₂ O ₆	Chevkinite-(Ce)	(Ce,La,Ca,Na,Th) ₂ (Fe,Mg ₂ ((Ti,Fe) ₃ Si ₂ O ₂₂
Tantalaeschynite-(Y)	(Y,Ce,Ca)(Ta,Ti,Nb) ₂ O ₆	Karnasurtite-(Ce)	(Ce,La,Th)(Ti,Nb)(Al,Fe)(Si,P) ₂ O ₇ (OH) ₄ · 3(H ₂ O)
• <u>série thorutite - orthobrannerite</u>		Allanite-(Y)	(Y,Ce,Ca) ₂ (Al,Fe) ₃ (SiO ₄) ₃ (OH)
Thorutite	(Th,U,Ca)Ti ₂ (O,OH) ₆	Allanite-(La)	Ca(La,Ce)(Fe,Mn)(Al,Fe) ₂ (SiO ₄)(Si ₂ O ₇)O(OH)
Brannerite	(U,Ca,Ce)(Ti,Fe) ₂ O ₆	Allanite-(Ce)	(Ce,Ca,Y) ₂ (Al,Fe) ₃ (SiO ₄) ₃ (OH)
Orthobrannerite	U ₂ Ti ₂ O ₁₂ (OH) ₂	Vesuvianite	Ca ₁₀ Mg ₂ Al ₄ (SiO ₄) ₅ (Si ₂ O ₇) ₂ (OH) ₄
• <u>série petscheckite - liandratite</u>		Steenstrupine-(Ce)	Na ₁₄ Ce ₆ Mn ₂ Fe ₂ (Zr,Th)(Si ₆ O ₁₈) ₂ (PO ₄) ₇ · 3(H ₂ O)
Petscheckite	UFe(Nb,Ta) ₂ O ₈	Thorosteenstrupine	(Ca,Th,Mn) ₃ Si ₄ O ₁₁ F · 6(H ₂ O)
Liandratite	U(Nb,Ta) ₂ O ₈		

Table 2. Caractéristiques minéralogiques de divers silicates métamictes.

échantillon/origine	cote ¹	couleur	%métamictite (/synthétique)	dose reçue (10 ¹⁶ α/mg)	age (en 10 ⁹ ans)
ZIRCONS :					
Mud Tanks, Australie	SORB #8438	orange	27	< 10 ⁻³	0.45
Diamantina, Brésil	MNHN ??	brun	74	< 10 ⁻³	0.65
Miask, Oural, Russie	SORB #7121	vert	93	0.2	0.42-0.32
Betafo, Madagascar	SORB #8676	brun	96	3	1.65-0.5
Ampagabe, Madagascar	SORB #8221	brun	97	3	1.65-0.5
Hitterö, Norvège	ENSMP #19391	blanc	98	2	1.64-0.9
Näegi#1, Mino, Japon	ENSMP #19419	vert	98	2	0.125
Näegi#2, Mino, Japon	ENSMP #19419	vert	100	4	0.125
Sri-Lanka	MNHN ??	vert	100	0.5	0.56
Kinkle's Quarry, USA	MNHN #2432C	noir	100	6	0.3-0.35
THORITES :					
Ambatofotsy, Madagascar	SORB #7229	jaune	98	20	0.5-1.65
Andranomitroky, Mada.	SORB #8616	jaune	99	20	0.5-1.65
?, Madagascar	SORB #7221	brun	99	30	0.5-1.65
Brevik, Norvège	ENSMP ??	noir	100	50	0.9-1.64
URANOTHORITES :					
Arendal, Norvège	SORB #7224	brun	99	80	0.9-1.64
Tvegestrand, Norvège	MNHN ??	jaune	100	100	0.9-1.64
Svenes, Norvège	ENSMP ??	brun	100	70	0.9-1.64
THOROGUMITES					
Andranomitroky, Madag.	SORB #8616	jaune	98	20	0.9-1.64
Iazaka, Fukushima, Japon	SORB #8577	jaune	99	10	0.2
¹ collection d'origine :					
SORB = Collection de la Sorbonne (Laboratoire de Minéralogie-Cristallographie), Paris.					
ENSMP = Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.					
MNHN = Museum National d'Histoire Naturelle, Paris.					

Vie de la collection

Cette année la bourse de Sainte-Marie-aux-Mines (dernier week-end de juin) a été beaucoup plus riche en événements que celle de l'an dernier. Deux découvertes majeures ont retenu l'attention. La première est celle d'un lot impressionnant, en nombre d'échantillons, de pyromorphites issues de la mine de Goncheng à Guling (Guanxi, Chine). La plupart des spécimens de cette mine sont d'excellente qualité, ils ont une couleur vert gazon et des cristaux dépassant rarement un centimètre avec un faciès en tonnelet légèrement incurvé. Très peu d'échantillons cependant dépassaient en qualité ce que nous avons en collection. J'ai cependant noté un spécimen de couleur vert pistache très inhabituelle ainsi qu'une pièce où les cristaux formaient une sorte d'arche. Les prix demandés pour ces pièces m'ont incité à voir ailleurs s'il n'y avait autre chose avec un meilleur rapport qualité-prix. La seconde découverte est celle de vanadinites de Mibladen (Maroc) d'une qualité que l'on n'avait pas vu depuis une bonne quinzaine d'années. Quelques cristaux atteignaient 5cm et avaient la meilleure teinte rouge et le meilleur éclat. Les échantillons où les cristaux de vanadinites étaient sur de la barytine blanche ont été très prisés. Cependant le spécimen le plus impressionnant n'avait pas de barytine : il dépassait 50cm avec de nombreux cristaux avoisinant 5cm. Là aussi les prix demandés n'incitaient pas à un achat rapide.

Ces deux découvertes semblent avoir focalisé l'attention des acheteurs car plusieurs minéraux du plus haut niveau ont eu un certain mal à trouver acquéreurs. En ce qui concerne la collection, la moisson a été plus que satisfaisante compte tenu de l'expérience qui nous a montré que l'on trouvait en moyenne assez peu d'échantillons pour Jussieu dans cette bourse. Avant de dresser l'inventaire des trouvailles, je rappellerai que les acquisitions de la collection se classent en deux catégories : celle où les minéraux sont financés par des fonds issus de l'université P. et M. Curie (ces acquisitions appartiennent donc à l'université) et celle où les fonds proviennent de l'A.M.I.S. (ces acquisitions appartiennent donc à l'A.M.I.S. dont la collection est statutairement en dépôt à durée indéfinie à la collection de Jussieu). Par la suite pour distinguer les catégories d'acquisitions j'inscrirai (AMIS) ou bien (UPMC) en accompagnement de la description. Passons maintenant à nos trouvailles :

- 1 - un cristal dépassant 10cm de pyrrhotite (AMIS) de Dalnegorsk (Russie) posé sur un lit de petits cristaux de quartz et accompagné d'autres cristaux de pyrrhotite de taille plus petite. La plus grande dimension de l'ensemble est proche de 20cm. Connus depuis plusieurs années, ce gisement s'est rapidement classé comme l'un des meilleurs jamais connus pour ce minéral. L'échantillon acquis cette année est l'un des plus esthétiques que je connaisse et sa taille le classe parmi les meilleurs connus à ce jour.
- 2 - Un ensemble de **cristaux maclés de calcite** (AMIS) provenant de **Lei Ping** à proximité de Guiyang (Hunan, Chine). La plus grande macle, selon {10.4}, associe deux cristaux blancs et brillants en rhomboèdres aigus dont la taille avoisine 8 cm. Deux macles plus petites et une multitude de cristaux transparents effilés centimétriques accompagnent cette macle. Le tout forme un ensemble d'une quinzaine de centimètres. Les macles de calcite de ce gisement ont été trouvées au cours de l'année 1997 et sont apparues à Tucson en 1998. Cette source s'est très rapidement tarie en ce qui concerne les macles de grandes tailles. Tous les renseignements que j'ai pu glaner confirment que le spécimen acquis est l'un des douze meilleurs connus.

- Un **spinelle (UPMC) rouge foncé translucide de Mogok** (Myanmar, ex-Birmanie) en macle du spinelle double. Rappelons que la macle dite du spinelle est une macle courante dans le système cubique qui associe deux demi-cristaux octaédriques. La forme courante de cette macle peut être décrite comme un "triangle épais". Dans certains cas rarissimes on trouve un groupement où deux macles en triangle sont accolées selon la même loi de macle : l'ensemble a un contour en forme de croix de David. C'est un groupement de ce type qui a été acquis. En plus de la rareté exceptionnelle de cette macle double, le spécimen a une taille confortable, environ 8cm.

3 - Une **ferroactinolite du Pakistan (AMIS)**. L'an dernier un des deux plus grands cristaux intacts de cette découverte, maintenant tarie, a été acquis (UPMC). Il se devait d'être accompagné d'un groupement de cristaux, plus petit mais plus esthétique. Or ce type de groupement est plus que rare : ce gisement a fourni essentiellement soit des monocristaux, soit des groupements confus, presque massifs de cristaux. Le spécimen acheté cette année répond à nos attentes : ils est composé de deux cristaux proches de 10 cm perchés l'un sur l'autre, le tout étant agrémenté d'une albite de 3cm.

4 - Un amas cristallin (AMIS) associant de la **villiaumite, le la lomonosovite, de la fluorcaphite (rarissime), de la microcline et de la pectolite**. Cet échantillon d'une vingtaine de centimètres est une illustration des paraengenèses exceptionnelles rencontrées dans la **péninsule de Kola (Russie)**.

Après cette moisson de qualité, je pouvais aborder l'esprit plus serein la bourse de Munich qui s'annonçait sous les plus noirs auspices. En effet l'organisateur n'avait pas pu obtenir un emplacement suffisant et cette bourse a donc été amputée de plus d'un tiers de sa surface. De plus il a dû avancer au premier week-end d'octobre la date de cette manifestation qui se retrouvait ainsi quinze jours après la bourse de Denver qui regroupe tous les grands marchands ainsi que les grands collectionneurs avides et fortunés des Etats Unies. Ce qui devait arriver arriva, il n'y avait pas de découverte nouvelle et peu de spécimens attrayants. Il faut cependant mentionner la réapparition, après de nombreuses années, d'érythrites de Bou Azzer (Maroc) d'excellente qualité. Le lot présenté à Munich a été découvert en août de cette année et présenté (écrémé?) à la bourse de Denver. On peut mentionner aussi quelques (petits) lots de minéraux intéressants mais souvent forts chers comme la brazilianite (Brésil) et le sphène vert chromifère sur amesite (Russie). Il n'y a pas eu de renouvellement en pyromorphites chinoises. Malgré cette morosité il a été possible de trouver quelques minéraux pour la collection :

5 - Un cristal d'**arsénopyrite (AMIS) associé au quartz de Yao Guan Xian (Chine)**. Ce cristal prismatique de 12cm a des faces légèrement polysynthétiques très brillantes. Son association avec deux cristaux de quartz trapus constitue un ensemble d'une qualité exceptionnelle, supérieure à tout ce que l'on connaissait jusqu'alors des gisements classiques (Panasqueira et Obira). Ceci étant dit cette mine peut encore nous réserver des surprises. Pour l'anecdote il faut mentionner le fait que cet échantillon n'a été déballé qu'au quatrième jour de la bourse : ce qui prouve qu'il ne faut pas penser que les bonnes pièces n'apparaissent qu'au déballage.

6 - Une **stalactite de calcite (AMIS) recouverte de cristaux d'apophyllite et de stilbite** provenant de **Jalgaon (Indes)**. Cette pièce à la forme tourmentée atteint 20cm. Les groupements de cristaux en stalactites sont toujours de grandes raretés et possèdent souvent une grande esthétique. Comme les stalactites constituent un des thèmes de l'exposition de Tucson, les marchands ont fait un

effort particulier pour acquérir toutes les stalactites disponibles dans les pays producteurs. Autant profiter de cet afflux tant qu'il existe une certaine abondance de pièces à des prix encore acceptables.

7 - Un **cinabre** (AMIS) de la **mine Tongren** (Guizhou, Chine). Il est constitué d'une dizaine de cristaux centimétriques en prismes courts enchâssés dans des cristaux de dolomite. La dimension de l'ensemble avoisine une dizaine de centimètres. Cet échantillon améliore sensiblement la représentation de ce minéral dans la collection.

À la suite de la bourse de Munich, j'ai reçu la visite de marchands américains de la société Collector's Edge. Enthousiasmés par la collection, ils ont arrangé avec la Newmont Mining co. la possibilité d'obtenir un don pour la collection (UPMC). Nous avons donc reçu un intéressant spécimen d'**orpiment de Twin Creeks** (Nevada) composé d'un amas de cristaux centimétriques oranges et très brillants. L'ensemble atteint 13cm pour sa plus grande dimension. Il aura une place de choix dans la vitrine des sulfures.

La fin de cette année 2000 a été marquée par une situation inédite : la réalisation de deux bourses d'envergure internationale (Eurominéral à Nogent et le Sofitel à Paris) à une semaine d'intervalle. L'AMIS a disposé d'un stand à chacune d'entre elles grâce à l'amabilité des organisateurs, M Schwab (pour Eurominéral) et M Pelloux (pour le Sofitel). Qu'ils soient ici vivement remerciés pour le soutien sans faille qu'il ont apporté à notre association.

Durant Eurominéral deux échantillons ont été acquis :

8 - Une **cavansite de Poonah** (AMIS). Il s'agit d'une boule de 5cm sur une gangue de dimension similaire. Par sa taille, cette boule est l'une des deux plus grosses connues à ce jour. Cet échantillon complète bien notre série de cavansites.

9 - Une **stalactite de calcédoine recouverte de cristaux de stilbite et d'apophyllite** (AMIS). Plusieurs cristaux de stilbite biterminés, très brillants et de plusieurs centimètres permettent d'étendre la représentation de cette espèce dans la collection. En effet jusqu'alors nous avions bien des noeuds papillon de grande qualité ainsi que des groupements de cristaux jointifs mais un seul échantillon (assez moyen) présentait des monocristaux. L'échantillon acquis ne fait pas que combler un manque : son esthétique très inhabituelle nous révèle une fois de plus les surprises inattendues que le monde minéral recèle.

Pour terminer, dans la rubrique des traitements et falsifications, un collectionneur m'a fait part, durant le Sofitel, de sa découverte surprenante : en trempant dans l'acétone un échantillon d'or de Roumanie (découvert cette année) il s'est aperçu que la gangue était soluble ! Il semble bien que les diluants organiques puissants sont appelés de plus en plus à figurer dans la panoplie des minéralogistes prudents.

A.M.I.S

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

Tour 25 - Rez de chaussée

**4, place Jussieu
75252 PARIS Cedex 05**