

## Minéralogie de la carrière de la Flèche de Bertrix (Province de Luxembourg, Belgique)

Michel BLONDIEAU<sup>1</sup>, Frédéric HATERT<sup>2</sup>, Stéphane PUCCIO<sup>3</sup>, Yannick BRUNI<sup>2</sup> et Martin DEPRET<sup>2</sup>

Manuscrit reçu le 5 juillet 2021 et accepté le 7 décembre 2021

<sup>1</sup> Val des Cloches 131, B-6927 Tellin, Belgique

<sup>2</sup> Université de Liège, Laboratoire de Minéralogie B18, B-4000 Liège, Belgique

<sup>3</sup> Rue des Fontaines 156, B-4041 Vottem, Belgique

### Résumé

La carrière de la Flèche de Bertrix est située dans la zone métamorphique de « *Bastogne-Libramont* » et expose des roches métamorphiques dans lesquelles se rencontrent des grenats, de l'ilménite et des plagioclases, notamment. De nombreuses autres espèces minérales formées lors d'une phase rétrograde du métamorphisme sont observées dans les diaclases de ces roches. On y recense notamment la prehnite, 7 espèces de zéolites, des minéraux de terres rares (4 carbonates et 1 arséniate), ainsi que la pumpellyite-(Al), espèce dont la localité-type est ce gisement. La présente étude a permis de mettre en évidence 7 espèces nouvelles pour Bertrix, parmi lesquelles 5 sont observées pour la première fois dans notre pays (agardite-(Y), analcime, asbolane, calcioancylite-(Nd), clinoclase, heulandite-Ca, stellerite).

**Mots clés :** Bertrix, carrière de la Flèche, minéralogie, Belgique, zéolites, pumpellyite-(Al), minéraux de terres rares.

### Abstract

The quarry of "La Flèche" at Bertrix shows metamorphic rocks containing garnet, ilmenite and plagioclase. Several mineral species produced by retrograde metamorphism are also observed in diaclases. Among these minerals, the most interesting ones are surely those of the zeolite family (7 species), REE-bearing carbonates and arsenates, as well as pumpellyite-(Al), for which Bertrix is the type locality. The present paper describes the rich mineralogy of that quarry, in which 7 minerals are reported for the first time (agardite-(Y), analcime, asbolane, calcioancylite-(Nd), clinoclase, heulandite-Ca, stellerite).

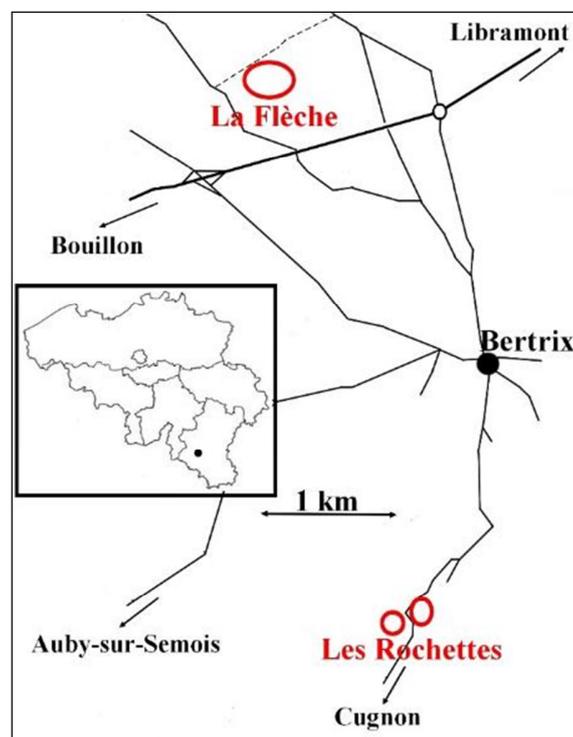
**Keywords:** Bertrix, La Fleche quarry, mineralogy, Belgium, zeolites, pumpellyite-(Al), rare earth minerals.

## 1. Introduction

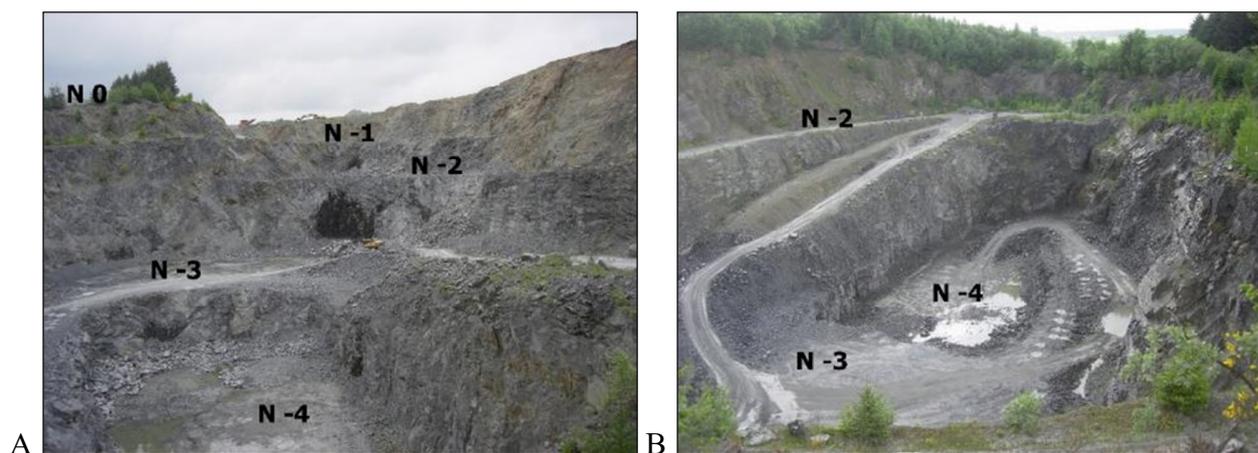
Bertrix est situé sur le plateau ardennais, dans la partie sud-ouest de la province de Luxembourg, à une dizaine de kilomètres au sud-ouest de Libramont. Deux carrières y sont actives pour la production de granulats : la carrière de "La Flèche" au Nord et la carrière "Des Rochettes" au Sud (Figure 1). Ouverte en septembre 1954, la carrière de la flèche n'a depuis cessé de grandir et,

actuellement, la SCRL "Carrières de la flèche" produit plus de 150.000 tonnes par an de concassés de "grès schisteux" (dénomination commerciale) qu'elle extrait sur 4 niveaux d'exploitation (d'après le site internet de l'entreprise [www.carrieresdelafleche.be/](http://www.carrieresdelafleche.be/)) (Figure 2).

D'un point de vue minéralogique, cette carrière présente des paragenèses rares pour la région, avec notamment des zéolites qui tapissent les diaclases de la roche. La laumontite, déjà signalée par Antun (1953) à Serpont, a été décrite en détail par Hatert (1998), qui en fournit l'analyse chimique, la morphologie, ainsi que les paramètres de maille. La prehnite, la chabazite-Ca, la stilbite-Ca, la natrolite/tétranatrolite, ainsi qu'un minéral du groupe de la pumpellyite, ont ensuite été étudiés par Hatert & Theye (2005), qui précisent les conditions dans lesquelles les zéolites ont cristallisé, à savoir 200-250°C / 2 kbar pour la laumontite. Une étude détaillée de la pumpellyite de Bertrix a permis à Hatert *et al.* (2007) de décrire une nouvelle espèce au niveau mondial, la pumpellyite-(Al).



**Figure 1** : Localisation des carrières de Bertrix.



**Figure 2 :** Carrière de la flèche de Bertrix. Niveau technique (N 0) et niveaux d'exploitation (N -1 à N -4).  
(A) Vue vers l'est. (B) Vue vers l'ouest (Photos M. Blondieau, mai 2015).

L'inventaire minéralogique de la carrière de La Flèche a été complété par Hatert (2004), qui y décrit trois carbonates de terres rares : la calcioancylite-(Ce), qui forme de petits cristaux pseudo-octaédriques de couleur verdâtre, ainsi qu'une association bastnäsite-(Ce) / synchysite-(Ce), qui se présente en rosettes nacrées d'une centaine de microns de diamètre.

La minéralogie de la carrière des Rochettes est totalement différente de celles de la carrière de La Flèche, alors que ces deux affleurements ne sont situés qu'à quelques kilomètres de distance (Figure 1). En effet, les diaclasses à zéolites sont absentes aux Rochettes, mais on y rencontre des veines de quartz contenant une paragenèse qui rappelle celle des carrières de Bastogne, avec titanite, rutile, anatase et brookite (Rondeux & Hatert, 2007).

De nouvelles observations de terrain ont été réalisées dans la carrière de La Flèche, et des analyses minéralogiques ont permis d'identifier de nouveaux minéraux pour la localité. Le présent article fournit une description détaillée des espèces minérales observées dans ce gisement.

## 2. Contexte géologique

Bertrix se trouve à l'extrême ouest de la zone métamorphique dite de Libramont qui s'étend à l'Est jusque Bastogne. Il s'agit du plus vaste domaine métamorphique de Belgique. La carrière de la flèche exploite des roches du dévonien inférieur. Ghysel (2005) les attribue au membre de Sainte-Marie faisant transition entre le sommet de la formation de Saint-Hubert d'âge Lochkovien, et la base de la formation de Mirwart d'âge Praguien.

Les roches de cette carrière sont des phyllades, des quartzites, ainsi que des roches connues localement sous le nom de "cornéites". Ces roches métamorphiques à texture massive sont décrites comme des siltites fines indurées gris moyen à gris foncé à biotite ou ilménite, formant des bancs épais à massifs zébrés par des bancs de quartzite gris vert (Ghysel, 2005). De Béthune (1977) précise

que seul le manque de schistosité de ces roches les distingue des phyllades et que, d'un point de vue minéralogique, ces roches contiennent fréquemment du plagioclase particulièrement calcique, raisons pour lesquelles il leur a donné le nom de roches "*calcopélitiques*".

Ghysel (2005) indique aussi la présence d'un boudinage intense des bancs, ainsi que de nombreuses diaclases transversales à l'affleurement (Figure 3). Certains bancs de roches caractérisées par des veines de quartz transversales à la couche mais qui ne se développent pas dans les autres couches ont été décrits initialement à Bastogne sous le nom de "*boudins*" (Lohest *et al.*, 1908) : "*Lorsque l'on voit ces segments renflés sur une surface de stratification, on croirait voir une série d'énormes cylindres ou boudins alignés côte à côte...*". Ces termes de "*boudins*" et "*boudinage*" sont depuis largement utilisés au niveau international pour désigner des structures semblables mais dont la mise en place n'est pas exactement celle des couches ardennaises. Pour ces raisons, Kenis & Sintubin (2007) ont proposé de les désigner sous le nom de "*mullions*" ; toutefois, dans cet article, nous continuerons à utiliser la terminologie ancienne qui reste encore la plus usitée. Les veines de quartz ne sont présentes que dans les quartzites, c'est-à-dire les roches les plus compétentes. Pour Kenis & Sintubin (2007), ces veines de quartz ont été formées par les fluides métamorphiques au plus profond du bassin sédimentaire bien avant la phase de plissements et failles de l'orogène varisque. Dans les parois nord et sud de la carrière, il est parfois possible d'observer, au gré des travaux, des boudins d'une taille impressionnante.



**Figure 3:** Roches boudinées avec veines de quartz transversales. Partie est de la carrière de Bertrix au niveau d'exploitation N-2 (Photo M. Blondieau, mars 2008).

Les roches de la région de Bertrix ont été affectées par le métamorphisme hercynien. Dans la région de Libramont, Theye & Fransolet (1993) estiment que les conditions paroxysmales du métamorphisme auraient pu atteindre une pression de 3-4 kbar et une température de 500°C, mais ces conditions n'ont pas été aussi intenses à Bertrix où, au cours de nos nombreux échantillonnages, nous n'avons jamais observé de magnétite ni d'amphibole mais seulement des grenats.

Les diaclases de la roche contiennent de nombreux minéraux intéressants, notamment des zéolites, qui ont cristallisé plus tard, sous des conditions de pression et de température inférieures. Au cours de ce phénomène rétro-métamorphique, la laumontite se serait formée sous une pression de 2 kbar et une température comprise entre 200 et 250°C (Hatert, 1998 ; Hatert & Theye, 2005). D'autres espèces se sont déposées à des températures et pressions encore plus basses, comme par exemple la stilbite-Ca qui serait apparue entre 150 et 200°C (Hatert & Theye, 2005), et la heulandite qui n'est stable qu'à basse pression autour de 180°C.

### **3. Descriptions minéralogiques.**

Les minéralisations observées sont d'une part des espèces formées au cours du métamorphisme varisque, dont des grenats et, d'autre part, de nombreuses espèces formées plus tard, lors des conditions rétrogrades du métamorphisme. C'est dans ce groupe que se trouvent la plupart des minéraux les plus intéressants de la carrière, notamment les zéolites, le pumpellyite-(Al) et les minéraux de terres rares. Ces espèces rétrogrades tapissent généralement des diaclases fort étroites, parfois même réduites à un simple film, qui ne sont pas uniformément réparties dans la carrière. Il nous a dès lors semblé utile de localiser les principales zones où ces différents assemblages ont pu être observés. Bien entendu, la carrière est très active et évolue constamment ; certaines zones anciennement très productives n'existent plus aujourd'hui.

Dans les cornéites, on observe surtout des grenats, en cristaux bien formés et parfois de taille centimétrique, mais très difficiles à extraire du fait de la très grande dureté de la roche. Les veines de quartz laiteux sont massives et de puissance parfois pluri-décimétrique. Aucune espèce minérale n'y est observée si ce n'est au contact avec la roche où l'on peut observer des plages xénomorphes de feldspaths plagioclases, parfois piquetées de mouchetures de chalcopyrite. Toutefois, dans la partie nord de la carrière, on observe parfois des veines de quartz gris, légèrement fumé avec des plages d'ilménite partiellement altérées en rutil et anatase.

Les parois de la carrière exposent aussi, au gré des travaux, des zones bréchiques dont les éléments sont des fragments de roches altérées cimentées d'une part par de la calcite dans la partie nord-est de la carrière et, d'autre part, par de la chamosite et de belles associations synchisite-(Ce)/bastnaesite-(Ce) en plages pluri-centimétriques rose saumon dans la partie ouest de la carrière. Ces associations ont été bien observées durant l'été 2008 et peuvent, depuis encore, s'observer sporadiquement. Nous constatons également que les espèces minérales les plus intéressantes se situent plutôt aux étages N-2

et N-3, alors que le niveau le plus profond de la carrière N-4 montre une minéralogie plus pauvre avec des zéolites assez rares.

De nombreux échantillons, récoltés durant ces 25 dernières années, ont été examinés sous la loupe binoculaire. Lorsque suffisamment de matière était disponible, un diffractomètre de poudres PANALYTICAL PW-3710 utilisant la radiation  $\text{FeK}_\alpha$  ( $\lambda = 1,9373 \text{ \AA}$ ) a permis d'identifier les minéraux. Pour les très faibles quantités de matière, un diffractomètre à 4 cercles Rigaku Xcalibur, équipé d'un détecteur EOS (radiation  $\text{MoK}_\alpha$ ,  $\lambda = 0,7107 \text{ \AA}$ ) a été utilisé en mode « Debye-Scherrer ». Les paramètres de mailles ont été calculés à partir des diffractogrammes de poudre avec le programme *LCLSQ* version 8.4 (Burnham, 1991). Pour l'identification de la clinoclase, le diffractomètre Xcalibur a été utilisé en mode monocristaux, fournissant ainsi une mesure directe des paramètres de maille de ce minéral.

La morphologie des minéraux a été observée à l'aide d'un microscope électronique à balayage environnemental FEI ESEM-FEG XL 30 (CAREM-ULg, Cellule d'Appui à la Recherche et à l'Enseignement en Microscopie de l'Université de Liège). Les images ont été obtenues en mode électrons secondaires (mode « haut-vide ») sous une tension d'accélération de 15 kV et sur des échantillons métallisés au platine ou à l'or. Des spectres EDS (« Energy Dispersive X-ray Spectrometry ») ont été obtenus avec le même microscope, à l'aide d'un détecteur de rayons X Si(Li) EDAX ou SDD Bruker 129 eV. Selon les cas, la tension d'accélération était réglée à 15, 20 ou 30 kV. Les spectres ont été traités soit par le logiciel EDAX, soit par le logiciel Quanta Esprit 1.9 qui a fourni les éléments chimiques présents dans les échantillons.

La composition chimique de quelques minéraux a également été déterminée avec un spectromètre à fluorescence X portable Thermo Fisher Niton XL3T-980 GOLDD+. Cet appareil possède un tube à rayon X Niton XL3T muni d'une anode en or pouvant émettre un faisceau de 3 mm de diamètre. Le courant d'anode possède une différence de potentiel comprise entre 9 à 50 kV, pour une intensité de 0 à 40  $\mu\text{A}$ . Les rayons X réémis sont récoltés par un détecteur de type GOLDD (Geometrically Optimized Large Area Drift Detector) d'une résolution de <185 eV à 60000 cps pour un temps de mise en forme de 4  $\mu\text{s}$ .

Les dessins des cristaux ont été réalisés avec le programme *Faces version 4.4* (Favreau, 2006).

Les espèces sont décrites successivement par ordre alphabétique. Toutefois, certaines espèces difficiles à identifier sont regroupées par groupes de minéraux ou par solutions solides. Ce sera le cas des *biotites*, *chlorites*, *épidotes*, *grenats*, *plagioclases*, *feldspaths potassiques* et *tourmalines*. Le nom de ces groupes ou solutions solides sont mis en italique. Tous les échantillons photographiés proviennent de la collection de M. Blondieau, excepté quelques-uns qui proviennent de la collection de P. Chollet.

### **3.1. Agardite-(Y), $YCu^{2+}_6(AsO_4)_3(OH)_6 \cdot 3H_2O$**

En 2008, un minéral fibreux en petites gerbes vert tendre (Figure 4), formant parfois des cristaux plus épais (Figure 5a), est observé au sein des associations roses de synchisite-(Ce)/bastnäsité-(Ce) dans les roches bréchiques provenant de la partie ouest de la carrière. Les cristaux apparaissent comme des tonnelets, assez massifs à la base mais très fibreux au sommet, comme le montrent les images au microscope électronique à balayage (Figures 5b et 5c).

L'analyse par diffraction des rayons X indique que ce minéral appartient au groupe de la mixite, et les analyses chimiques qualitatives EDS mettent en évidence les éléments majoritaires O, Cu, As, ainsi que de plus faibles teneurs en Y, Nd, La et Ca. Il s'agit donc d'une agardite, et les analyses EDS semblent montrer Y dominant et Ce absent, indiquant une agardite-(Y).

Cette identification est confirmée par la bonne concordance entre le diffractogramme de poudre des échantillons de Bertrix et celui de l'agardite-(Y) de Bou-Skour (Maroc) (fiche JCPDS 25-183) (Tableau 1). Les paramètres de maille de l'agardite-(Y) de Bertrix ont également été calculés, à partir du radiogramme de l'échantillon N°2 :  $a = 13,57(1)$  et  $c = 5,94(1)$  Å.

Parfois l'agardite-(Y) se présente en plages vertes d'altération autour de mouchetures de chalcopryrite. Visuellement prises pour de la malachite, les analyses par diffraction des rayons X ont bien montré qu'il s'agissait d'un minéral du groupe de la mixite, et donc probablement d'agardite-(Y).

### **3.2. Analcime, $NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$**

L'analycime est une espèce rare à Bertrix, qui n'a été observée que sur quelques échantillons, souvent en association avec la prehnite au niveau N-2 de la partie nord-ouest de la carrière. Sur un échantillon, on a pu observer d'assez gros cristaux incolores de plusieurs millimètres de diamètre, présentant la forme du trapézoèdre {112} (Figure 6). L'identification du minéral repose sur le radiogramme de poudre de rayons X, qui est en bon accord avec celui de l'analycime de Liberec, République Tchèque (Tableau 2). Le paramètre de la maille cubique de l'analycime de Bertrix a également été calculé :  $a = 13,700(2)$  Å.

Les analyses chimiques qualitatives EDS mettent en évidence les éléments majoritaires Si, Al, Na et O, confirmant ainsi l'identification de l'espèce. L'analycime est une zéolite, qui n'était pas répertoriée en Belgique par Hatert *et al.* (2002). Cette espèce a toutefois été identifiée depuis à Quenast (Huby, 2007); Bertrix est donc la seconde occurrence belge de ce minéral.

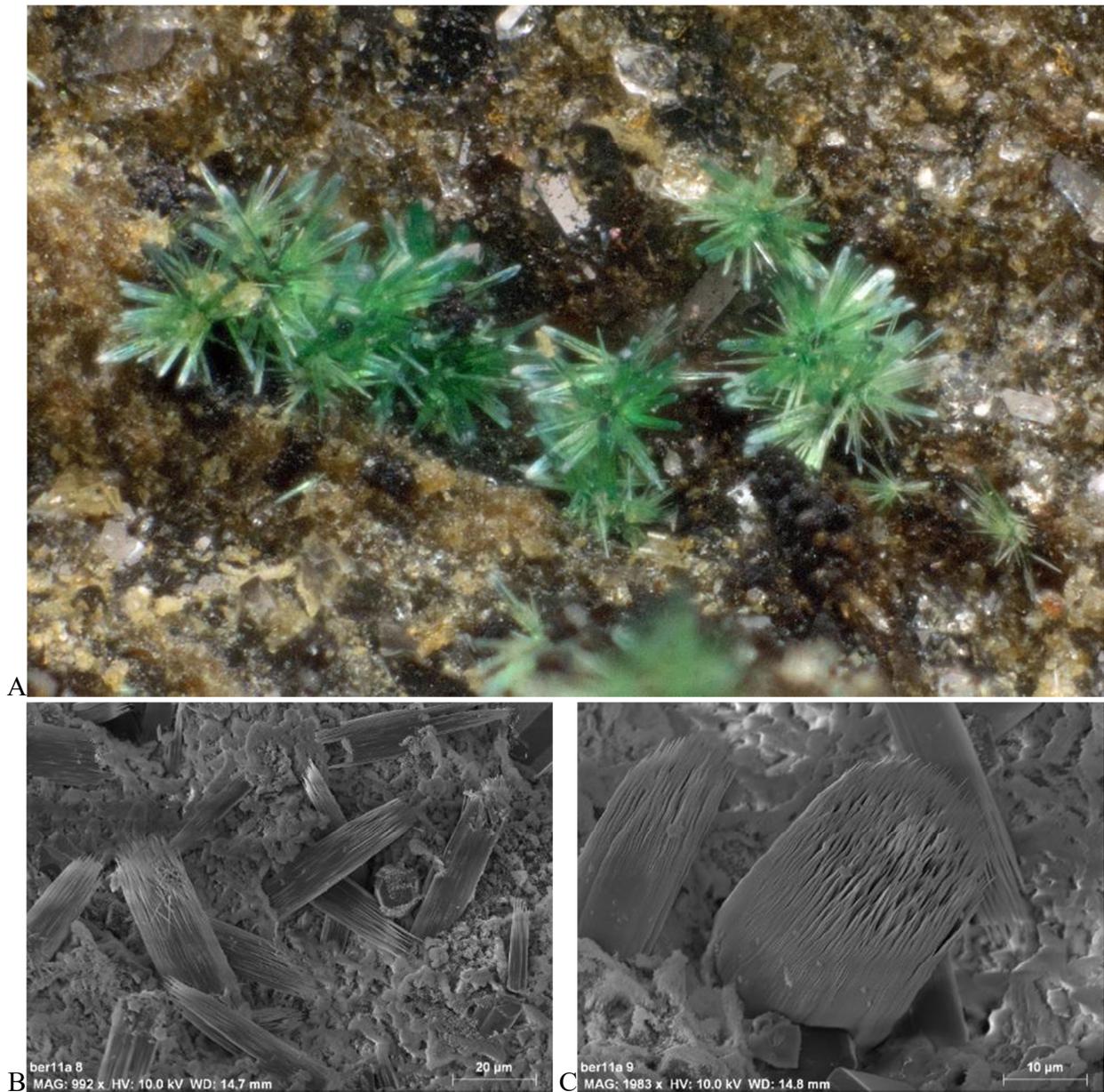
**Tableau 1** : Dépouillement des radiogrammes de poudre de l'agardite-(Y) de Bertrix, et comparaison avec celui l'agardite-(Y) de Bou-Skour, Maroc.

Agardite-(Y) Bertrix-Ech N°1		Agardite-(Y) Bertrix-Ech N°2		Agardite-(Y) JCPDS 25-183	
<i>d</i> (Å)	I/I <sub>0</sub> (%)	<i>d</i> (Å)	I/I <sub>0</sub> (%)	<i>d</i> (Å)	I/I <sub>0</sub> (%)
<b>11,722</b>	<b>TF</b>	<b>11,70</b>	<b>TF</b>	<b>11,7</b>	<b>100</b>
-	-	5,238	Tf	5,25	10
4,430	F	4,439	F	4,43	70
4,190	f	4,190	f	4,15	30
3,920	f	3,943	f	3,91	20
3,541	F	3,559	F	3,54	70
3,331	m	3,309	f	3,386	30
-	-	-	-	3,252	50
<b>2,929</b>	<b>F</b>	<b>2,938</b>	<b>F</b>	<b>2,938</b>	<b>80</b>
-	-	-	-	2,847	40
2,691	m	2,706	m	2,692	60
-	-	-	-	2,622	10
2,555	f	2,568	f	2,558	60
<b>2,450</b>	<b>F</b>	<b>2,459</b>	<b>F</b>	<b>2,451</b>	<b>80</b>
2,210	f	2,217	f	2,219	20
-	-	2,207	f	2,183	20
2,100	f	-	-	2,107	30
-	-	-	-	2,074	20
1,984	f	1,991	f	1,986	30
1,938	Tf	1,942	Tf	1,953	10
-	-	-	-	1,925	20
-	-	-	-	1,884	10
-	-	-	-	1,857	10
-	-	-	-	1,831	20
1,780	m	1,787	m	1,793	40
-	-	-	-	1,770	50
1,704	m	1,710	f	1,713	40
-	-	-	-	1,694	20
-	-	-	-	1,675	20
1,622	m	1,627	m	1,629	50
-	-	-	-	1,611	40
1,584	Tf	1,588	Tf	1,584	20
-	-	-	-	1,555	20
1,533	f	1,538	f	1,528	30
-	-	-	-	1,499	5
1,467	m	1,470	m	1,470	40

TF : Très fort, F : Fort, m : moyen, f : faible, Tf : très faible.  
 Diffractomètre à 4 cercles Rigaku Xcalibur, détecteur EOS, radiation MoK $\alpha$



**Figure 4** : Agardite-(Y) de Bertrix en petites touffes vert pâle. (A) L = 2,7 mm ; (B) L = 0,75 mm.  
(Photos P. Chollet).



**Figure 5 :** Agardite-(Y) de Bertrix en cristaux apparemment plus épais que dans la Figure 4. (A) L = 1,05 mm (Photo P. Chollet) ; (B et C) Éch. BER-11a, photographies au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires.

**Tableau 2** : Dépouillement des radiogrammes de poudre de l'analtime de Bertrix, comparé à celui de l'analtime de la région de Liberec, République Tchèque.

<b>Analcime Bertrix-Ech N°1</b>		<b>Analcime Bertrix-Ech N°2</b>		<b>Analcime-C JCPDS 41-1478</b>	
<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>0</sub> (%)	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>0</sub> (%)	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>0</sub> (%)
<b>5,556</b>	<b>TF</b>	<b>5,556</b>	<b>F</b>	<b>5,59</b>	<b>60</b>
4,817	F	-	-	4,844	11
-	-	4,741	f	-	-
4,129	f	4,035	m	-	-
3,657	f	3,694	f	3,667	5
<b>3,418</b>	<b>TF</b>	<b>3,417</b>	<b>TF</b>	<b>3,425</b>	<b>100</b>
<b>2,916</b>	<b>TF</b>	<b>2,921</b>	<b>F</b>	<b>2,921</b>	<b>40</b>
2,798	tf	-	-	2,797	6
2,686	m	2,688	m	2,687	12
2,498	m	2,507	m	2,501	11
2,421	f	2,406	f	2,423	8
2,219	m	2,216	f	2,222	9
2,117	tf	-	-	-	-
2,020	tf	-	-	2,020	1
-	-	-	-	1,938	1
-	-	-	-	1,901	10
1,898	m	1,897	m	1,895	7
1,865	m	-	-	-	-
1,739	F	1,733	m	1,741	20
-	-	-	-	1,713	8
1,688	f	1,684	f	1,687	6
-	-	-	-	1,661	3
1,618	tf	-	-	1,615	3
1,593	f	1,595	f	1,593	4
1,493	tf	-	-	1,495	2
1,477	f	1,478	f	1,478	3
-	-	-	-	1,462	1
1,442	tf	-	-	1,444	2
1,412	f	1,413	f	1,414	5
-	-	-	-	1,371	3
1,357	m	1,359	f	1,357	8
1,306	f	-	-	1,307	1
1,283	f	1,282	f	1,284	4
1,262	f	-	-	1,262	3
1,220	f	1,222	f	1,221	6
1,183	tf	1,175	f	1,184	2
1,167	tf	-	-	1,167	2
1,119	f	1,117	f	1,119	2

TF : Très fort, F : Fort, m : moyen, f : faible, Tf : très faible.  
 Diffractomètre à 4 cercles Rigaku Xcalibur, détecteur EOS, radiation MoK $\alpha$

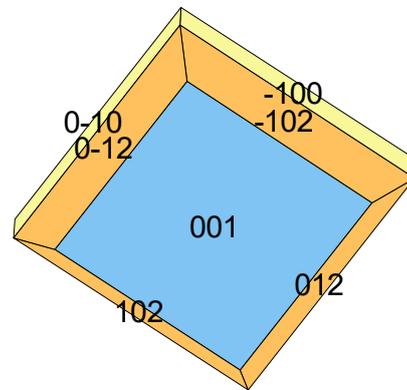
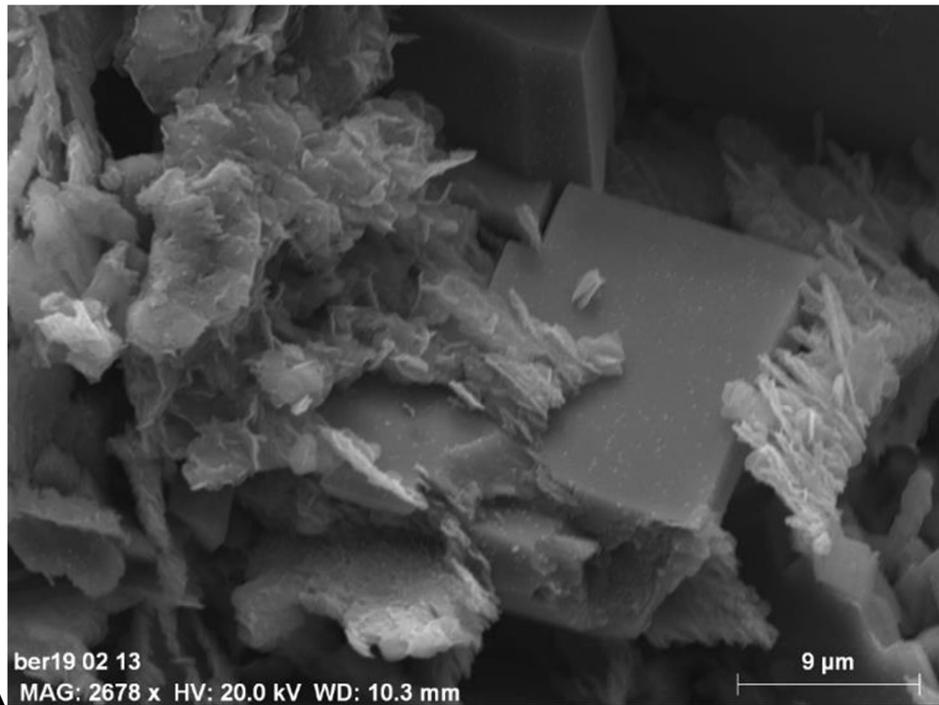


**Figure 6 :** Analcime de Bertrix. L = 3 mm (Photo M. Blondieau).

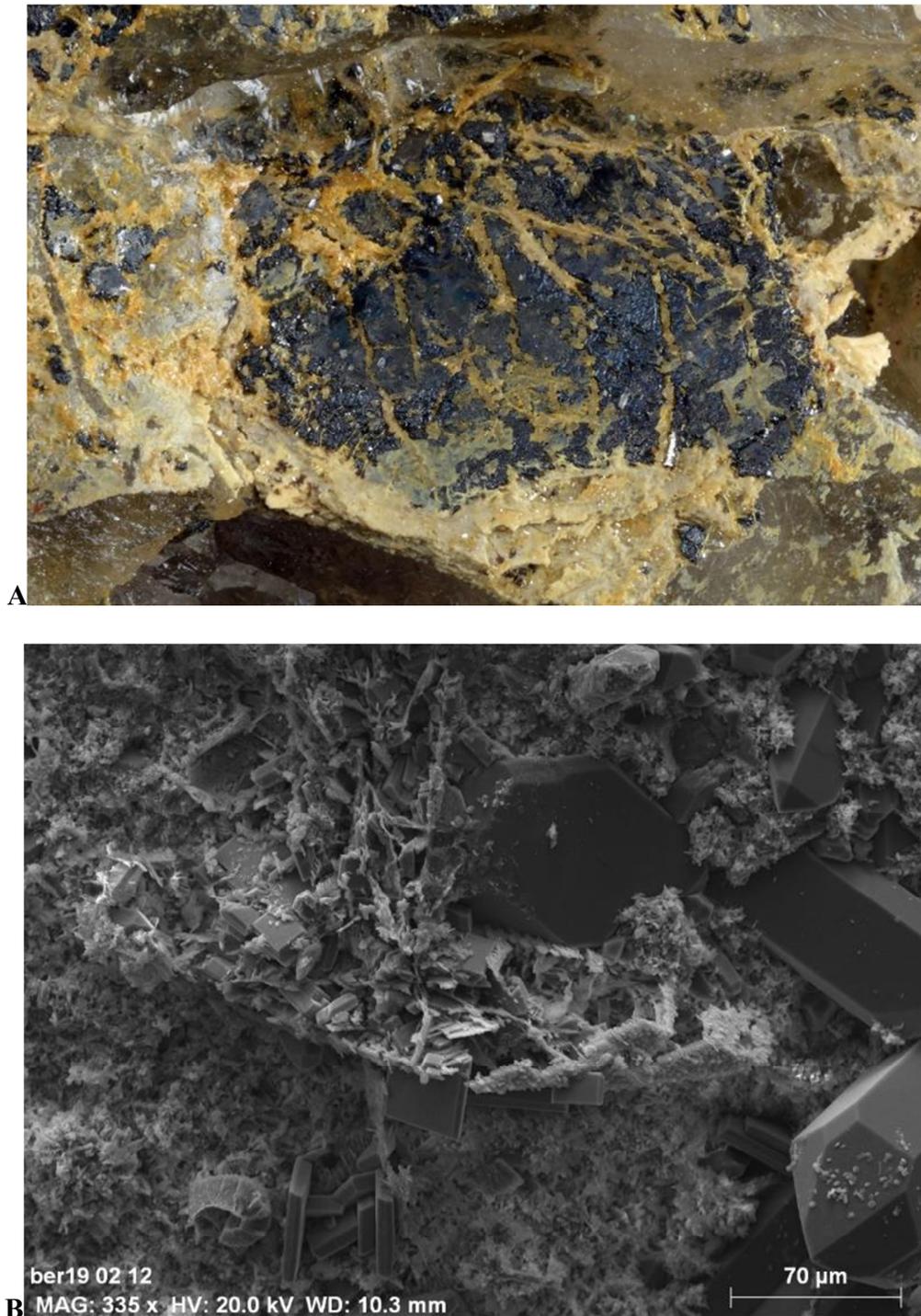
### **3.3. Anatase, TiO<sub>2</sub>**

L'anatase est assez fréquente à Bertrix et son identification est confirmée par diffraction des rayons X. Elle se présente généralement en minuscules cristaux ayant la forme de tablettes tétraogonales de combinaison  $\{100\}\{001\}$ , d'une dizaine de microns de longueur seulement (Figure 7A). Certains cristaux semblent montrer également les facettes du quadroctaèdre direct  $\{102\}$  (Figures 7B, C). De couleur brun clair à orange, l'anatase est associée à la chamosite dans les joints contenant les associations synchisite-(Ce)/bastnaesite-(Ce) de la partie ouest de la carrière. Elle se présente également en association avec le rutile, sur des lamelles d'ilménite en lames brun clair à noir d'épaisseur millimétrique, traversant de manière désordonnée des échantillons de quartz laiteux ou enfumés observés au niveau N-3 dans la partie nord de la carrière (Figure 8A).

Parfois aussi, on peut observer l'anatase dans des structures semblant correspondre à une pseudomorphose d'un cristal allongé en fuseau dont la forme pourrait suggérer celle de la titanite (Figure 8B).



**Figure 7 :** Cristaux d'anatase de Bertrix. (A) Minuscule tablette tétragonale avec chamosite. Échantillon BER-19, photographie au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires. (B) Cristal montrant la combinaison  $\{100\}\{001\}\{102\}$ , déposé sur le quartz,  $L = 0,29$  mm (Photo P. Chollet) (C) Morphologie de la tablette précédente.



**Figure 8** : Anatase de Bertrix. (A) Avec rutile (brun clair) dans des fissures d'ilménite (noir), L = 7,1 mm (Photo P. Chollet). (B) Agrégat fusiforme constitué de minuscules cristaux d'anatase et de chamosite. Éch. BER-19, photographie au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires.

### 3.4. Groupe de l'apatite, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH},\text{Cl})$

Hatert & Theye (2005) signalent l'apatite comme minéral accessoire des roches qui renferment les fractures à pumpellyite. De petits cristaux incolores à blanc, associés à l'albite, ont été identifiés visuellement comme une apatite, ce qui est confirmé par diffraction des rayons X. Les analyses chimiques qualitatives par EDS indiquent la présence majoritaire des éléments O, Ca, P et F, permettant d'identifier la fluorapatite. Ce minéral semble visuellement peu abondant dans les roches de Bertrix, mais cette impression est probablement liée à la petite taille des cristaux, à leur aspect incolore, ainsi qu'à leur identification difficile.

### 3.5. Asbolane, $\text{Mn}^{4+}(\text{O},\text{OH})_2(\text{Co},\text{Ni},\text{Mg},\text{Ca})_x(\text{OH})_{2x}\cdot n\text{H}_2\text{O}$

Des dendrites noires, développées sur les associations synchisite-(Ce)/bastnäsite-(Ce) (Figures 9, 10), sont visuellement identifiées comme étant constituées d'oxydes ou d'hydroxydes de manganèse. Leur dimension n'excède que très rarement le millimètre.

**Tableau 3** : Dépouillement de radiogrammes de poudre d'un mélange d'asbolane et de chamosite de Bertrix, comparé aux raies d'une chamosite de Bertrix et d'asbolane de référence.

Asbolane et chamosite Bertrix		Chamosite Bertrix		Asbolane*	Asbolane**
<i>d</i> (Å)	I/I <sub>0</sub>	<i>d</i> (Å)	I/I <sub>0</sub> (%)	<i>d</i> (Å) (I/I <sub>0</sub> (%))	<i>d</i> (Å) (I/I <sub>0</sub> (%))
<b>9,520</b>	<b>TF</b>	-	-	<b>9,6 (100)</b>	<b>9,5 (100)</b>
6,943	TF	7,036	TF	-	-
<b>4,719</b>	<b>TF</b>	-	-	<b>4,83 (100)</b>	<b>4,78 (100)</b>
4,118	f	4,098	f	-	-
3,513	TF	3,535	TF	-	-
3,170	f	-	-	3,23 (10)	3,18 (20)
2,618	f	2,636	f	-	-
-	-	2,505	f	-	-
<b>2,417</b>	<b>F</b>	-	-	2,446 (35)	2,38 (20)
2,281	f	2,274	f	-	-
-	-	2,139	f	-	-
2,010	f	2,016	f	-	-
1,897	f	1,892	f	-	1,93 (20)
-	-	1,758	f	-	-
1,662	f	1,669	f	-	-
1,556	F	1,548	F	1,540 (50)	-
1,515	tf	1,507	f	-	-
1,405	F	1,420	f	<b>1,420 (50)</b>	<b>1,42 (50)</b>

\* Fiche JCPDS 42-1319, \*\* Mineralien atlas

TF : Très fort, F : Fort, m : moyen, f : faible, Tf : très faible.

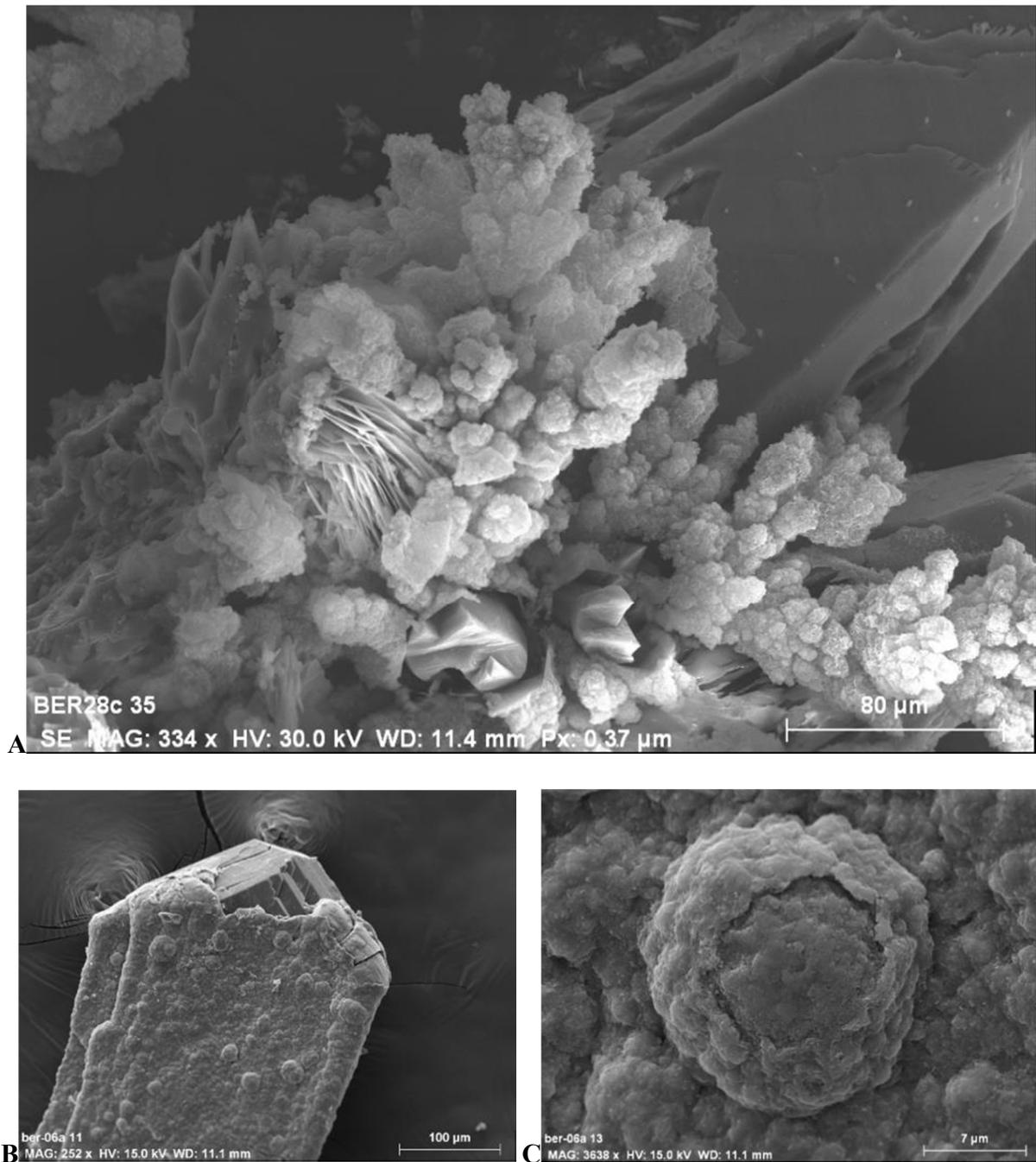
Diffraction à 4 cercles Rigaku Xcalibur, détecteur EOS, radiation MoKα

Les analyses chimiques qualitatives par EDS mettent en évidence les éléments majoritaires O, Mn et Co. D'autres échantillons moins purs ont montré en plus la présence des éléments Fe, Si, Al et Mg. Les analyses par diffraction des rayons X, réalisées sur ces derniers échantillons, montrent qu'il s'agit d'un mélange de chamosite et d'asbolane. Cette espèce est un minéral relativement peu cristallin qui ne fournit que quelques raies de diffraction ; elles sont toutefois clairement observées dans le matériel de Bertrix (Tableau 3).



**Figure 9** : Asbolane dendritique sur association synchisite-(Ce)/bastnäsite-(Ce) de Bertrix. (A) L = 1,80 mm, (B) L = 0,61 mm (Photos P. Chollet).

De minuscules taches noires sans épaisseur sont très fréquentes à Bertrix et sont également attribuées à l'asbolane. Il en est de même d'encroûtements noir observés sur des cristaux de stilbite-Ca (Figure



**Figure 10 :** Asbolane de Bertrix. (A) Dendrites sur un cristal de calcite, en association à un agrégat de synchisite-(Ce)/bastnäsite-(Ce). Échantillon BER-28c. (B) Encroûtement d'asbolane sur cristal de stilbite-Ca. Échantillon BER-06a. (C) Agrandissement de l'image précédente, montrant une pustule d'asbolane. Photographies au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires.

10B). À fort grossissement, les petites pustules montrent une structure en couches concentriques (Figure 10C). Les analyses chimiques qualitatives par EDS indiquent la présence des éléments majoritaires O, Mn, Co, mais aussi Ce, Fe et Cu en moindres proportions.

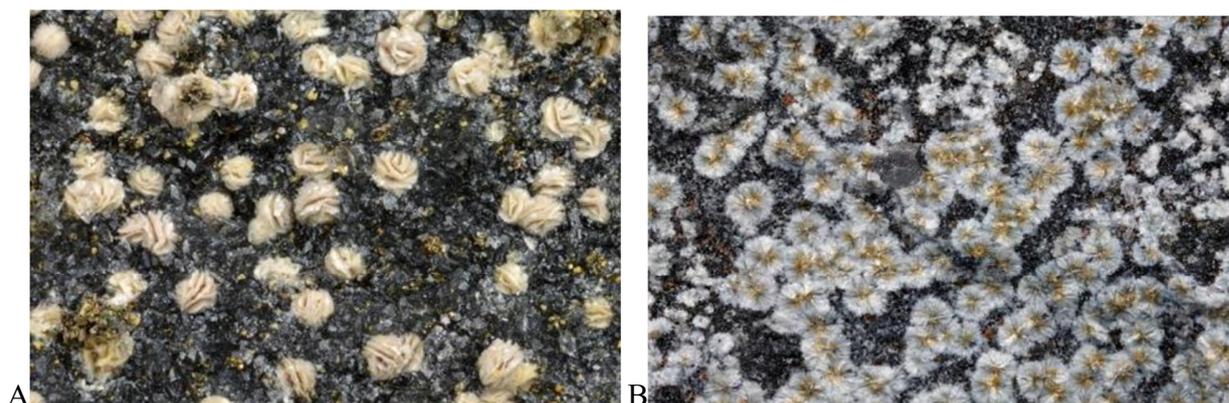
L'asbolane est une espèce typique d'altération connue sous le terme de « wad » cobaltifère et nickelifère mais la littérature signale des teneurs très variables en cobalt et nickel et même la présence d'autres éléments chimiques. A Bertrix, le nickel n'a pas été détecté dans ces phases minérales.

L'asbolane était signalée anciennement en Belgique dans des sables bruxelliens à Woluwe-St-Lambert (Buttgenbach, 1947) mais l'espèce avait été discréditée par Mélon *et al.* (1976). Son observation nouvelle à Bertrix permet de la réhabiliter dans la minéralogie de notre pays.

### 3.6. Bastnäsité-(Ce), $\text{Ce}(\text{CO}_3)\text{F}$ et synchisite-(Ce), $\text{CaCe}(\text{CO}_3)_2\text{F}$

Les premiers échantillons de ce type, analysés par Hatert (2004), correspondent à une association de bastnäsité-(Ce)/synchisite-(Ce) avec bastnäsité-(Ce) dominante; les paramètres de la maille hexagonale de la bastnäsité-(Ce) ont été calculés par cet auteur. L'analyse chimique semi-quantitative de ces échantillons met en évidence la présence de Ca, Ce, Nd et La.

Hatert (2004) a décrit ce minéral comme formant des petits agrégats jaune canari à blanchâtres dans des diaclases de phyllades au niveau N-1 de la partie nord de la carrière. Dans les joints les plus minces, le minéral est cependant réduit à un simple disque d'aspect nacré sans épaisseur (Figure 11B). Par contre, dans les joints plus larges, il se développe sur des cristaux d'adulaire incolore en rosettes constituées d'un assemblage de cristaux très finement lamellaires et atteignant 100  $\mu\text{m}$  de diamètre (Figure 11A).



**Figure 11 :** Association bastnäsité-(Ce)/synchisite-(Ce) de Bertrix. (A) L = 2,7 mm ; (B) L = 4,6 mm (Photos P. Chollet).

Dans la partie ouest de la carrière, on a pu observer, durant l'été 2008, une zone broyée dont les fissures étaient tapissées d'un minéral d'aspect argileux assez fragile, en fait de la chamosite, et de plages parfois de grandes dimensions d'un minéral couleur saumon à orange semblant très comparable, si ce n'est la couleur, aux échantillons étudiés par Hatert (2004) (Figs. 12, 13 et 14). Des

analyses par diffraction des rayons X de ce matériel mettent aussi en évidence l'association bastnäsite-(Ce)/synchisite-(Ce) mais, pour ces échantillons, la synchisite-(Ce) est nettement dominante (Tableau 4).

Les analyses chimiques qualitatives faites sur ce matériel indiquent bien une présence significative de calcium en proportions plus ou moins égales à celles des terres rares qui sont, par ordre d'abondance : Ce, La, Nd et Y. L'oxygène et le fluor sont bien détectés et sans doute aussi le carbone, un élément difficile à mettre en évidence puisque les échantillons sont collés sur un support carboné. Les analyses par diffraction des rayons X et les analyses chimiques qualitatives EDS semblent donc bien montrer la synchisite-(Ce) majoritaire dans les associations de couleur saumon observées en 2008 dans la zone broyée de la partie ouest de la carrière.

**Tableau 4** : Dépouillement des radiogrammes de poudre des associations bastnäsite-(Ce)/synchisite-(Ce) de la carrière de la flèche de Bertrix, comparés à ceux de la bastnäsite-(Ce) de Californie, USA, et de la synchisite-(Ce) d'Italie.

<b>Bertrix (Hatert, 2004)</b>		<b>Bertrix (minéral rose, 2008)</b>		<b>Bastnäsite-(Ce) JCPDS 11-340 *</b>		<b>Synchisite-(Ce) JCPDS 18-284 **</b>	
<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>0</sub>	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>0</sub> (%)	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>0</sub> (%)	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>0</sub> (%)
9,199	(Tf)	9,053	23	-	-	<b>9,1</b>	<b>60</b>
<b>4,873</b>	<b>(F)</b>	4,907	12	<b>4,88</b>	<b>40</b>	-	-
4,517	(f)	<b>4,534</b>	<b>91</b>	-	-	4,53	50
<b>3,552</b>	<b>(F)</b>	<b>4,512</b>	<b>83</b>	-	-	<b>3,55</b>	<b>100</b>
-	-	3,332	44	-	-	3,32	40
-	-	3,023	32	-	-	3,07	30
<b>2,890</b>	<b>(F)</b>	2,907	13	<b>2,879</b>	<b>100</b>	-	-
2,787	(f)	2,884	10	-	-	<b>2,80</b>	<b>100</b>
-	-	-	-	2,610	1	-	-
2,450	(f)	2,452	8	2,445	9	-	-
-	-	-	-	-	-	2,30	20
-	-	2,277	27	2,273	3	2,28	20
-	-	-	-	2,238	3	-	-
2,047	(f)	2,090	19	2,057	40	2,06	50
2,015	(f)	2,044	40	-	-	-	-
1,910	(f)	1,993	12	2,016	40	2,01	20
1,866	(f)	1,911	25	-	-	1,934	50
-	-	1,865	20	1,898	40	1,873	40

\* Fiche JCPDS 11-340 – Bastnäsite-(Ce) de Birthday Claim, Mountain Pass, Californie, USA

\*\* Fiche JCPDS 18-284 – Synchisite-(Ce) de Predazzo, Italie

TF : Très fort, F : Fort, m : moyen, f : faible, Tf : très faible.

Diffractomètre à 4 cercles Rigaku Xcalibur, détecteur EOS, radiation MoK $\alpha$ .

Ces minéralisations roses à synchisite-(Ce) majoritaires sont associées à des petits tortillons de chamosite, à l'adulaire en cristaux incolores, à la calcite en petits scalénoèdres blancs, à du quartz en minuscules cristaux incolores, à des sulfures de fer (pyrite et marcasite) altérés en goethite, à nombreux mais minuscules cristaux d'anatase et aussi à la rare agardite-(Y). Ces associations synchisite-(Ce)/bastnäsite-(Ce) se présentent parfois en petits globules feuilletés ou en curieux petits

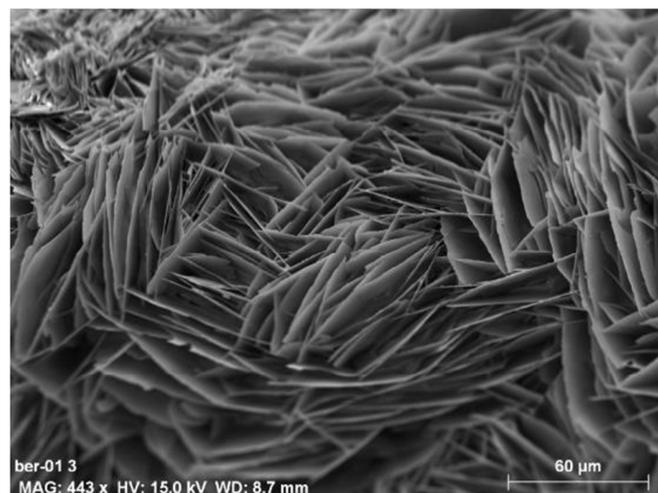
cylindres de quelques millimètres de longueur (Figures 13A et B). Certains échantillons semblent aussi montrer des cristaux prismatiques entièrement recouverts par ces associations mais le minéral initial a disparu ; l'intérieur de ces structures est creux et il ne reste plus qu'une pseudomorphose (périmorphose) ayant conservé la forme cristalline initiale dont la morphologie pourrait suggérer la laumontite (Figure 13C). De l'asbolane en petites gerbes s'est parfois développée ultérieurement sur toutes ces minéralisations (Figures.9, 10).



**Figure 12 :** Association synchisite-(Ce)/bastnäsite-(Ce) de Bertrix. (A) L = 8,5 mm ; (B) L = 2,45 mm (Photos P. Chollet).



**Figure 13 :** Association synchisite-(Ce)/bastnäsite-(Ce) de Bertrix montrant de curieux cylindres et pseudomorphoses. (A) L = 2,5 mm ; (B) L = 2,45 mm ; (Photos P. Chollet) ; (C) L = 4 mm (Photo M. Blondieau).



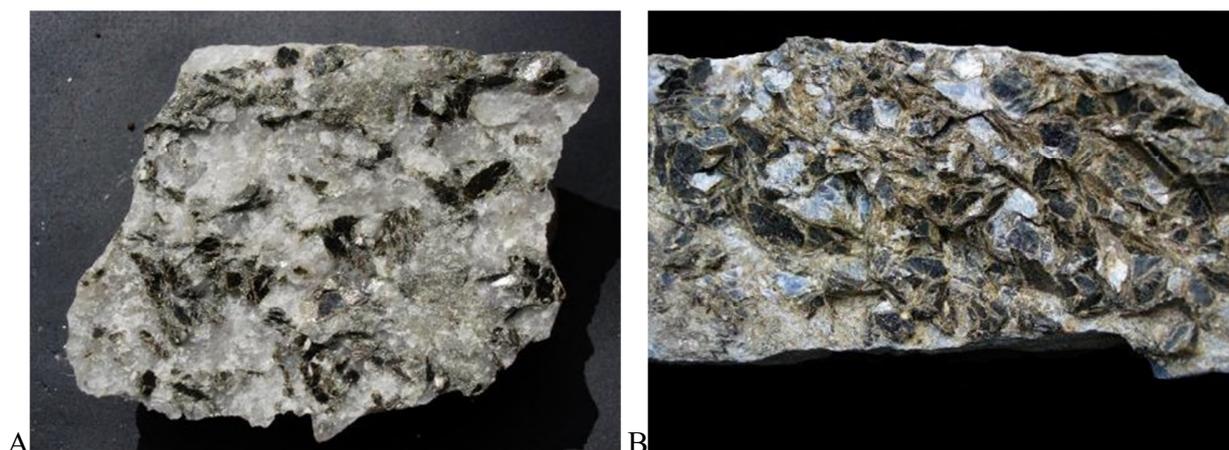
**Figure 14 :** Association synchisite-(Ce)/bastnäsite-(Ce) de Bertrix. Échantillon BER-01, photographie au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires.

**3.7. Biotite : Annite  $KFe^{2+}_3[Si_3AlO_{10}](OH)_2$  - phlogopite  $KMg_3[Si_3AlO_{10}](OH)_2$ , Siderophyllite  $KFe^{2+}Al[Si_2Al_2O_{10}](OH)_2$  - eastonite  $KAlMg_2[Si_2Al_2O_{10}](OH)_2$ , Suhailite  $NH_4Fe^{2+}_3[Si_3AlO_{10}](OH)_2$**

Le nom de *biotite* ne désigne plus aujourd'hui une espèce minérale unique mais correspond à deux solutions solides de micas noirs. Il s'agit des séries annite-phlogopite et siderophyllite-eastonite.

De nombreuses analyses de *biotite*, réalisées par de Bethune (1977) sur des échantillons observés dans des cornéites de la région de Libramont, indiquent que ces micas appartiennent plutôt à la solution solide annite-phlogopite. La majorité des échantillons montrent également une prédominance légère du fer par rapport au magnésium ; il s'agit donc d'annite, ce qui est également confirmé pour la carrière de Bertrix par Hatert & Theye (2005).

La *biotite* en plages infra-millimétriques est abondante dans certaines roches de la carrière de Bertrix. Elle est également reconnue en plages centimétriques montrant des cristaux bruns à noirs dans les roches gréseuses associées aux boudins (Fig. 15). Ces échantillons sont visuellement très comparables à ceux observés à Bastogne et connus sous le nom ancien de *bastonite*. Pour cette *biotite* de Bastogne, Kenis & Sintubin (2007) indiquent : "*Ce mica est décrit comme extrêmement pauvre en potassium et est nommé bastonite. D'après Bos et al. (1987), il s'agit d'un des micas noirs parmi les plus riches en  $NH_4^+$  et cette teneur est bien au-delà du contenu maximum pour des roches métamorphiques.*" Cette composition chimique originale était déjà signalée par Hatert *et al.* (2002) qui décrivent ces micas comme très pauvres en potassium mais riches en fer et en eau avec un enrichissement en  $NH_4^+$ . Cette description pourrait correspondre à la suhailite, un mica proche de l'annite mais où le potassium est remplacé par un groupement ammonium. Cette identification est très vraisemblable mais des analyses plus poussées devraient confirmer cette espèce à Bastogne et éventuellement aussi à Bertrix.



**Figure 15 :** Biotite de Bertrix. (A) En plages non altérées dans quartz, (L = 5 cm). (B) En plages altérées et en voie de vermiculitisation sur roche gréseuse des boudins (L = 6cm). Photos M. Blondieau.

À Bastogne, le minéral est généralement très altéré et pourrait être partiellement transformé en vermiculite, un minéral qui se caractérise par une raie intense de diffraction à 14,2 Å (Hatert *et al.*, 2002). Sur certains échantillons de Bertrix, la "biotite" se présente en lamelles noires bien brillantes (Figure 15A), alors que sur d'autres, les lamelles sont moins noires et sont émoussées à leurs extrémités (Figure 15B). Des analyses par diffraction des rayons X ont été réalisées sur ces deux types d'échantillons. Ceux qui sont altérés montrent bien la présence d'une raie de diffraction autour de 14 Å indiquant, comme à Bastogne, une certaine vermiculitisation du minéral. Hatert *et al.* (2007) indiquent que la déstabilisation de la biotite de Bertrix a permis de libérer du fer et du magnésium pour la formation de pumpellyite-(Al), ainsi que du potassium pour la formation de microcline.

### **3.8. Calcioancylite-(Ce), $\text{CaCe}_3(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$**

Hatert (2004) a observé la calcioancylite-(Ce) dans des fractures minéralisées en stilbite-Ca et en chabazite-Ca de la partie nord-ouest de la carrière (niveaux N -2 et N -3), en cristaux vert pistache atteignant 150 µm de longueur et adoptant un faciès rhomboctaédrique (Figures 16A et B). Plus tard, d'autres cristaux ont été observés sur des croûtes cristallines d'heulandite dans la partie sud-est de la carrière au niveau N-2. Ils se présentent en petites plages jaunâtres constituées de l'association d'un grand nombre de minuscules cristaux adoptant une morphologie assez comparable à celle des cristaux décrits par Hatert (2004), ce que montrent bien les photos réalisées avec le microscope électronique à balayage (Figures 16C et D).

Les analyses chimiques qualitatives réalisées sur ces cristaux indiquent la présence des éléments majoritaires O, C, Ce, Ca et La, ainsi que Nd et Sr minoritaires. Le cérium étant la terre rare dominante, il s'agit donc de calcioancylite-(Ce). Ce minéral s'observe également en cristaux incolores parfois piquetés de taches rouges (Figure 16E) et aussi en cristaux rose pâle (Figure 16F).

### **3.9. Calcioancylite-(Nd), $\text{CaNd}_3(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$**

Fin 2006, des cristaux millimétriques violacés dont la couleur varie entre le rose et le violet pâle mais avec une morphologie très différente de celle des cristaux de calcioancylite-(Ce) ont également été observés sur un seul gros bloc le long de la rampe d'accès entre les niveaux N-2 et N-3 de la partie est de la carrière. Ces cristaux, plus globulaires que ceux de calcioancylite-(Ce) (Figure 17), apparaissent même avec une forme bombée en "coquille d'huitre" sur les photos obtenues au microscope électronique à balayage (Figure 18).

Développés le long d'une diaclase, ils sont associés à de l'adulaire, de la calcite, de la pyrite, de la marcasite, de l'heulandite-Ca et de la stellerite. Des analyses chimiques qualitatives par EDS indiquent la présence des éléments majoritaires O, C, La, Nd et Ca, ainsi que Sr et Pb très minoritaires et Ce non détecté. Des analyses chimiques complémentaires à la microsonde électronique (WDS, Pietro Vignola, Turin, Italie) indiquent des teneurs en La et Nd assez proches, avec Nd dominant.



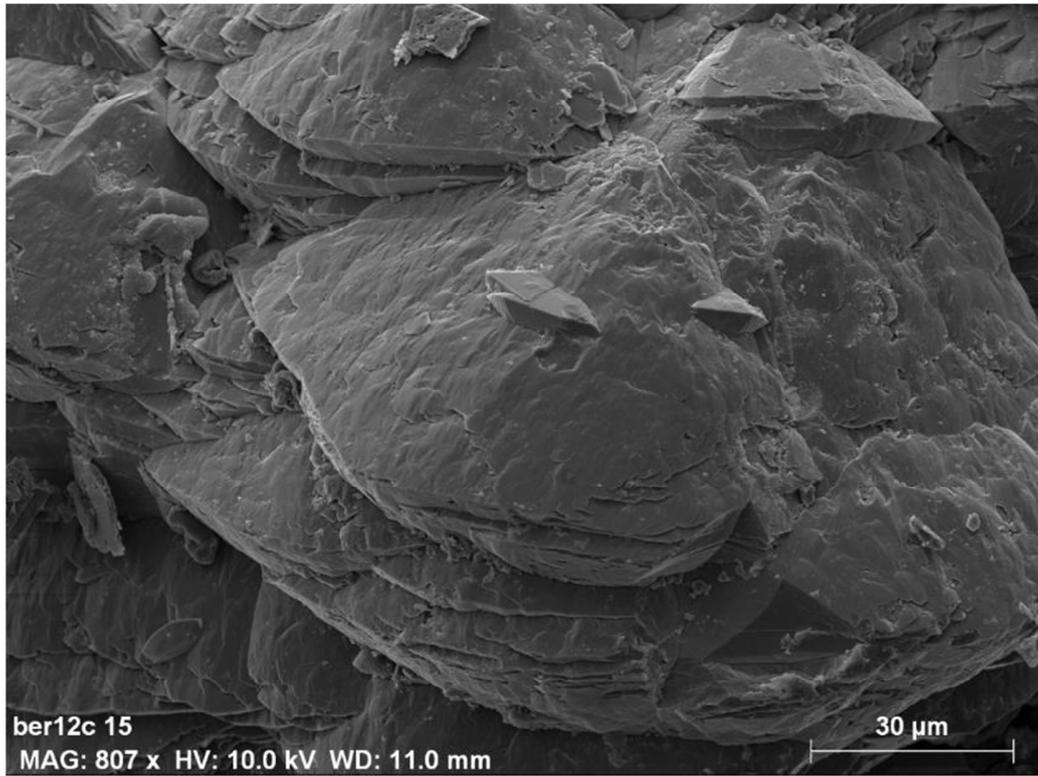
**Figure 16 :** Calcioancylite-(Ce) de Bertrix. (A et B) Cristaux jaune-vert en association avec Stilbite-Ca, (A) L = 1 mm ; (B) L = 0,28 mm (Photos P. Chollet). (C et D) Cristaux jaune-brun en association avec heulandite ; (C) L = 1,45 mm (Photo P. Chollet) ; (D) Échantillon Ber 12d, photographie au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires. (E et F) Cristaux différemment pigmentés ; (E) L = 0,33 mm ; (F) L = 1,25 mm (Photos P. Chollet).

L'analyse par diffraction des rayons X en mode Debye-Scherrer montre qu'il s'agit également d'un minéral du groupe de l'ancylite. Une étude par diffraction des rayons X sur monocristaux a permis de déterminer la structure cristalline du minéral ainsi que les paramètres de sa maille orthorhombique :  $a = 4,9979(2)$  ;  $b = 8,4838(4)$  ;  $c = 7,2253(5)$  Å (groupe spatial  $Pmc2_1$ ). Ces données structurales,

couplées aux analyses à la microsonde électronique, permettent d'identifier cette espèce comme calcioancylite-(Nd).



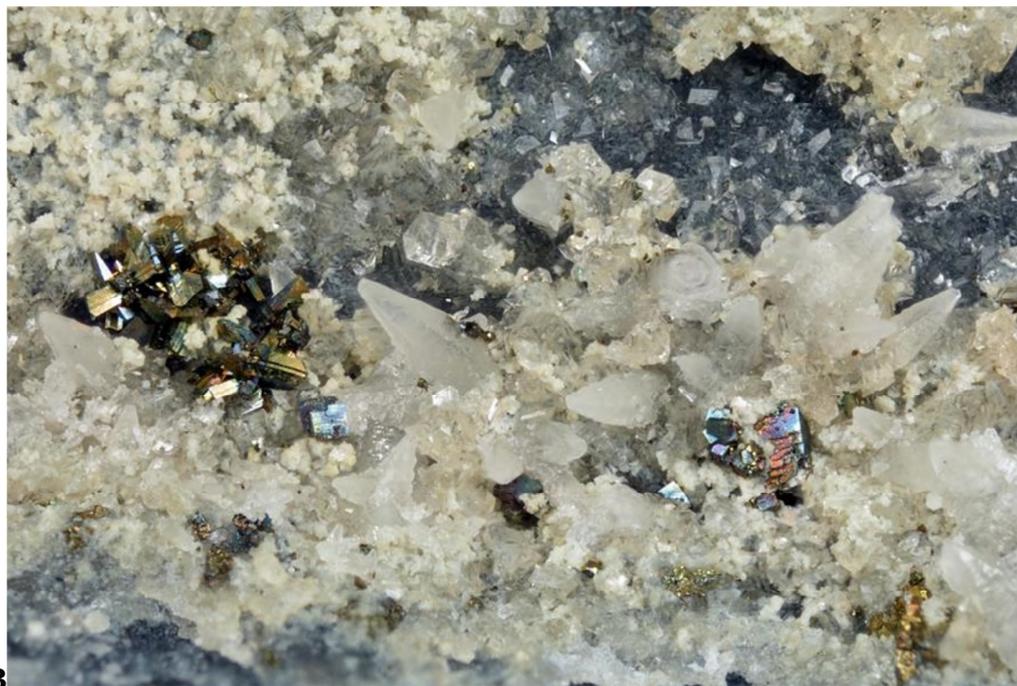
**Figure 17 :** Calcioancylite-(Nd) de Bertrix avec pyrite. (A) L = 1,15 mm ;  
(B) L = 0,80 mm (Photos P. Chollet).



**Figure 18** : Calcioancylite-(Nd) de Bertrix, Échantillon BER-12c, photographie au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires.

### 3.10. Calcite, $\text{CaCO}_3$

La calcite n'est pas rare dans la carrière de la Flèche de Bertrix. On l'observe massive, en veines de quelques centimètres jusqu'à plusieurs décimètres de puissance. Elle se clive alors facilement en nombreux rhomboédres de teinte blanche ou jaune pâle, parfois de qualité optique. Dans ces grosses veines assez compactes, des cristaux en rhomboédres aplatis sont parfois observables (Figure 19A). La calcite constitue aussi le ciment de la brèche observée dans la partie nord de la carrière, et est également associée aux zéolites, en cristaux millimétriques dont la morphologie est soit le scalénoèdre dans les joints à stilbite (Figure 19B), soit le prisme dans les joints à heulandite. Hatert & Theye (2005) signalent encore la calcite dans les fractures à pumpellyite-(Al), ainsi que dans les roches encaissant ce minéral.



**Figure 19** : Calcite de Bertrix. (A) Agrégat de cristaux rhomboédriques, échantillon 20 x 17 mm. (B) Scalénoèdres de calcite avec adulaire et marcasite, L = 4,40 mm.  
Photos P. Chollet.

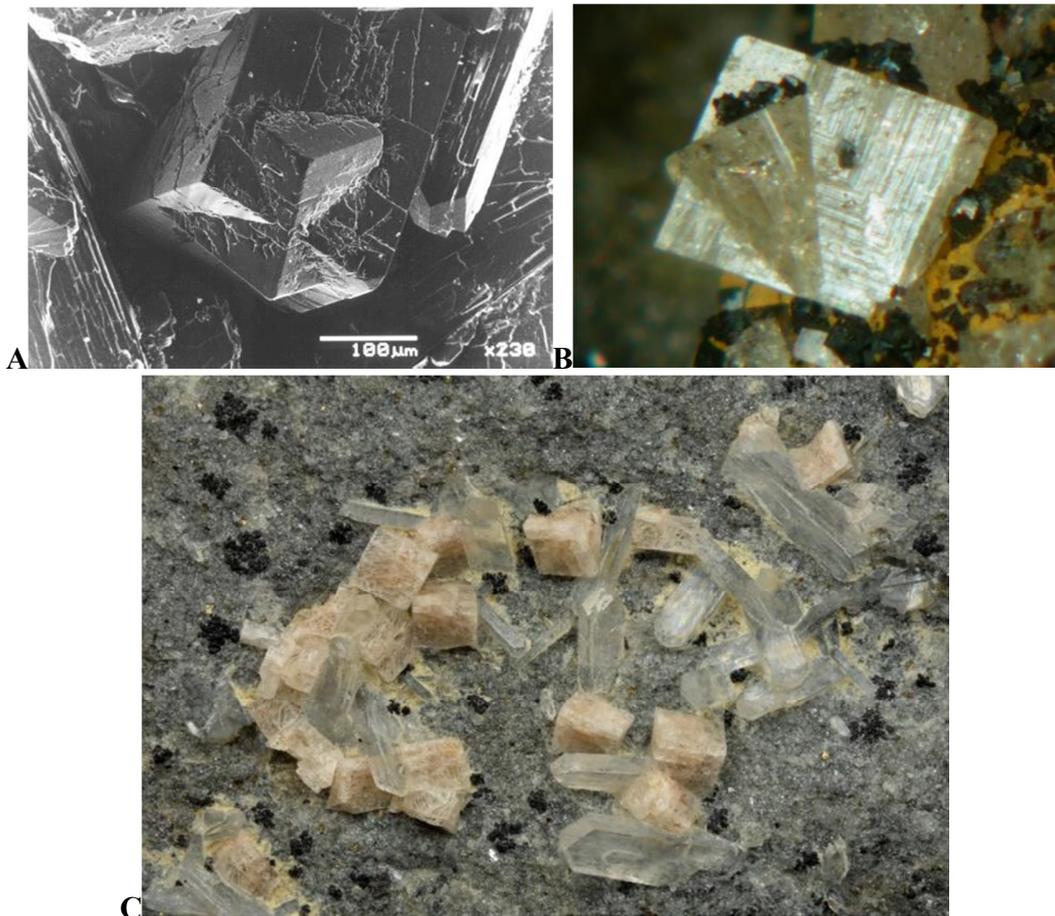
### 3.11. Cérusite, $\text{PbCO}_3$

La cérusite est observée en petites croûtes grises sur la galène, en association avec des plages jaunes de pyromorphite. L'identification du minéral est confirmée par diffraction des rayons X.

### 3.12. Chabazite-Ca, $\text{Ca}_2[\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}]\cdot 13\text{H}_2\text{O}$

Hatert & Theye (2005) décrivent la chabazite-Ca de la carrière de la flèche en association fréquente avec la stilbite-Ca. Elle se présente en cristaux rhomboédriques atteignant plus d'un millimètre en longueur. Les macles sont fréquentes (Figures 20A et B).

Dans la partie nord-ouest de la carrière, des fractures bien minéralisées avec chabazite-Ca et stilbite-Ca ont été découvertes en plages atteignant parfois  $1 \text{ m}^2$ , lors de tirs réalisés en janvier 2003 au niveau N-2. Les cristaux de chabazite-Ca les plus petits sont incolores alors que les plus gros apparaissent plus corrodés et sont devenus mats et de teintes variant du blanc au rose pâle (Figure 20C).



**Figure 20** : Chabazite-Ca de Bertrix. (A) Cristaux maclés et très corrodés (Photographie au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires, F. Hatert). (B) Cristaux maclés saupoudrés de pyrite/marcasite très altérée (Photo M. Blondieau). (C) Chabazite-Ca (rose) et stilbite-Ca (incolore) avec mouchetures noires d'asbolane. L = 9,1 mm, photo P. Chollet.

### **3.13. Chalcopyrite, CuFeS<sub>2</sub>**

La chalcopyrite, identifiée visuellement, est confirmée par diffraction de rayons X. Elle se présente en petites plages xénomorphes d'un diamètre généralement inférieur à un centimètre, dans de minces veines de quartz associées aux "boudins" du niveau N-2 de la partie est de la carrière. Elle est souvent associée à l'albite dans les zones de contact avec la roche encaissante. Généralement assez corrodée, elle s'entoure d'auréoles brunes de goethite ainsi que de minéraux d'altération verts parmi lesquels on a pu identifier le chrysocolle, la malachite et l'agardite-(Y).

Assez curieusement, la chalcopyrite peut également former un fin film au centre des plus gros grenats, observés dans les cornéites au niveau N-3 de la partie est de la carrière, ce qui les rend très fragiles.

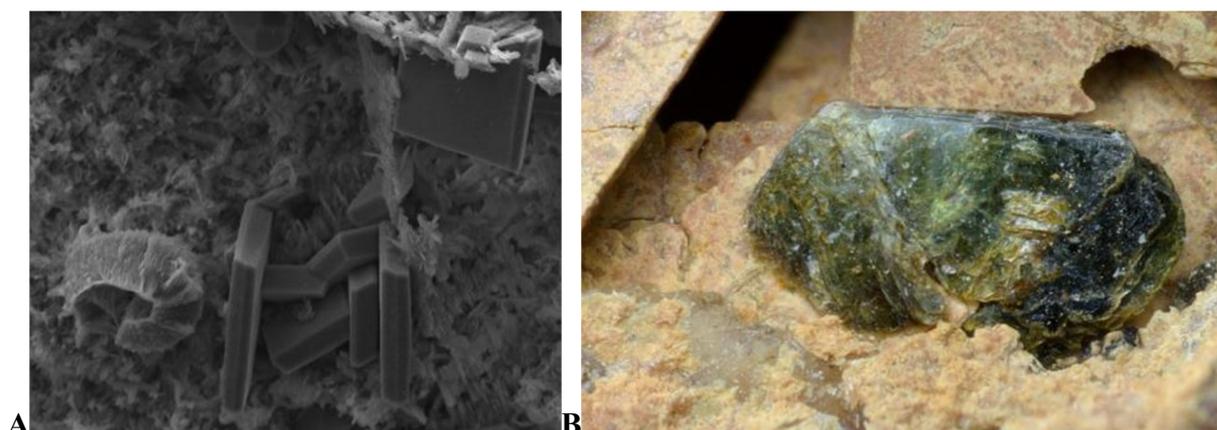
Godfroid (1999) signale la présence de deux populations de chalcopyrite à Bertrix. La première a une composition chimique classique avec un contenu appréciable en Bi (0,10% en poids) et des traces de Se (0,03%) et de Ni (0,02%). La seconde s'écarte de la formule idéale avec un déficit en fer, un excès en cuivre et une teneur importante en argent (1,2%) ainsi que des traces de Se (0,05%).

### **3.14. Chlorites : Chamosite $Fe^{2+}_5 Al[Si_3AlO_{10}](OH)_8$ – clinochlore $Mg_5Al[Si_3AlO_{10}](OH)_8$**

Hatert *et al.* (2002) indiquent que les chlorites de la zone métamorphique de Bastogne-Libramont sont très pauvres en manganèse ; il s'agit de chlorites avec fer dominant (chamosite) ou de chlorites magnésiennes (clinochlore). De Bethune (1977) a analysé de nombreux échantillons de la zone métamorphique de Libramont et a montré l'existence de différentes populations de chlorites mais leurs analyses, réalisées sur des échantillons prélevés dans des phyllades ou cornéites, indiquent le pôle magnésien nettement dominant sur le pôle ferreux. Il s'agit donc généralement de clinochlore. Par contre, les analyses réalisées sur les chlorites de la carrière de Bertrix montrent toutes le pôle ferreux dominant; il s'agit dès lors de chamosite (Hatert & Theye, 2005).

Les analyses chimiques qualitatives EDS réalisées dans le cadre de cette étude, sur des chlorites de couleur kaki qui tapissent les joints renfermant les associations synchisite-(Ce)/bastnaesite-(Ce), montrent bien, elles aussi, une teneur en fer nettement supérieure à celle du magnésium. Confirmée par diffraction des rayons X, cette chamosite se présente en agrégats pelucheux et parfois aussi en minuscules vermicules assez caractéristiques du minéral (Figure 21A).

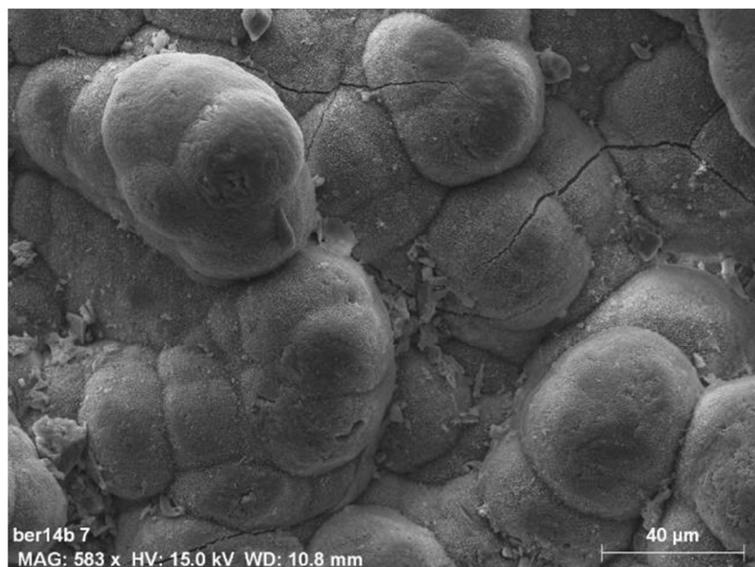
Signalons également l'identification visuelle de plages centimétriques de chlorites vertes associées à des grenats rouges dans les roches gréseuses des boudins mais aussi dans les quartz enfumés à iménite/rutile (Figure 21B). Leur composition chimique n'a pas été contrôlée. Les chlorites de la carrière de Bertrix semblent donc être majoritairement de la chamosite, mais la présence de clinochlore n'est pas à exclure au vu de toutes les analyses réalisées par de Bethune (1977) dans la région.



**Figure 21 :** Chamosite de Bertrix. (A) Petit vermicule et petits agrégats pelucheux en association avec des cristaux d'anatase. Échantillon BER-19, photographie au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires (L = 100  $\mu\text{m}$ ). (B) Chamosite sur lames de rutile, L = 1,75 mm (Photo P. Chollet).

### 3.15. Chrysocolle, $(\text{Cu}_{2-x}\text{Al}_x)\text{H}_{2-x}\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Un minéral bleu verdâtre mamelonné et vitreux est observé dans des veines de quartz parsemées de mouchetures de chalcopyrite. L'analyse par diffraction des rayons X fournit un diffractogramme avec des pics larges mais bien marqués, en tous points comparable à celui du chrysocolle de la mine des Rats, Le Crozet, Loire, France (Tableau 5).



**Figure 22 :** Chrysocolle de Bertrix. Échantillon BER-14b, photographie au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires.

Les photos en microscopie électronique à balayage montrent une apparence craquelée, ce qui est assez caractéristique des minéraux amorphes comme le chrysocolle (Figure 22). Enfin, les analyses chimiques qualitatives par EDS indiquent bien la présence des éléments majoritaires O, Si et Cu,

ainsi que Al moins abondant, ce qui confirme l'identification du chrysocolle, une espèce déjà recensée en Belgique à Bastogne (Hatert *et al*, 2000).

**Tableau 5** : Dépouillement du radiogramme de poudre du chrysocolle de Bertrix, et comparaison avec le chrysocolle de la mine des Rats (Le Crozet, France) et de la fiche JCPDS 27-188.

Chrysocolle Bertrix		Chrysocolle Le Crozet (F)		Chrysocolle JCPDS 27-188	
<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>0</sub> (%)	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>0</sub> (%)	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>0</sub> (%)
-	-	-	-	<b>17,9</b>	<b>80</b>
9,117	M	-	-	-	-
-	-	8,056	M	7,9	60
-	-	-	-	4,45	20
<b>4,174</b>	<b>F</b>	<b>4,123</b>	<b>F</b>	4,07	60
3,733	F	3,768	f	-	-
3,394	F	3,383	f	-	-
<b>2,901</b>	<b>F</b>	<b>2,965</b>	<b>m</b>	<b>2,90</b>	<b>80</b>
2,586	M	2,603	f	2,56	70
-	-	2,380	f	-	-
-	-	2,185	tf	-	-
<b>1,614</b>	<b>m</b>	<b>1,613</b>	<b>m</b>	1,602	40
<b>1,478</b>	<b>m</b>	<b>1,484</b>	<b>m</b>	<b>1,486</b>	<b>100</b>
1,319	f	1,323	f	-	-
1,273	tf	1,267	tf	-	-
1,237	tf	1,234	tf	-	-
1,199	tf	1,198	f	-	-

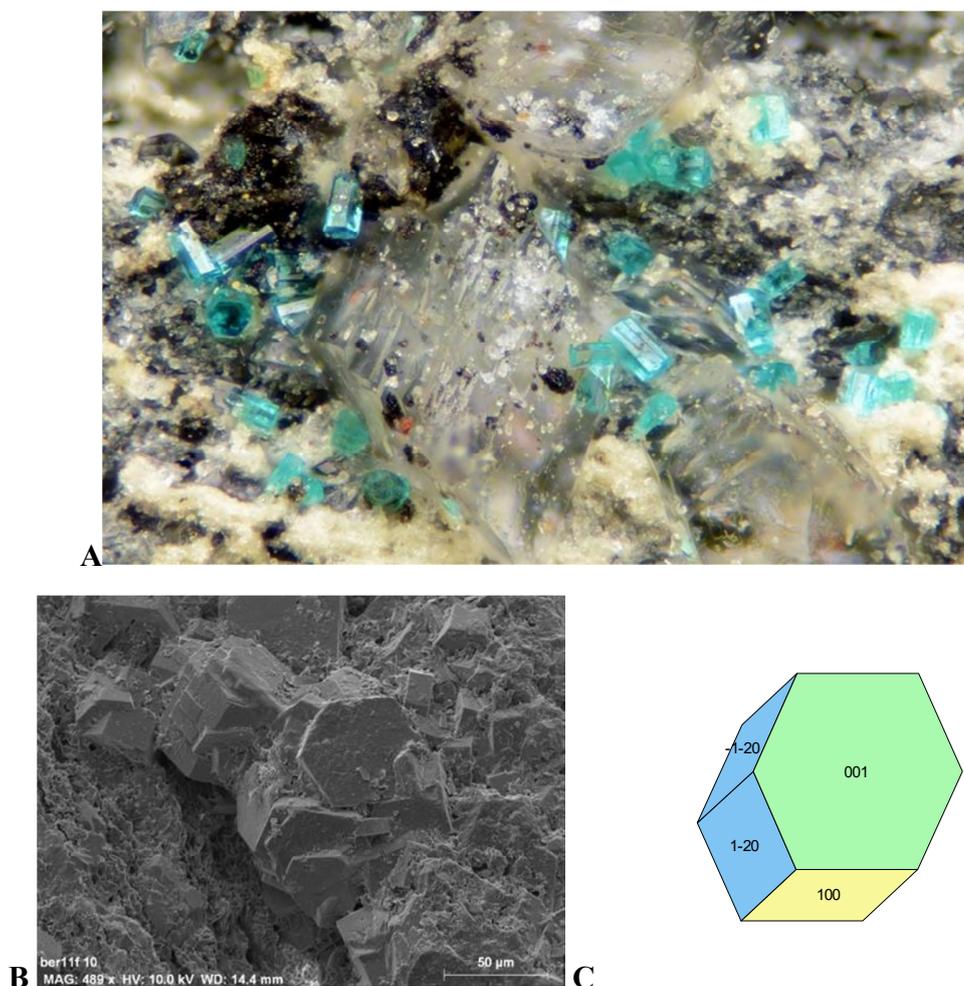
TF : Très fort, F : Fort, m : moyen, f : faible, Tf : très faible.  
Diffractomètre à 4 cercles Rigaku Xcalibur, détecteur EOS, radiation MoK $\alpha$ .

### 3.16. Clinoclase, Cu<sub>3</sub>(AsO<sub>4</sub>)(OH)<sub>3</sub>

De très rares échantillons, recueillis dans la partie nord de la carrière au niveau N-2, montrent de petits cristaux en barillets pseudo-hexagonaux, de couleur bleu turquoise (Figures 23A, B). Une analyse sur monocristaux, au diffractomètre à 4 cercles, a permis une détermination directe des paramètres de maille et du groupe spatial de ce minéral :  $a = 7,266(3)$ ,  $b = 6,461(2)$ ,  $c = 12,396(4)$  Å,  $\beta = 99,49(3)^\circ$ ,  $P2_1/c$ . Ces paramètres sont en parfait accord avec ceux de la clinoclase (Tableau 6), permettant ainsi l'identification de l'espèce.

Les analyses EDS montrent une composition chimique très proche de celle de l'agardite-(Y), avec As et Cu dominants, associés à de plus faibles teneurs en Al, P, Si, S, Ca, Y, Nd et La. La présence de cuivre et d'arsenic est en bon accord avec la clinoclase, et les teneurs en autres éléments sont probablement liées à des phases en impuretés.

La morphologie en barillets pseudo-hexagonaux correspond à la combinaison  $\{100\}\{120\}\{001\}$ , comme le montre la Figure 23C.



**Figure 23 :** Clinoclase de Bertrix. (A) Prismes pseudo-hexagonaux bleu turquoise. L = 0,68 mm, photo P. Chollet. (B) Échantillon BER-11f, photographie au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires. (C) Morphologie de la clinoclase de Bertrix, montrant la combinaison  $\{100\} \{120\} \{001\}$ .

**Tableau 6 :** Comparaison des paramètres de maille et du groupe spatial de la clinoclase de Bertrix, avec ceux de clinoclase d'autres localités.

	<b>Bertrix</b>	<b>Majuba Hill Névada USA</b>	<b>Roughton Gill Angleterre</b>	<b>Majuba Hill Névada USA</b>	<b>Carissa Mine Utah USA</b>
<b>Référence</b>	Ce travail	Ghose <i>et al.</i> (1965)	Eby & Hawthorne (1990)	RRUFF R070092.2	RRUFF R050659.9
<b><i>a</i> (Å)</b>	7,266(3)	7,24	7,257(2)	7,2697(2)	7,23(1)
<b><i>b</i> (Å)</b>	6,461(2)	6,46	6,457(2)	6,4595(4)	6,427(7)
<b><i>c</i> (Å)</b>	12,396(4)	12,38	12,378(3)	12,397(1)	12,34(2)
<b><math>\beta</math> (°)</b>	99,49(3)	99,5	99,51(2)	99,492(8)	99,52(5)
<b>Groupe spatial</b>	$P2_1/c$	$P2_1/c$	$P2_1/c$	-	-

### 3.17. Covellite, CuS

La covellite est signalée dans la carrière de la Flèche de Bertrix par Godfroid (1999), qui précise qu'elle remplace la chalcopryrite associée à la sphalérite. Les analyses chimiques à la microsonde électronique indiquent des teneurs importantes en Fe (1,09 %), des traces de Bi (0,11 %), de Se (0,04 %) et de Te (0,04 %). Lors de nos recherches, nous l'avons également identifiée visuellement en petites plages poudreuses violacées autour de plages de chalcopryrite altérée.

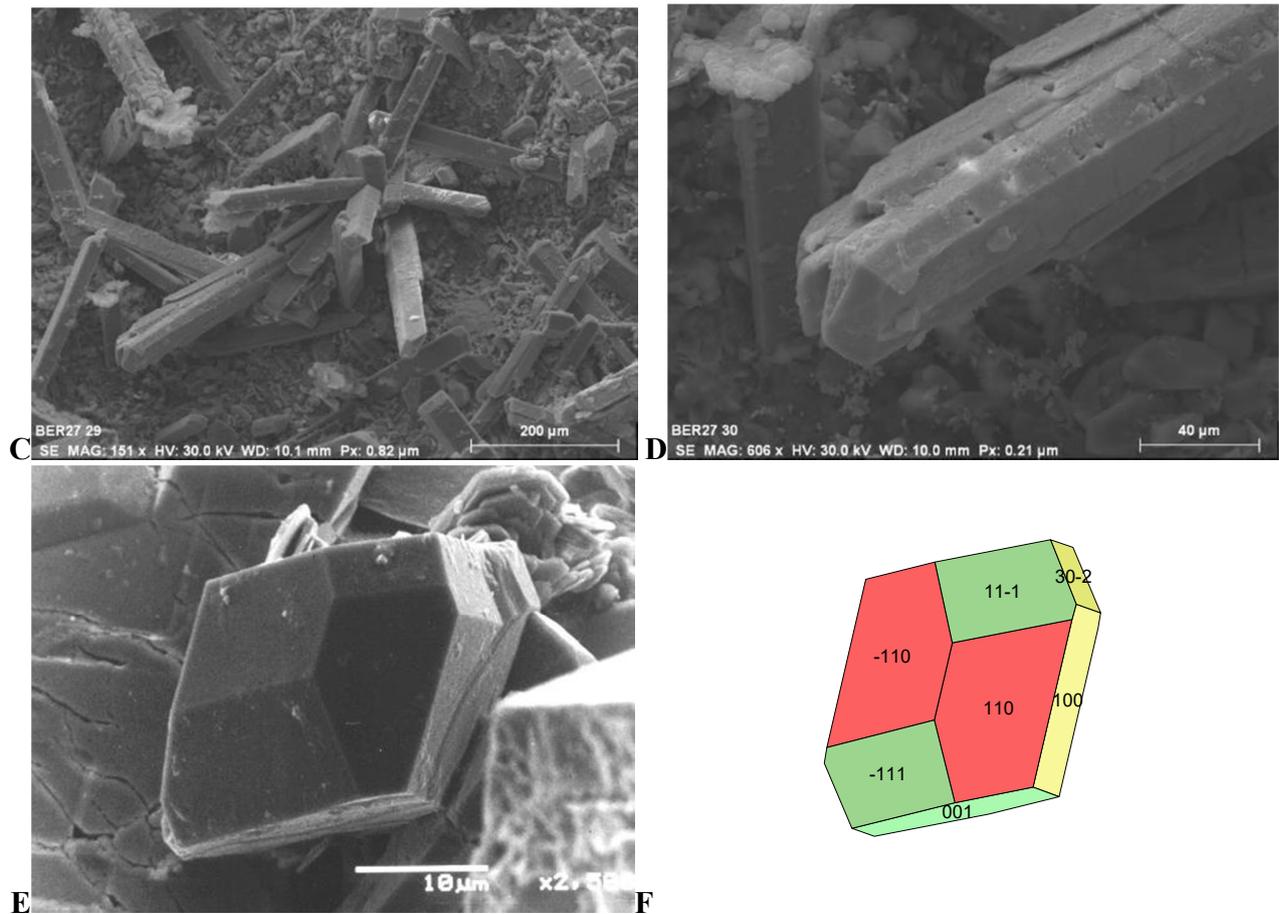
### 3.18. Épidotes : Clinozoïsite $\text{Ca}_2\text{Al}_3[\text{Si}_2\text{O}_7][[\text{SiO}_4]\text{O}(\text{OH})$ – épidote $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Fe}^{3+}[\text{Si}_2\text{O}_7][[\text{SiO}_4]\text{O}(\text{OH})$

De Béthune (1977) signale les *épidotes* abondantes dans la zone métamorphique de Libramont, et indique que la clinozoïsite semble être le membre le plus fréquent du groupe. Il signale cependant la présence également de "pistacite", une espèce plus ferrifère appelée aujourd'hui épidote, dans des cornéites à Freux.

Lors de nos recherches à Bertrix, nous avons identifié visuellement comme *épidote* des cristaux blancs jaunâtres ou jaunes, très minces et d'une longueur maximale de 5 millimètres. Ils ont principalement été observés dans la partie nord-ouest de la carrière, au niveau N-2. Les cristaux sont parfois noyés dans un matériel argileux brun cireux constitué de montmorillonite, et sont fréquemment imparfaitement développés dans des joints très étroits (Figure 24). Des analyses par diffraction des rayons X ont permis de confirmer qu'il s'agissait bien d'un minéral du groupe de l'épidote, et des analyses chimiques qualitatives EDS ont montré la présence majoritaire des éléments O, Si, Al et Ca ainsi que Fe très minoritaire, confirmant ainsi la clinozoïsite.

Les cristaux de clinozoïsite de Bertrix, allongés selon l'axe cristallographique  $b$ , sont caractérisés par la combinaison  $\{100\}\{001\}\{110\}\{11\bar{1}\}$ , avec les facettes  $\{30\bar{2}\}$  moins développées (Figs. 24E et F).

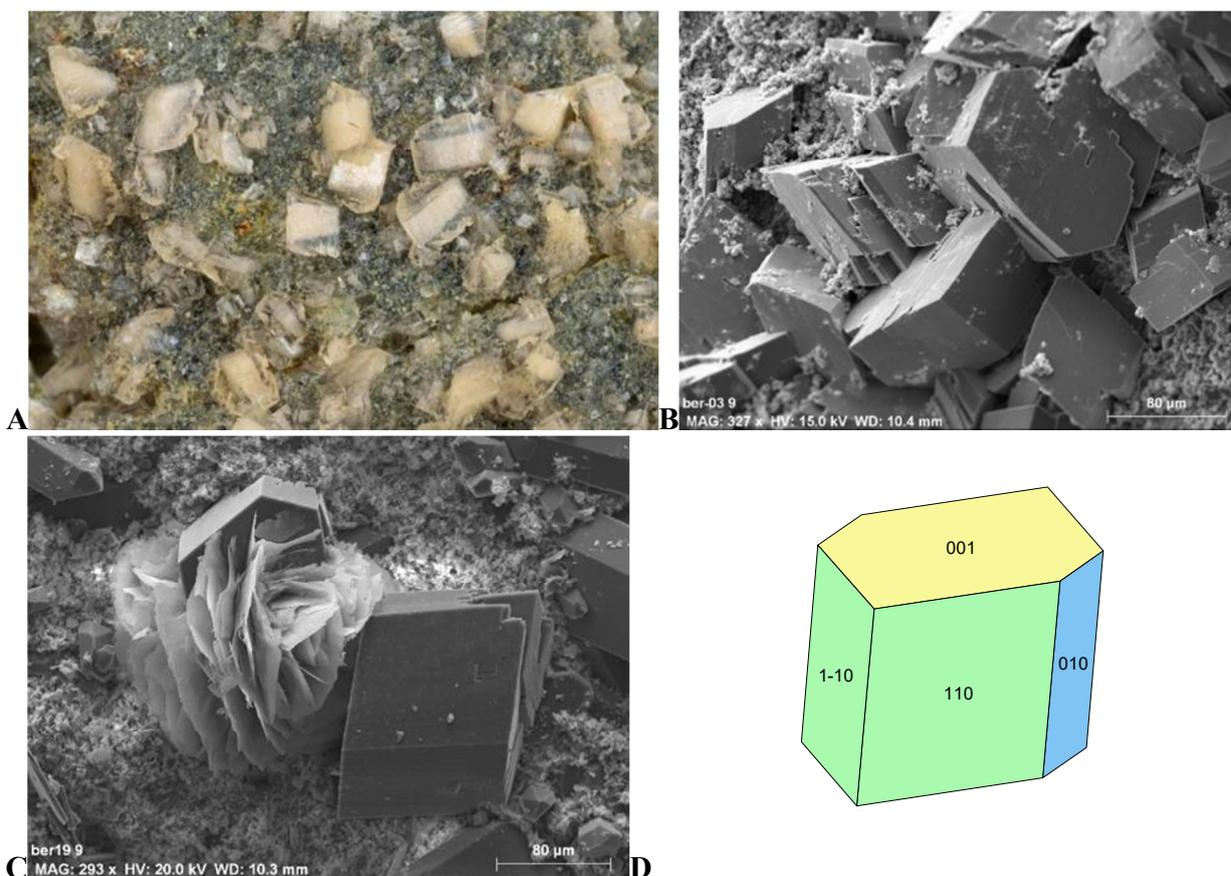




**Figure 24 :** Clinozoïsite de Bertrix. (A) Aiguilles tapissant une fracture, L = 2,35 mm; (B) L = 2,45 mm (Photos P. Chollet). (C et D) Photographies au microscope électronique à balayage de l'échantillon BER-27, mode électrons secondaires. (E) Photographie au microscope électronique à balayage (mode électrons secondaires) prise perpendiculairement à l'allongement d'un cristal, montrant sa terminaison. (F) Modélisation de la morphologie du cristal précédent.

### 3.19. Feldspaths potassiques : Orthose et microcline, $K[AlSi_3O_8]$

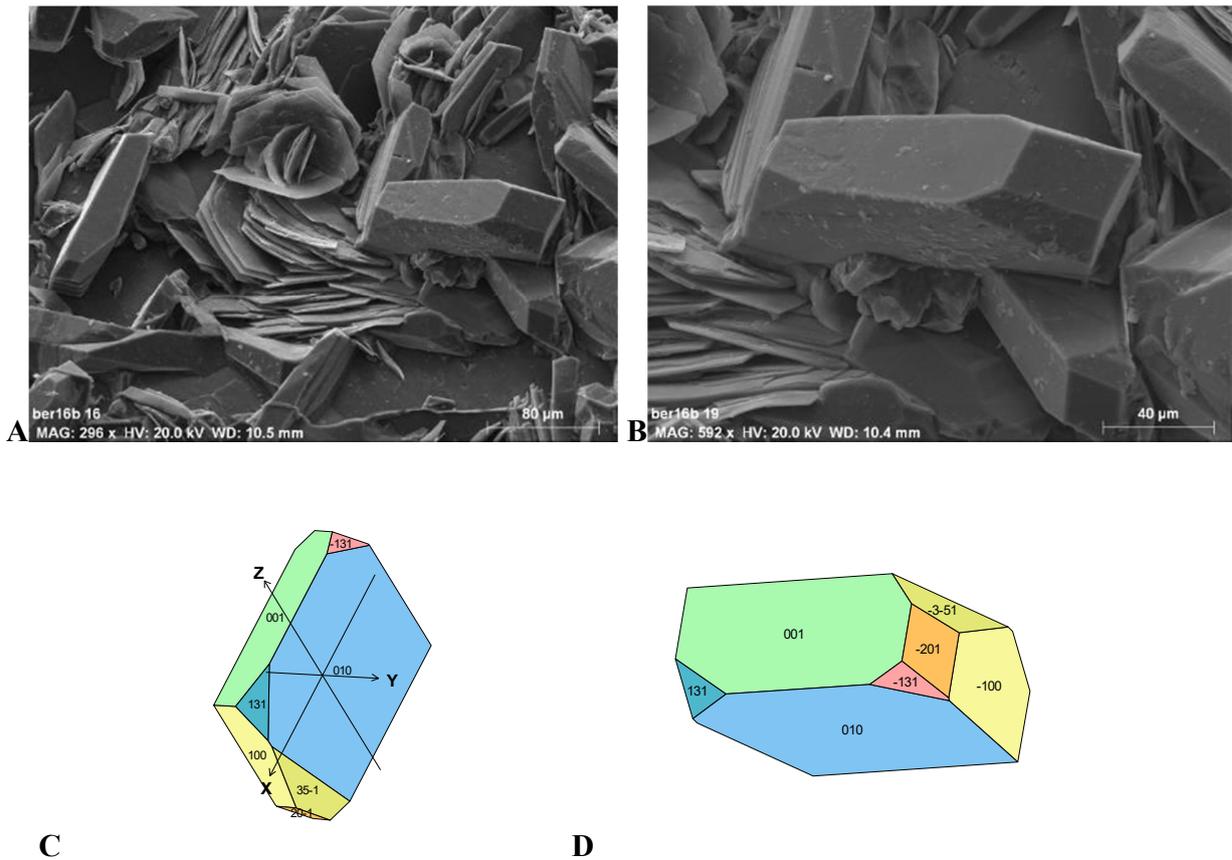
La différenciation entre orthose et microcline n'est pas aisée par diffraction des rayons X, mais ces espèces présentent des caractéristiques morphologiques bien distinctes. A Bertrix, l'orthose est présente sous sa variété *adulaire*, caractérisée par un faciès pseudo-rhomboédrique. Hatert *et al.* (2002) précisent qu'elle s'y présente en cristaux incolores atteignant 300 μm de diamètre, et tapissant les diaclases de la roche (Figure 25). Certains cristaux montrent une partie centrale rose (Figure 25A) ; leur identification est confirmée par diffraction des rayons X et par des analyses chimiques qualitatives qui mettent en évidence la seule présence des éléments O, Si, Al et K.



**Figure 25 :** *Adulaire* de Bertrix. (A) Cristaux montrant une partie centrale rose, L = 3,45 mm (Photo P. Chollet). (B) *Adulaire* en association avec la chamosite pelucheuse, échantillon BER-03. (C) *Adulaire* avec un assemblage lamellaire de bastnaésite-(Ce)/synchisite-(Ce) sur chamosite, échantillon BER-19. (B et C), photographies au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires. (D) Morphologie de l'*adulaire* de Bertrix.

L'*adulaire* montre la combinaison simple  $\{110\} \{001\}$ , mais les facettes  $\{010\}$  viennent fréquemment tronquer les cristaux (Figures. 25B, C, D).

Certains échantillons peu fréquents montrent des cristaux lamellaires d'apparence hexagonale, rassemblés en rosettes, associés à des cristaux plus trapus (Figure 26). Ces derniers cristaux, à la morphologie très différente de celle de l'*adulaire*, montrent cependant une composition chimique EDS assez similaire, avec la seule présence des éléments O, K, Si et Al. Les cristaux lamellaires contiennent les mêmes éléments, avec en plus Mg et Fe en faibles teneurs ; cette composition pourrait correspondre à la muscovite.



**Figure 26** : Cristaux lamellaires de Bertrix rassemblés en rosettes (muscovite ?), et associés à de plus gros cristaux de microcline. Échantillon BER-16b, photographies au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires. (A) Association des deux types de cristaux. (B) Gros plan sur un cristal de microcline. (C et D) Morphologie du microcline de Bertrix.

Le diffractogramme de poudre de rayons X, réalisé sur les cristaux les plus gros, indique qu'il s'agit bien d'un feldspath potassique, dont la morphologie correspond à celle du microcline. Des mesures goniométriques ont permis d'identifier la combinaison  $\{100\}\{010\}\{010\}$ , avec aplatissement des cristaux selon  $\{010\}$ . Les facettes  $\{131\}$ ,  $\{\bar{1}31\}$  et  $\{201\}$  forment des tronçures moins développées, de même que les facettes  $\{\bar{3}51\}$  dont la notation est incertaine (Figures. 26C, D).

Malheureusement, les cristaux lamellaires sont trop petits que pour pouvoir diffracter, et leur identification reste incertaine.

### 3.20. Galène, PbS

La galène, identifiée visuellement et confirmée par diffraction des rayons X, semble fort rare à Bertrix, où elle n'a été observée qu'en petits noyaux dans les grosses veines de quartz laiteux de la partie sud de la carrière. Elle est parfois recouverte par quelques minéraux secondaires de plomb : la césurite et la pyromorphite. Les analyses chimiques qualitatives par EDS montrent la présence d'un

peu de sélénium dans cette galène, élément qui avait déjà été repéré dans la galène de Bastogne (Godefroid, 1999). Les analyses par fluorescence X indiquent également la présence d'argent en quantité estimée à 1300 ppm (0,13%), ce qui est beaucoup par rapport aux teneurs habituelles des galènes belges.

### **3.21. Goethite, FeO(OH) et hématite, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

La goethite se présente en enduits bruns autour de chalcopryrite, pyrite et marcasite en voie d'altération. Le minéral est identifié visuellement et par diffraction des rayons X. La goethite est également reconnue en mélange avec l'hématite dans des altérations de sulfures observées sur des joints d'*adulaire* associés à de la laumontite.

### **3.22. Grenats : Almandin Fe<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> – spessartine Mn<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> – grossulaire Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>**

Les *grenats* en cristaux rhombododécaédriques {110} sont connus depuis bien longtemps dans la zone métamorphique de Libramont. Pour cette région, Hatert *et al.* (2002) signalent que les roches grenatifères forment le plus souvent des masses lenticulaires dont les constituants essentiels sont, outre le grenat, le quartz et une matière noire graphitique.

Dans la partie sud, au niveau N-1 de la carrière de Bertrix, il est possible d'observer ces nodules d'un diamètre de l'ordre de 7 cm et d'une longueur d'un demi-mètre parfois. Ils contiennent une multitude de petits grenats millimétriques très bien formés qu'il est possible d'isoler assez facilement. Ils sont bruns avec des réflexions internes rougeâtres (Figure 27A). Aux étages inférieurs de la carrière, notamment au niveau N-3 dans les parties est et nord-est, on observe plutôt des cornéites foncées extrêmement dures à cassure conchoïdale, qui peuvent renfermer des cristaux de grenat presque centimétriques. Les plus gros de ces cristaux ont montré des plans de fragilité constitués de films de chalcopryrite, et leur couleur est généralement brune (Figs. 27B, C, D). Enfin, dans les veines de quartz associées aux boudins de la partie nord de la carrière au niveau N-3, les cristaux de grenat sont de teinte rouge-orangé (Figure 28).

D'un point de vue chimique, ces grenats renferment les trois composantes almandin (Fe<sup>2+</sup>), spessartine (Mn<sup>2+</sup>) et grossulaire (Ca<sup>2+</sup>). Hermann (2004) fournit des analyses à la microsonde électronique qui indiquent que la composante almandin est majoritaire (40 à 45 % molaires), suivie de la composante spessartine (35 à 40% molaires) puis de la composante grossulaire (~20%).

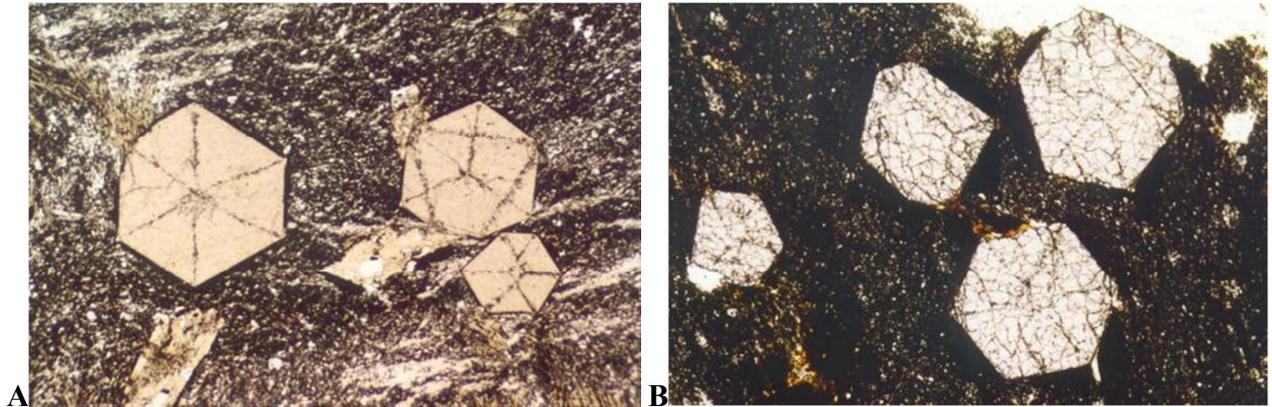
Les grenats de Bertrix renferment également des inclusions de type « pyrénéite » (de Bethune, 1977), qui respectent la symétrie cubique du cristal en formant des croix graphiteuses à 3, 4 ou 6 bras. La figure 29A présente une lame mince taillée dans les roches à grenats de Libramont, où ces inclusions sont clairement visibles, alors qu'à Bertrix, elles apparaissent moins nettement (Figure 29B).



**Figure 27 :** Cristaux de grenat almandin de Bertrix dans les roches noires fragiles des masses lenticulaires (A) et dans les cornéites (B à D). (A) L = 4,9 mm ; (B) L = 9,1 mm ; (C) L = 4,0mm ; (D) L = 2,9 mm (Photos P. Chollet).



**Figure 28 :** Cristaux de grenat almandin de Bertrix dans les parties quartzeuses associées aux boudins. L = 3 cm (Photo M. Blondieau).



**Figure 29** : Roches à grenats de Libramont (A) et de Bertrix (B), observées au microscope polarisant en lumière naturelle. Les inclusions graphitiques noires délimitant des secteurs, très typiques de cette région, sont clairement visibles sur l'échantillon de Libramont, mais moins sur celui de Bertrix.

Photographies F. Hatert; L = 5 mm.

### **3.23. Gypse, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$**

Le gypse est un produit d'altération des films de pyrite qui tapissent des diaclases de certaines roches de la carrière, et on l'observe parfois en jolis agrégats de cristaux millimétriques incolores (Figure 30) ou teintés en brun par des oxydes de fer. Étant légèrement soluble dans l'eau, il est rapidement lessivé et, à sa place, on n'observe généralement plus que quelques reliques de cristaux constituées de fragiles pellicules brunes d'oxyde de fer. Le gypse, identifié par diffraction des rayons X, ne s'observe qu'assez rarement à Bertrix ; il est parfois associé à des petits globules jaunes de natrojarosite.



Figure 30 : Gypse de néoformation de Bertrix. L = 7 mm (Photo P. Chollet).

### 3.24. Heulandite-Ca, $(Ca,Na,K)_5(Si_{27}Al)_9O_{72}.2H_2O$

L'observation à la loupe binoculaire de placages microcristallins récoltés au niveau N-2 dans la partie sud-est de la carrière montre des associations de petits cristaux incolores avec un éclat perlé (Figure 31A). Les analyses par diffraction des rayons X fournissent des raies de diffraction en très bon accord avec celles de la heulandite de Mossyrock Dam, Levis Co, Washington, USA (JCPDS 41-1357) (Tableau 7). À partir de ces données, les paramètres de maille  $a = 17,723$  ;  $b = 17,867(8)$  ;  $c = 7,427(3)$  Å ;  $\beta = 116,46(3)$  ont été calculés.

Les analyses chimiques qualitatives EDS indiquent la présence majoritaire des éléments O, Si, Al et Ca, ainsi que Mg très minoritaire. Na et K ne sont pas observés ; il s'agit donc d'heulandite-Ca, une nouvelle espèce de zéolite pour la Belgique. Les photographies en microscopie électronique à balayage indiquent une dimension des cristaux de l'ordre de 150 microns (Figure 31B), et permettent de déceler la combinaison de formes  $\{100\}$   $\{010\}$   $\{001\}$   $\{\bar{2}01\}$  (Figure 31C).

Des cristaux isolés de heulandite-Ca, pouvant atteindre 500 microns de longueur, ont également été observés sur de l'*adulaire* microcristallin, avec calcite et quelques cristaux violacés de calcioancylite-(Nd).

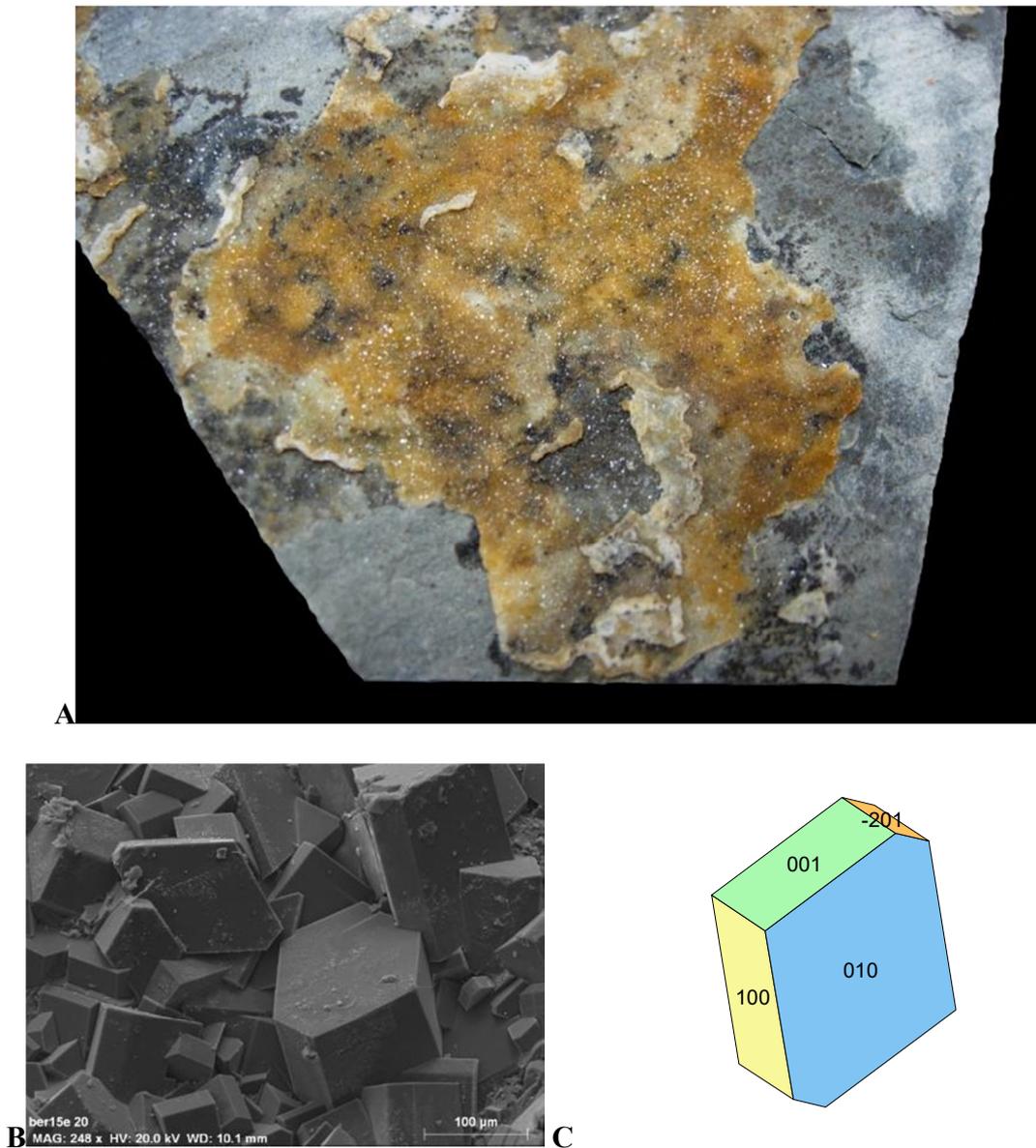
Tableau 7 : Dépouillement du radiogramme de poudre de la heulandite de Bertrix, et comparaison avec la heulandite de Mossyrock, Washington (USA)

Heulandite-Ca Bertrix		Heulandite* Washington, USA	
<i>d</i> (Å)	I/I <sub>0</sub> (%)	<i>d</i> (Å)	I/I <sub>0</sub> (%)
8,894	100	8,96	100
7,912	13,7	7,94	12
6,786	8,5	6,81	6
6,650	9,3	6,65	5
5,930	3,7	5,94	4
-	-	5,59	3
5,341	6	5,33	7
5,255	17,9	5,26	10
-	-	5,12	16
5,099	27,8	5,08	14
4,653	23,3	4,65	32
4,450	6,8	4,47	5
4,368	14,8	4,37	9
4,251	6,8		
	quartz		
3,972	59,3	3,98	65
3,928	19,1		
3,886	22	3,897	43
3,827	4,9	3,843	11
-	-	3,735	9
3,709	7,1	3,717	9
3,565	10	3,564	9
3,477	7,3	3,479	8
3,433	21,6	3,429	21
3,404	16	3,405	15

Heulandite-Ca Bertrix		Heulandite* Washington, USA	
<i>d</i> (Å)	I/I <sub>0</sub> (%)	<i>d</i> (Å)	I/I <sub>0</sub> (%)
3,337	31	3,325	7
	+ quartz		
3,178	21,4	3,181	19
3,126	15,6	3,125	22
3,075	6	3,075	12
3,040	5,8	2,992	29
2,965	49,5	2,972	91
-	-	2,890	4
2,800	33,4	2,806	23
2,729	15		
2,719	16,2	2,725	20
2,677	3	2,667	7
2,563	5	2,527	5
2,493	4,8	2,486	6
-	-	2,458	7
2,439	7,3	2,434	10
2,385	2		
2,360	6	2,374	5
2,344	1,9		
2,278	3	2,296	5
2,236	4,25	2,229	9
2,119	3,2	2,180	5
2,091	7,7	2,088	4
-	-	2,075	3
2,022	4	2,019	4
1,961	6,4	1,960	9

Diffractomètre Phillips, radiation FeK $\alpha$

\* JCPDS 41-1357, heulandite de Mossirock Dam,  
Levis county, Washington, USA



**Figure 31** : Heulandite-Ca de Bertrix. (A) Enduits microcristallins à éclat perlé, L = 10 cm (Photo M. Blondieau). (B) Échantillon BER-15e, photographie au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires. (C) Morphologie de la heulandite-Ca de Bertrix.

### 3.25. Ilménite, $\text{Fe}^{2+}\text{TiO}_3$

De petites paillettes noires millimétriques sont observées en grand nombre dans certains phyllades affleurant dans les niveaux supérieurs de la carrière. Visuellement, on pourrait les confondre avec des cristaux de chloritoïde mais il s'agit bien d'ilménite, ce qui a été confirmé par diffraction des rayons X. L'ilménite est également observée dans des veines de quartz au niveau N-3 de la partie nord de la carrière. Elle s'y présente en grandes lamelles contournées noires d'épaisseur millimétrique avec éclat métallique, en association avec des plages d'altération brunes de « leucoxène » (Figure 32). Les

analyses par diffraction des rayons X indiquent que les plages noires sont de l'ilménite et les plages brunes sont principalement constituées de rutile avec anatase minoritaire. Hatert & Theye (2005) indiquent que l'ilménite de Bertrix montre une teneur significative en manganèse (plus de 5,19 % en poids MnO).



**Figure32** : Ilménite (noire) et rutile (brun) de Bertrix, L = 11 mm (Photo P. Chollet).

### **3.26. Laumontite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$**

La laumontite, déjà signalée par Antun (1953) dans la Massif de Serpont, non loin de Libramont, est à nouveau signalée par Hatert (1998) dans la carrière de la Flèche de Bertrix. Cet auteur indique que la laumontite s'y présente exclusivement en efflorescences fibroradiées blanches à blanc crème, parfois nacrées, qui tapissent les diaclases de la roche. Leur diamètre peut atteindre 4 cm et leur épaisseur 5 mm.

La laumontite est une zéolite fréquente dans les parties sud et sud-est au niveau N-2 de la carrière, où elle se présente le plus souvent en veinules de peu d'épaisseur dans des diaclases (Figure 33A), et plus rarement en cristaux dans de petites cavités (Figures 33B, C). La laumontite est malheureusement un minéral peu stable qui, en perdant une partie de son eau de cristallisation, perd son bel éclat nacré, devient blanc mat et surtout devient très fragile. Au moindre choc, elle se brise et se réduit alors en poudre. Son identification est à nouveau confirmée à Bertrix par diffraction des rayons X.

Hatert (1998) considère que la laumontite a pu se former par déstabilisation du plagioclase de la roche entraînant d'une part la cristallisation d'albite dans les veines de quartz et, d'autre part, de laumontite dans les diaclases. Hatert & Theye (2005) la signalent associée à la chamosite (chlorite),

la calcite et la prehnite. On peut également l'observer dans des joints à adulaire ou en association avec des croûtes épaisses de montmorillonite.



**Figure 33 :** Laumontite de Bertrix. (A) Échantillon typique observé dans les diaclases (L=8cm). (B) Echantillon montrant des cristaux dans de minuscules cavités. Le grand cristal de gauche mesure plus de 2 cm (Photos M. Blondieau). (C) Cristaux bien formés de laumontite dans une petite cavité, L = 10,7 mm (Photo P. Chollet).

### **3.27. Malachite, $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$**

La malachite, observée visuellement avec chalcoppyrite, est confirmée par diffraction des rayons X. La malachite est toutefois assez rare à Bertrix, et les nombreuses taches vertes au voisinage de la chalcoppyrite en voie d'altération se sont avérées être bien souvent de l'agardite-(Y) ou du chrysocolle.

### **3.28. Marcasite, $\text{FeS}_2$**

La marcasite est identifiée visuellement et par diffraction des rayons X dans des petits joints de la partie ouest de la carrière avec cristaux de pyrite, stilbite-Ca et calcite (Figure 34). Des cristaux déjà largement transformés en goethite sont également observés avec les associations synchisite-(Ce)/bastnäsite-(Ce), lesquelles ne présentent plus alors leur belle couleur rose saumon mais une teinte plus brun-rouge voire « rouille ».

### **3.29. Montmorillonite, $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$**

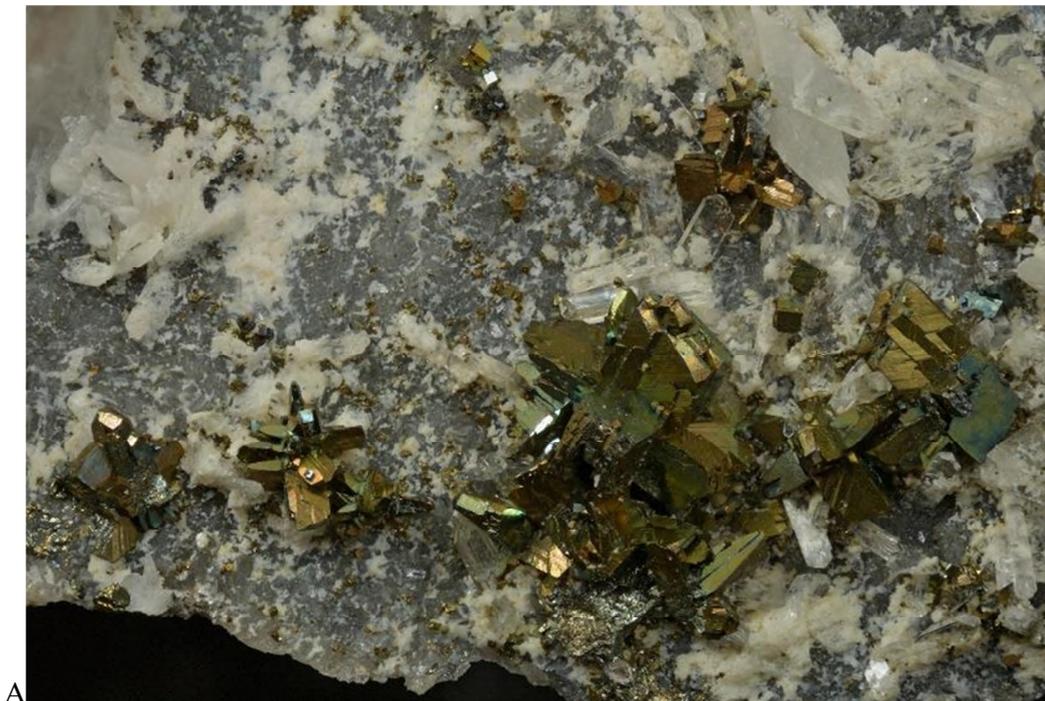
Un matériel d'éclat cireux, gris veiné de vert ou vert foncé voire presque noir, est observé en abondance sous la pumpellyite-(Al) mais aussi sous la laumontite. Parfois, il se présente en petites boules (Figure 35A) ou en pseudomorphoses de cristaux dont la morphologie suggère qu'il aurait pu s'agir de prehnite (Figures 35B et 36). Les analyses par diffraction des rayons X de ce matériel fournissent des raies très proches de celles de la montmorillonite, avec un pic très intense à un peu plus de 15 Å (Tableau 8).

Afin de confirmer l'identification, d'autres analyses par diffraction des rayons X ont été menées avec un diffractomètre Bruker utilisant un tube au cuivre grâce auquel il est possible d'observer des pics avec une faible valeur de  $d$  dont celui à 1,50 Å qui indique qu'il s'agit d'un minéral dioctaédrique. Par ailleurs, après traitement à l'éthylène glycol, le pic situé à environ 15 Å se déplace à environ 17 Å, ce qui prouve qu'il s'agit d'un minéral du groupe de la smectite. Il s'agit donc de montmorillonite ou de beidellite. Les analyses chimiques qualitatives de ce matériel, réalisées par EDS, indiquent la présence majoritaire des éléments O, Si et Al, ainsi que Mg, Fe et Ca en moindres proportions. La présence de magnésium exclut la beidellite et confirme donc la montmorillonite.

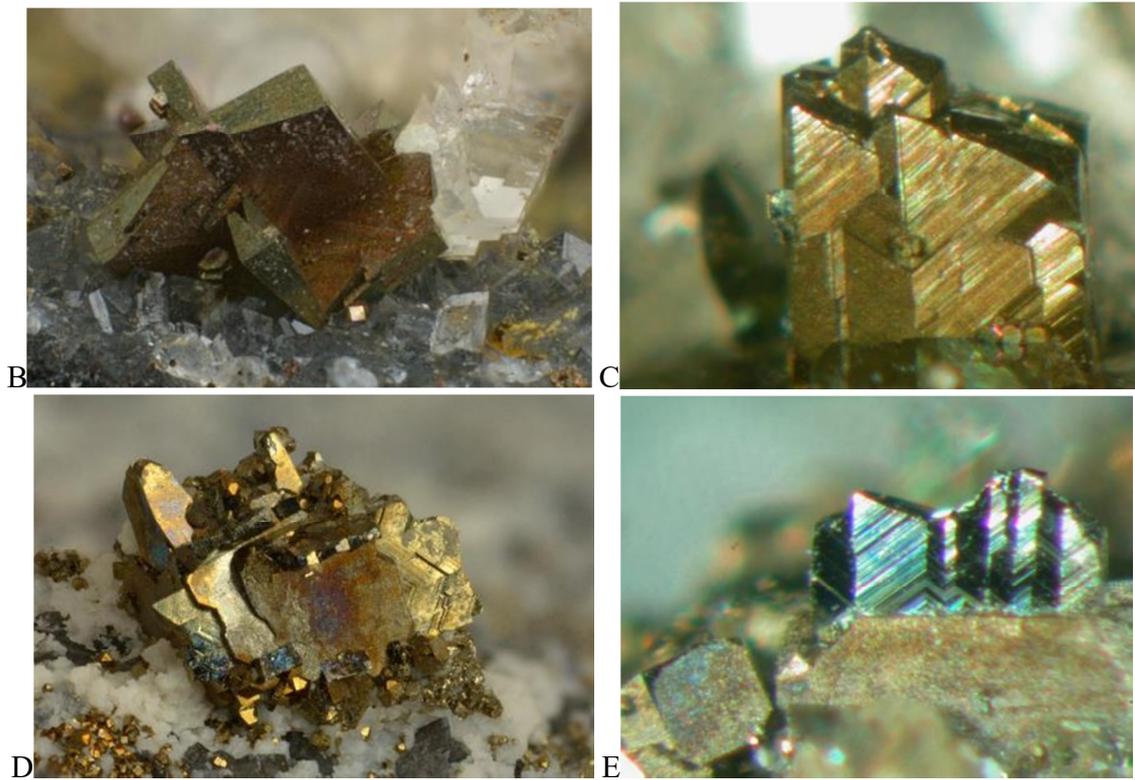
**Tableau 8** : Dépouillement du radiogramme de poudre de l'échantillon argileux gris vert de Bertrix (Diffractomètre Philips, radiation FeK $\alpha$ ), et comparaison avec la montmorillonite de Norvège (JCPDS 13-135).

<b>Matériel argileux gris vert de Bertrix</b>		<b>Montmorillonite JCPDS 13-135*</b>	
<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>0</sub> (%)	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>0</sub> (%)
<b>15,35</b>	<b>100</b>	<b>15,0</b>	<b>100</b>
7,11	11	-	-
5,06	8	<b>5,01</b>	<b>60</b>
<b>4,49</b>	<b>55</b>	<b>4,50</b>	<b>80</b>
-	-	3,77	20
3,54	10	3,50	10
3,34	7	3,30	10
3,03	16	3,02	60
2,57	18	2,58	40
-	-	2,50	40
-	-	2,26	10
2,09	7	2,15	10
-	-	1,88	10
1,76	2	-	-
1,69	4	1,70	30

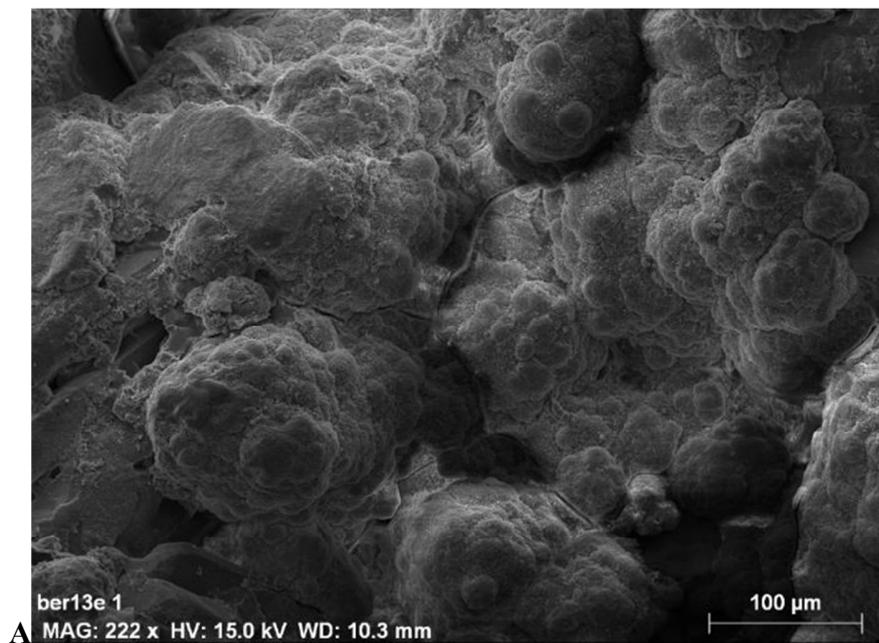
\* Fiche JCPDS 13-135, montmorillonite de Skyrvedalen, Hemsedal, Norvège.

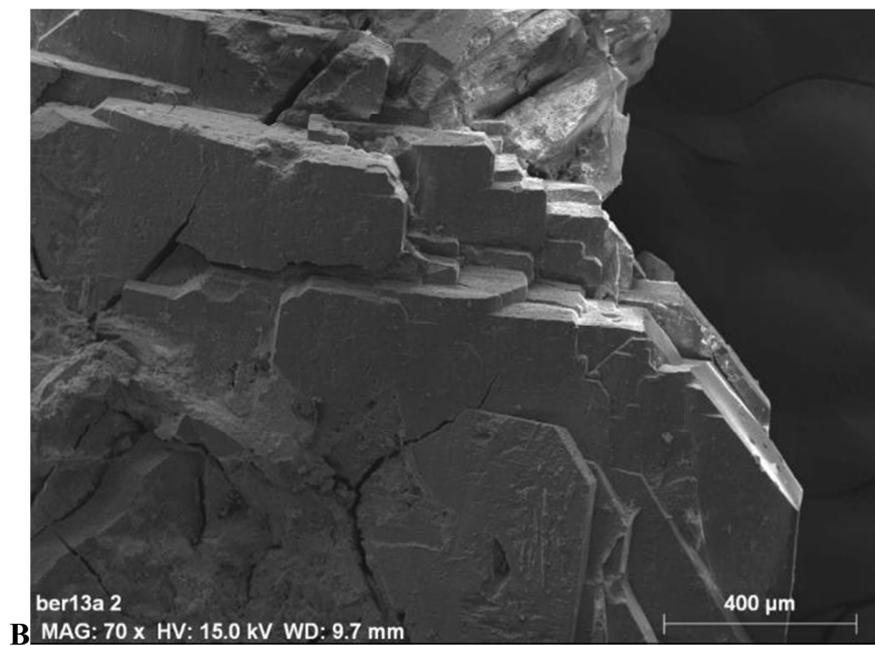


A



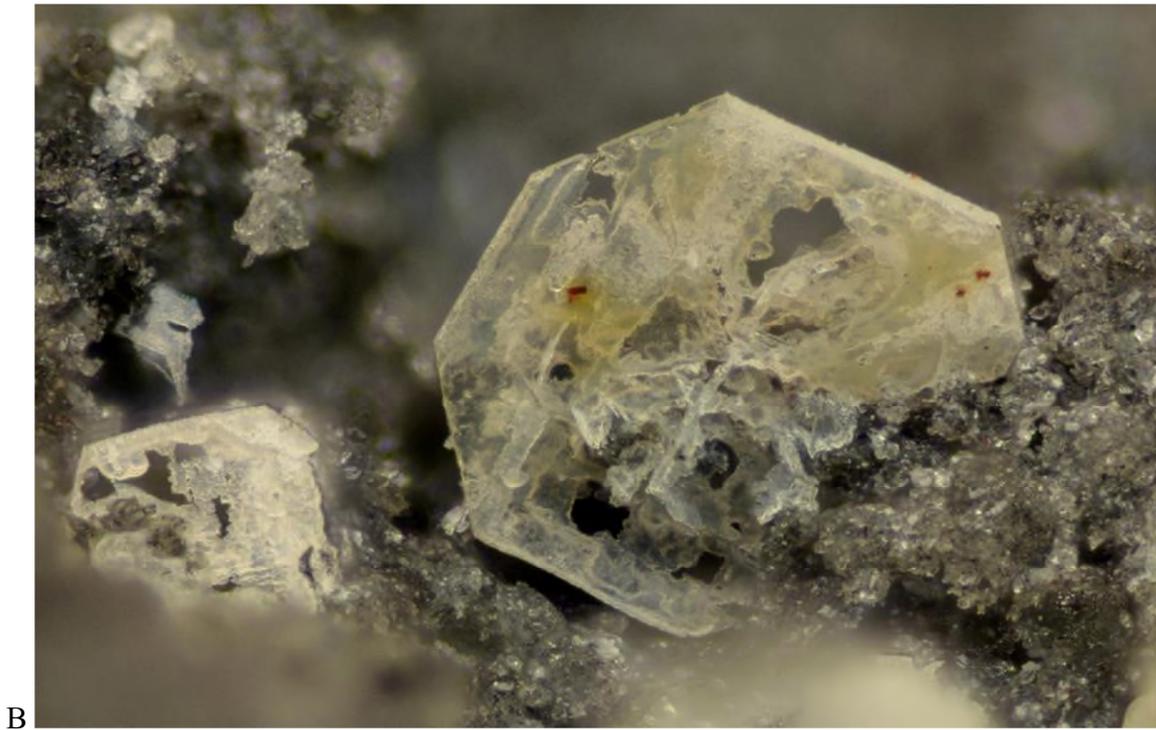
**Figure 34 :** Marcasite de Bertrix. (A) L = 10,20 mm ; (B) L=1,35 mm ; (C) = 1 mm. Marcasite en épitaxie sur pyrite de Bertrix (D) L=1,95 mm ; (E) L = 1 mm ; (A, B et D) Photos P. Chollet ; (C et E) Photo M. Blondieau.





**Figure 35 :** Montmorillonite de Bertrix en globules, échantillon BER-13e (A) et en pseudomorphose d'un cristal de prehnite probable, échantillon BER-13a (B). Photographies au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires.





**Figure 36** : Montmorillonite de Bertrix en pseudomorphose de cristaux de prehnite probable.  
(A) L = 11 mm ; (B) L = 2,60 mm (Photos P. Chollet).

### **3.30. Muscovite**

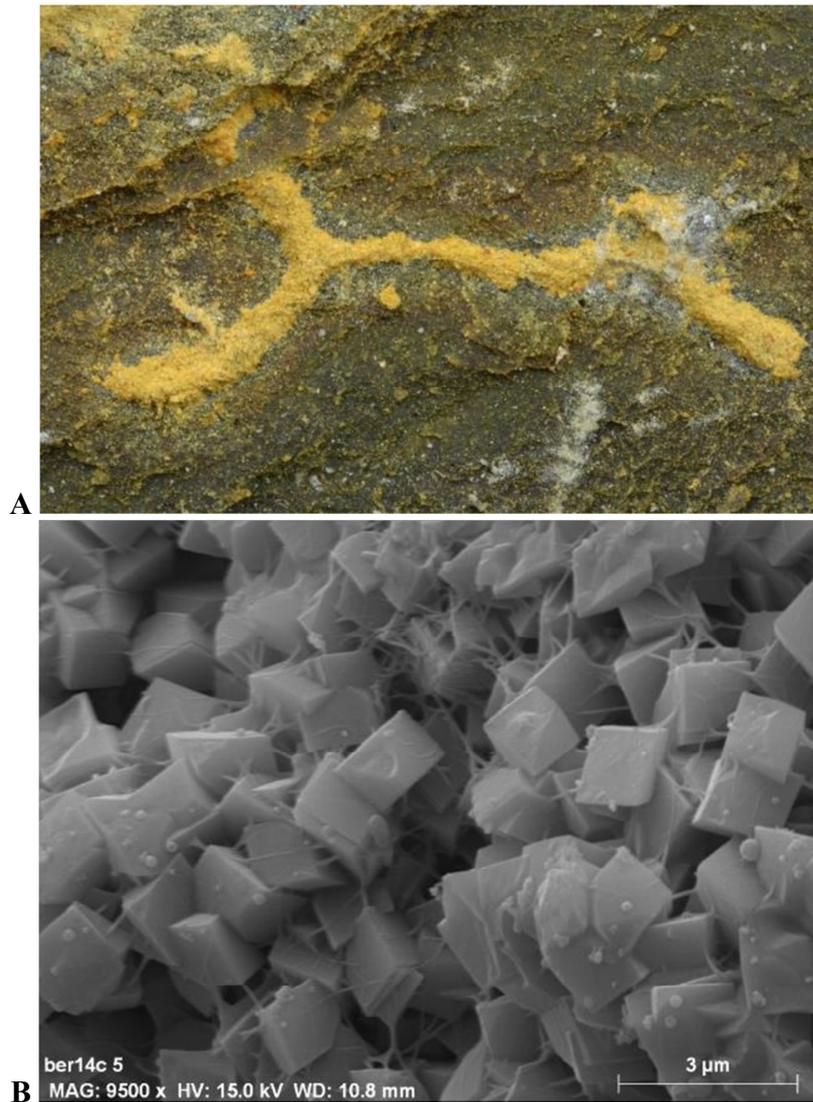
Hatert & Theye (2005) signalent la muscovite dans les roches encaissant les veines de quartz de la carrière de la Flèche de Bertrix. Dans cette paragenèse, on observe aussi la chlorite, l'ilménite et l'albite. Les cristaux, de quelques millimètres seulement, sont assez rares (Figure 37). L'identification du minéral est confirmée par diffraction des rayons X.



**Figure. 37 :** Muscovite de Bertrix, (A) L = 2,75 mm; (B) L = 2,50 mm (Photos P. Chollet).

### 3.31. Natrojarosite, $\text{NaFe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$

De petites boules jaunes, accompagnant les bouquets de cristaux de gypse, ont été visuellement identifiées comme un minéral appartenant au groupe de la jarosite, ce qui est confirmé par diffraction des rayons X. Les photographies au microscope électronique à balayage indiquent qu'elles sont constituées de cristaux rhomboédriques de quelques microns seulement, reliés par des filaments de goethite (Figure 38B). Les analyses chimiques qualitatives par EDS ont montré la présence des éléments O, Fe, S et Na, indiquant que ce minéral est constitué de natrojarosite.

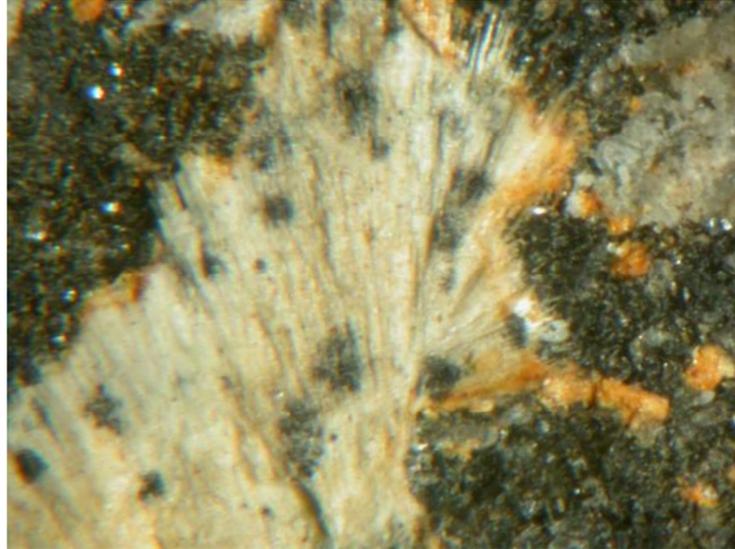


**Figure 38 :** Natrojarosite de Bertrix. (A) Croûte microcristalline, L = 5,9 mm (Photo P. Chollet). (B) Sous fort grossissement, minuscules cristaux rhomboédriques reliés par des filaments de goéthite. Échantillon BER-14c, photographie au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires.

### 3.32. Natrolite, $\text{Na}_2(\text{Si}_3\text{Al}_2)\text{O}_{10}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Un minéral du groupe de la natrolite est signalé par Hatert & Theye (2005) qui le décrivent comme un agrégat fibro-radié d'un cm de diamètre, constitué de cristaux aciculaires blancs. Une analyse par diffraction des rayons X sur monocristal montre que ces fibres sont constituées de natrolite sur laquelle serait venue grandir de manière épitaxiale la tétranatrolite (Hatert & Theye, 2005). Selon ces auteurs, les réflexions observées, ainsi que la maille cristalline, correspondent bien à la tétranatrolite qui doit son nom à sa symétrie tétragonale et à sa similitude avec la natrolite. Aujourd'hui, cette espèce est discréditée et la tétranatrolite doit être regardée comme une variété de

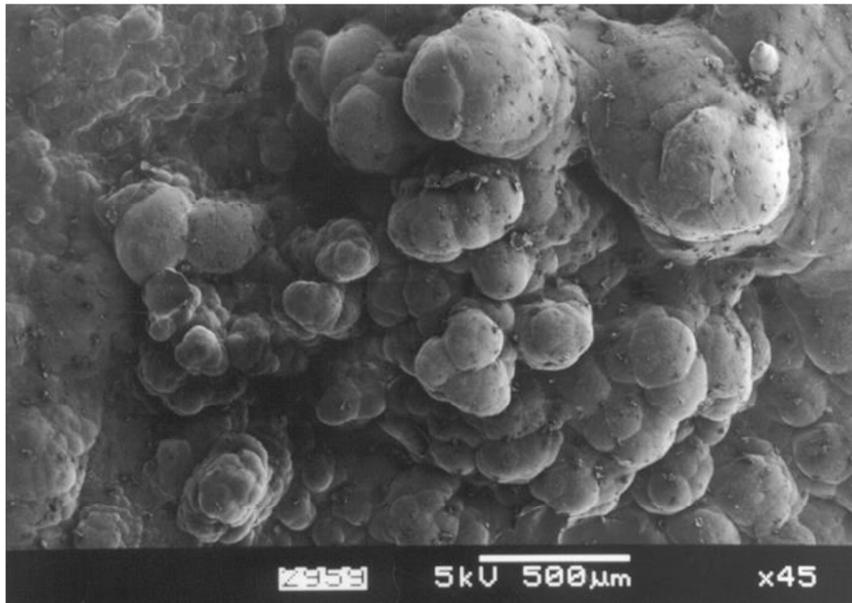
natrolite. L'échantillon analysé avait été trouvé par Michel Houssa dans une toute petite poche au nord-ouest de la carrière, le long de la rampe entre les niveaux N-1 et N-2 (Figure 39). Le minéral n'a jamais été retrouvé depuis.



**Figure39** : Agrégat fibroradié de natrolite (variété tétranatrolite) de Bertrix. L = 3 cm, photo M. Blondieau.

### 3.33. Opale, $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Dans la partie est de la carrière, au niveau N-1, on a pu observer un minéral vitreux incolore à blanc se présentant en croûte mamelonnée d'épaisseur millimétrique (Figure 40). Visuellement identifié comme allophane probable, l'analyse par diffraction des rayons X indique qu'il s'agit bien d'un minéral amorphe mais dont le diffractogramme ne correspond pas à celui de l'allophane. Les analyses chimiques qualitatives par EDS indiquent O et Si très majoritaires. Il s'agit donc de silice amorphe et probablement d'opale.



**Figure 40** : Opale mamelonnée de Bertrix. Photographie au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires.

### 3.34. Plagioclases : albite, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ – anorthite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

Dans la carrière de Bertrix, l'albite est fréquente dans les veines de quartz, souvent dans les parties en contact avec la roche où elle forme des joints d'épaisseur variant entre 5 mm et plusieurs centimètres (Figure 41). Un examen visuel semble montrer la présence de cristaux imbriqués les uns dans les autres et englobés dans le quartz. Le minéral, dont la couleur varie du blanc au rose pâle, est identifié par diffraction X.

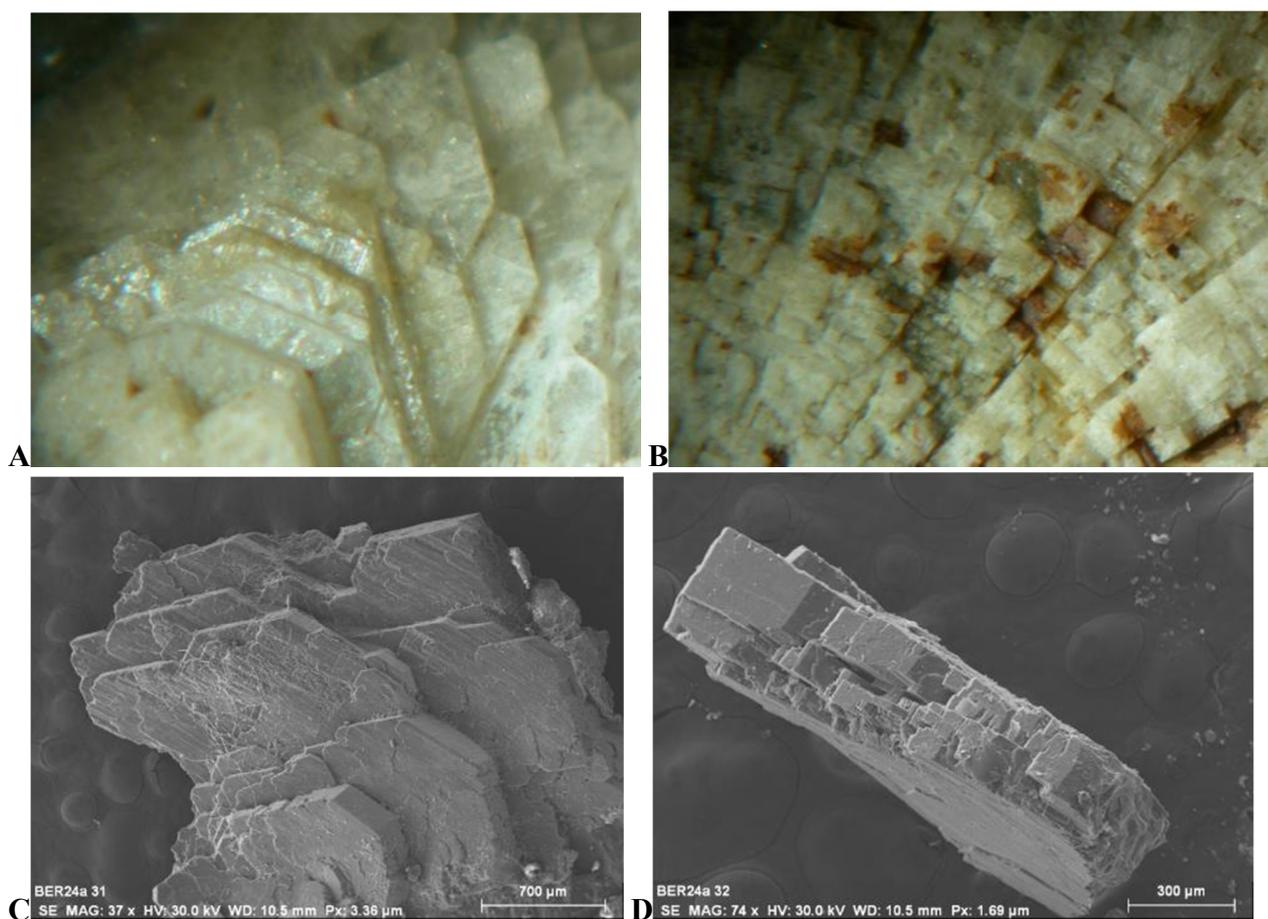
Les plagioclases sont connus dans la zone de Bastogne-Libramont-Bertrix comme constituant essentiel des roches métamorphiques. Hatert & Theye (2005) ont réalisé des analyses chimiques à la microsonde électronique de ces minéraux, et distinguent deux populations de plagioclases à Bertrix: un plagioclase pauvre en calcium (~ 5 % d'anorthite) et un plagioclase riche en calcium (~ 25 à 30 % d'anorthite). Hatert (1998) suggère un enrichissement en albite au cours de la phase métamorphique rétrograde lors de la formation de la laumontite : "*La déstabilisation du plagioclase de la roche pourrait ainsi conduire à la cristallisation d'albite dans les veines de quartz et de laumontite dans les diaclases selon la réaction plagioclase + quartz + eau → laumontite + albite.*" Ceci explique la formation d'albite presque pure dans les veines de quartz de Bertrix (Piscart, 2003).



**Figure 41** : Albite rose aux épontes d'une petite veine de quartz en contact avec la roche de Bertrix, L = 6 cm, photo M. Blondieau.

### **3.35. Prehnite, $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$**

La prehnite de Bertrix, signalée par Hatert & Theye (2005), est associée à la laumontite en agrégats constitués de cristaux tabulaires blanc tirant vers le brun, pouvant atteindre une longueur de 5 mm (Figure 42). La prehnite n'est pas fréquente à Bertrix et les meilleurs échantillons ont été récoltés au niveau N-2 dans la partie nord-ouest de la carrière, où elle se présentait en grande plages pluricentimétriques constituées par l'association de nombreux cristaux blanc-verdâtres. Les minéraux associés sont l'analcime en plages vitreuses, la calcite, la clinozoïzite et la pumpellyite-(Al). Le minéral est confirmé par diffraction des rayons X et par des analyses chimiques qualitatives EDS qui mettent en évidence les seuls éléments O, Si, Al et Ca.



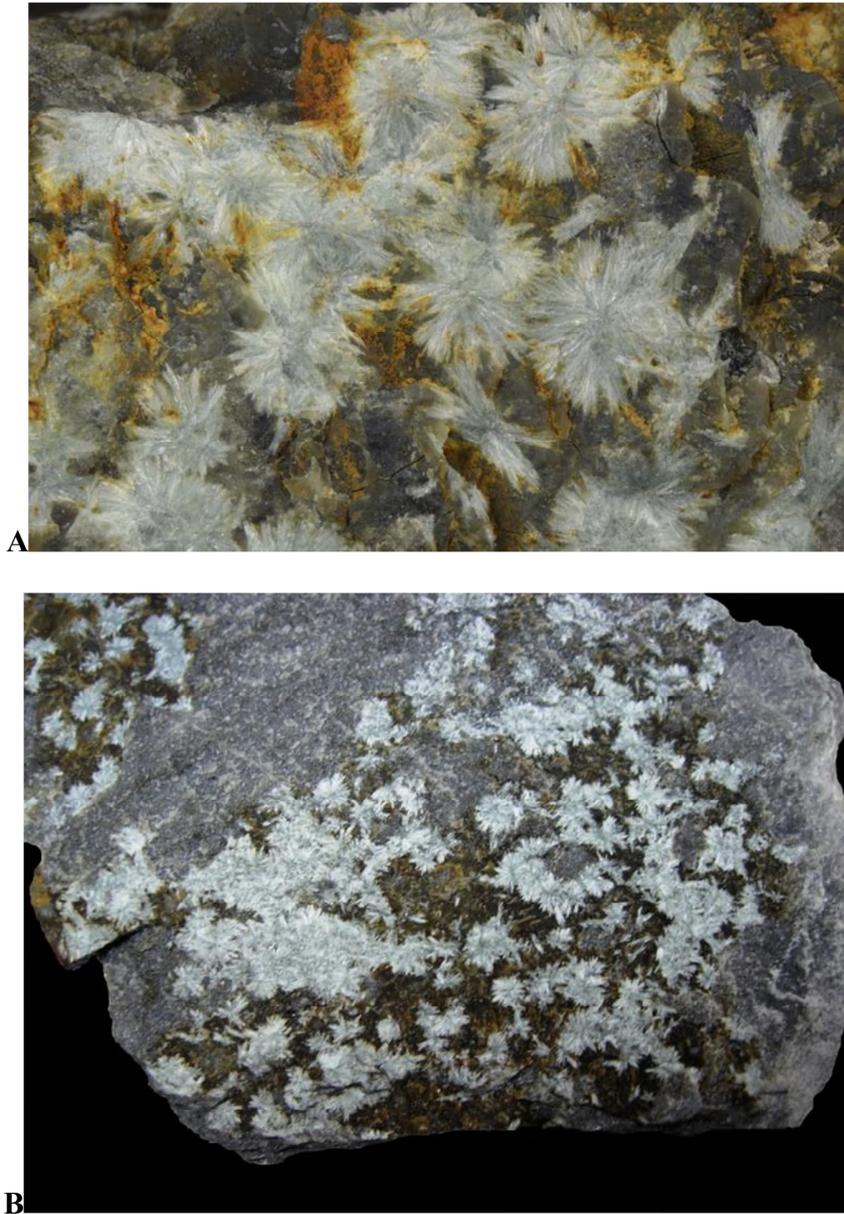
**Figure 42 :** Prehnite de Bertrix. (A) L = 5 mm, (B) L = 1 cm. (A et B) Photos M. Blondieau. (C et D) Échantillon BER-24, photographies au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires.

### 3.36. Pumpellyite-(Al), $\text{Ca}_2\text{Al}_3(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)(\text{OH},\text{O})_2\cdot\text{H}_2\text{O}$

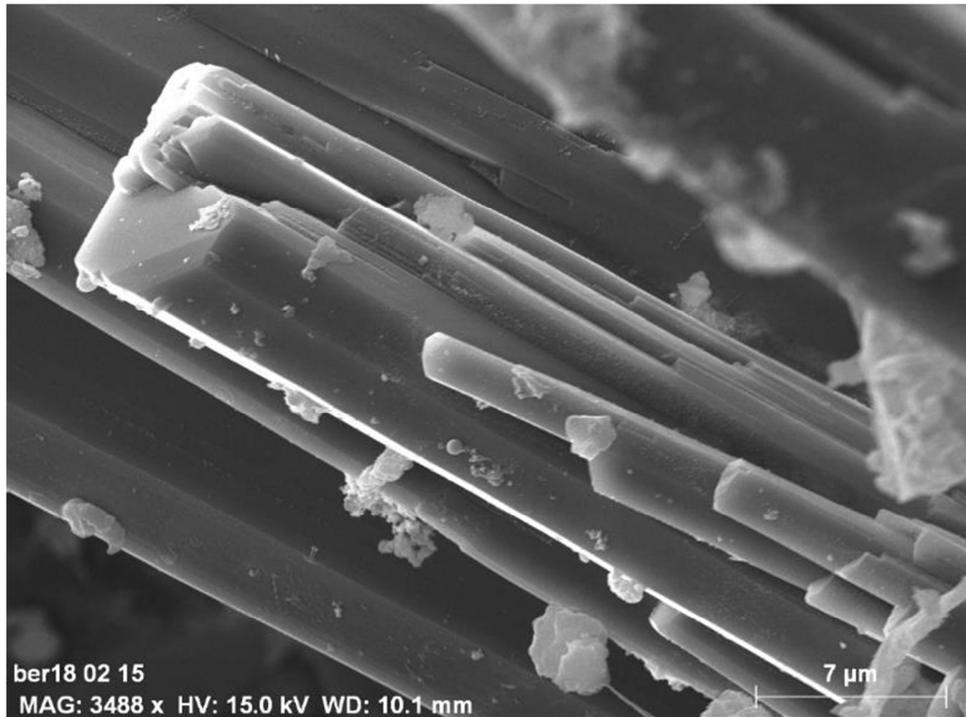
Une pumpellyite riche en aluminium avait déjà été observée et analysée dans des cornéites du Massif de Serpont par de Bethune (1977). Plus tard, Hatert & Theye (2005) décrivent ce minéral à la carrière de la Flèche de Bertrix, où ils en distinguent trois générations. La première se trouve dans la roche et dans les minces veines avec calcite qui la remplace partiellement. La seconde génération s'est formée dans une fissure ouverte qui s'est comblée avec de l'orthose, de la calcite et des débris de roche. La troisième génération est associée à un phyllosilicate brunâtre (= montmorillonite) et à la calcite. Les analyses à la microsonde électronique indiquent une dominance nette de l'aluminium par rapport au fer (25,63 % en poids d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  et seulement 4,97 % en poids de FeO). Cette pumpellyite riche en aluminium est une nouvelle espèce minérale, baptisée "pumpellyite-(Al)" par Hatert *et al.* (2007).

Le minéral se présente en agrégats fibroradiés atteignant un diamètre de 5 mm, et constitués de cristaux aciculaires variant du blanc au vert émeraude (Figure 43A). La pumpellyite-(Al) est localement abondante dans la partie sud-est de la carrière où elle se présente dans des joints généralement très minces, en association avec de la montmorillonite vert foncé à noire (Figure 43B). Il s'agit de la troisième génération signalée par Hatert & Theye (2005). On l'observe aussi en

association avec des grenats rouges et de la *chlorite* dans des veines de quartz des boudins de la partie nord-est de la carrière. Dans la partie nord-ouest de la carrière, elle est observée avec prehnite en gerbes de cristaux aciculaires pouvant montrer, sous très fort grossissement, des terminaisons cristallines, ce qui est peu fréquent (Figure 44).



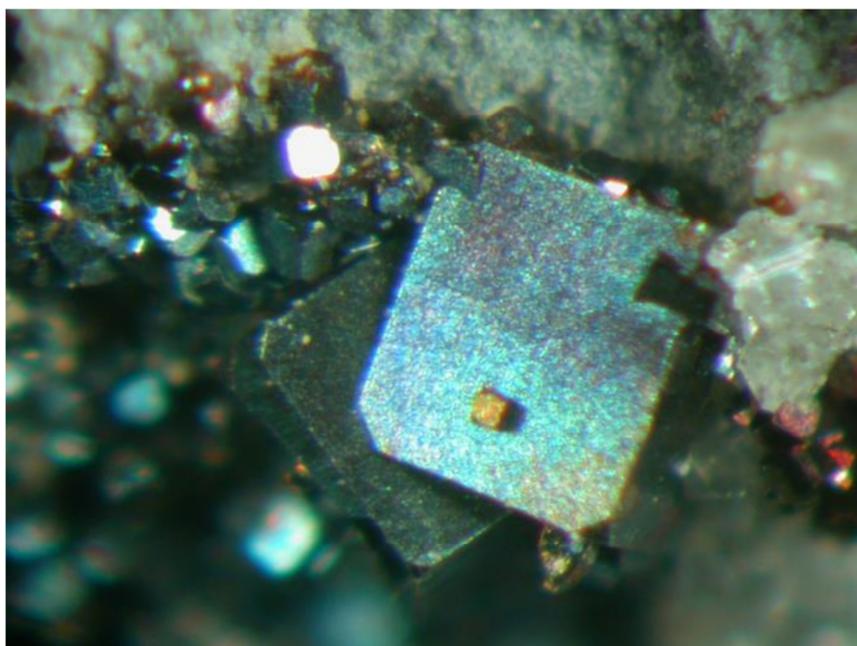
**Figure43** : Pumpellyite-(Al) de Bertrix. (A) Gros plan sur des rosettes. Photo et collection P. Chollet. (B) Agrégats sur plages brun kaki de montmorillonite, L = 6 cm, photo M. Blondieau.



**Figure 44 :** Pumpellyite-(Al) de Bertrix en cristaux montrant quelques faces terminales. Échantillon BER-18, photographie au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires.

### 3.37. Pyrite, FeS<sub>2</sub>

La pyrite est visuellement identifiée comme formant des enduits très minces qui tapissent certaines diaclases de la roche. Une analyse par diffraction des rayons X confirme l'identité du minéral. Cette pyrite est peu stable et s'oxyde rapidement. D'abord, on voit apparaître du gypse avec de la natrojarosite, mais ces espèces disparaissent très rapidement et ne laissent que des enduits d'oxydes de fer bruns. La pyrite est également observée en petits cubes simples ou légèrement tronqués par les faces de l'octaèdre (Figure 45), en association avec la marcasite, la stilbite-Ca et la calcite. Elle forme encore de minuscules cristaux très altérés associés à la synchisite-(Ce)/bastnäsite-(Ce), dont la couleur passe alors insensiblement du rose saumon à l'orange voire au brun rouille.



**Figure 45 :** Pyrite de Bertrix, montrant la combinaison {100} {111}. L = 5 mm, photo M. Blondieau.

### **3.38. Pyromorphite, $Pb_5(PO_4)_3Cl$**

Un minéral vert, formant des cristaux en barillets hexagonaux associés à la galène, est identifié visuellement comme de la pyromorphite ou de la mimétite. Les analyses chimiques qualitatives par EDS indiquent la présence des éléments majoritaires O, Pb et P, ainsi que Ca, Cl et V moins abondants. L'arsenic n'étant pas détecté, il ne s'agit donc pas de mimétite mais bien de pyromorphite. Le calcium et le vanadium, bien que minoritaires par rapport au plomb, semblent indiquer l'existence de solutions solides vers la vanadinite et le phosphohedyphane.

### **3.39. Pyrrhotite, $Fe_7S_8$**

La pyrrhotite se présente à Bertrix en très petits cristaux infra-millimétriques noyés dans la calcite, qui doit être éliminée par attaque acide afin de pouvoir les observer. Les cristaux hexagonaux de couleur bronze (Figure 46), très minces et faiblement magnétiques, ont rapidement fait soupçonner la pyrrhotite qui a été confirmée par diffraction des rayons X. La pyrrhotite est un minéral fréquent dans la région, qui a notamment été observé dans le sondage de Bras, implanté sur une anomalie magnétique (Gulinck *et al.*, 1952). Elle est également décrite dans certains nodules métamorphiques de la région de Libramont, de Bastogne, ainsi qu'en association avec la chalcopryrite dans l'ardoisière de Warmifontaine, non loin de Neufchâteau (Godfroid, 1999).

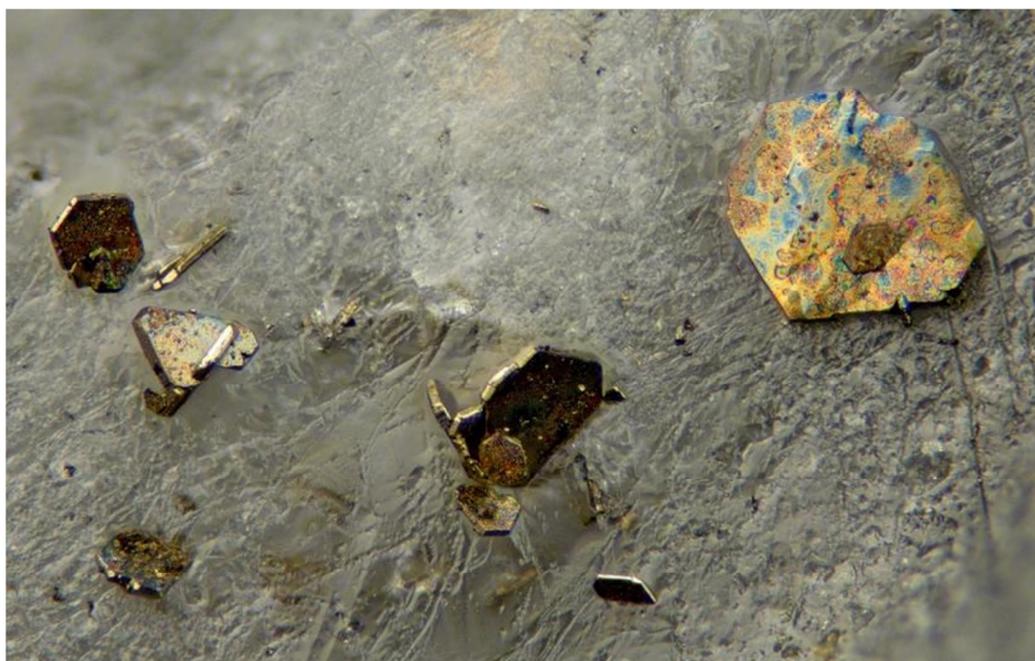


Figure 46 : Pyrrhotite de Bertrix. L = 0,79 mm, photo P. Chollet.

### 3.40. Quartz, $\text{SiO}_2$

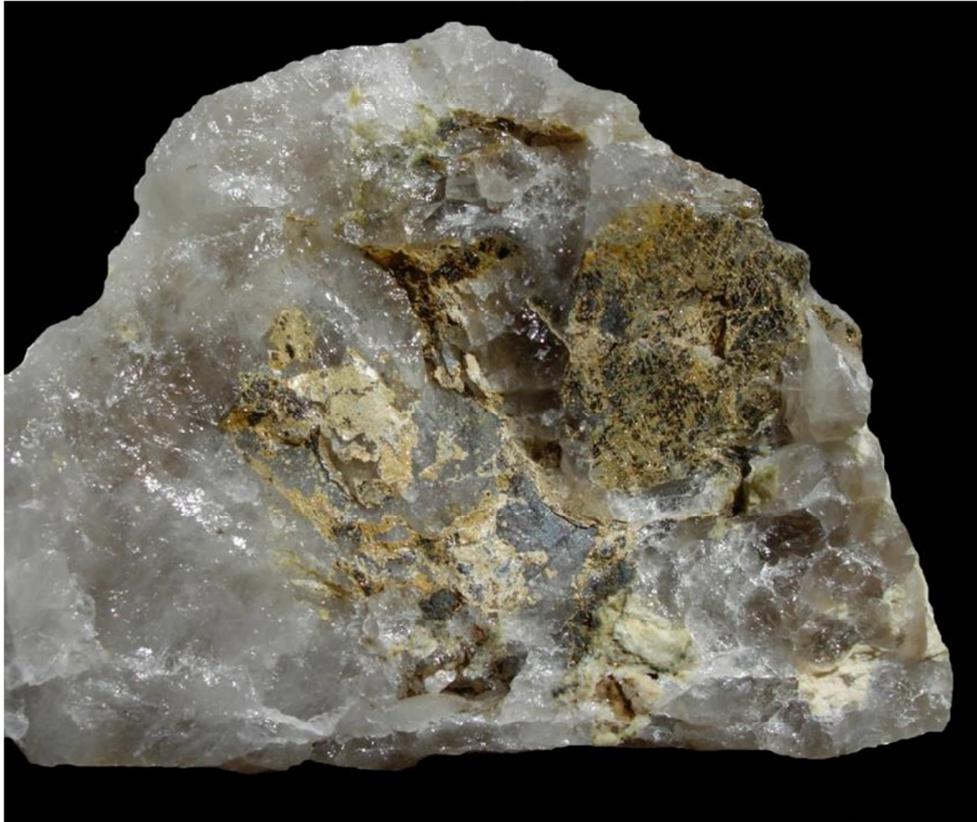
Le quartz laiteux, voire légèrement enfumé, est très abondant à Bertrix où il se présente en veines massives parfois très épaisses dans lesquelles il y a peu de cristaux. Dans les boudins, des cristaux souvent tordus et ne dépassant pas un centimètre sont parfois observés avec de la *chlorite* et de la fluorapatite. De minuscules cristaux limpides d'une taille inférieure à un millimètre sont également observés avec la chamosite, l'anatase et les associations synchisite-(Ce)/bastnäsite-(Ce) de couleur saumon.

### 3.41. Rutile, $\text{TiO}_2$

Le rutile est observé en plages brunes associées à l'ilménite noire dans des veines de quartz du niveau N-3 de la partie nord de la carrière (Figure 47). Très rarement, il s'y présente en cristaux maclés plus rouges (Figure 48). Les analyses par diffraction des rayons X des plages brunes indiquent la présence majoritaire de rutile, associé à de plus faibles quantités d'anatase. Ces deux espèces sont fréquemment associées à l'ilménite en voie d'altération, matériel généralement appelé « *leucoxène* ».

### 3.42. Sphalérite, $(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}$

La sphalérite est identifiée visuellement en minuscules cristaux brun clair à miel, dans des joints à pumpellyite-(Al). Ces cristaux sont peu nombreux et leur taille ne dépasse généralement pas un millimètre. Une analyse par diffraction des rayons X confirme l'identité du minéral.



**Figure 47** : Ilménite noire de Bertrix altérée en « leucoxène » (mélange de rutile et anatase), dans quartz légèrement fumé (Photo M. Blondieau).



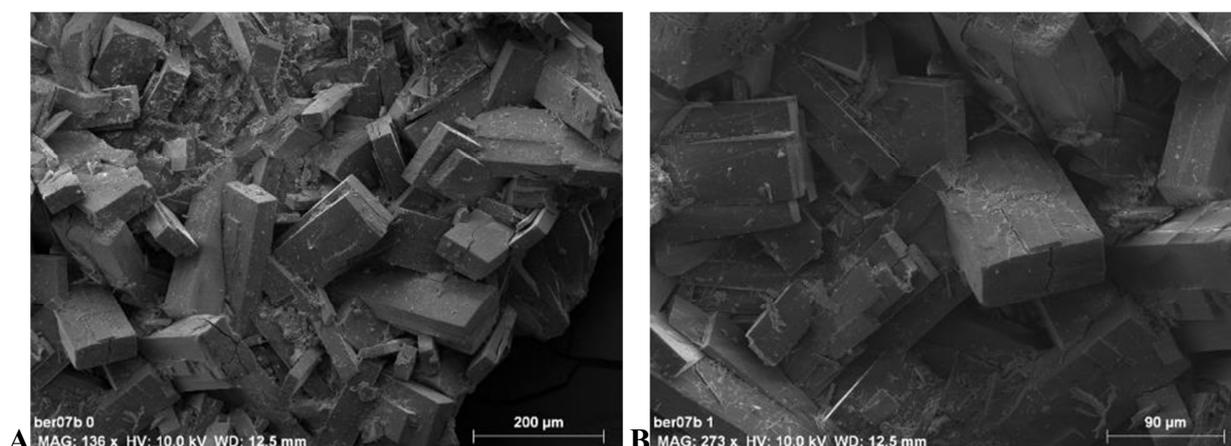
A



**Figure 48** : Rutile de Bertrix en cristaux maclés. (A) Dans une couche de rutile brun microcristallin, L = 5,5 mm. (B) L = 2,45 mm (Photos P. Chollet).

### 3.43. Stellerite, $\text{Ca}_4(\text{Si}_{28}\text{Al}_8)\text{O}_{72}\cdot 28\text{H}_2\text{O}$

Des cristaux orthorhombiques incolores atteignant 200  $\mu\text{m}$  de longueur, et montrant la combinaison simple  $\{100\}\{010\}\{001\}$  (Figure 49), ont été observés avec heulandite-Ca et dans un joint à calcioancylite-(Nd). L'analyse par diffraction des rayons X sur poudre a fourni un diffractogramme proche de celui de la stilbite-Ca ou de la stellerite. Une analyse plus poussée sur monocristal, au diffractomètre à 4 cercles (radiation  $\text{MoK}\alpha$ ), fournit des données structurales semblables à celles de la stellerite, avec les paramètres de maille:  $a = 13,634(1)$  ;  $b = 17,822(2)$  ;  $c = 18,192(2)$  Å (groupe spatial  $Fmmm$ ). Les analyses chimiques qualitatives EDS confirment la présence des éléments O, Si, Al et Ca, ainsi que l'absence de Na. La stellerite est une nouvelle espèce de zéolite pour la Belgique.



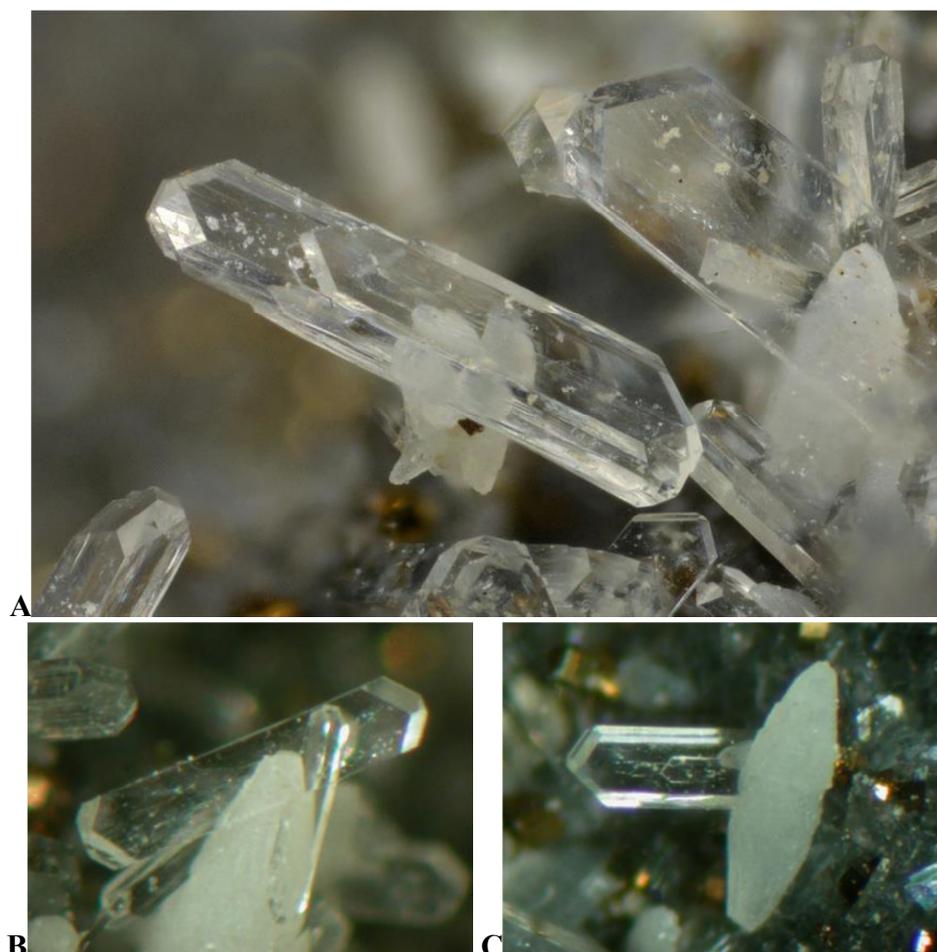
**Figure 49** : Stellerite de Bertrix. (A et B) Échantillon BER-07b, photographies au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires.

### 3.44. Stilbite-Ca, $\text{NaCa}_4(\text{Si}_{27}\text{Al}_9)\text{O}_{72}\cdot 28\text{H}_2\text{O}$

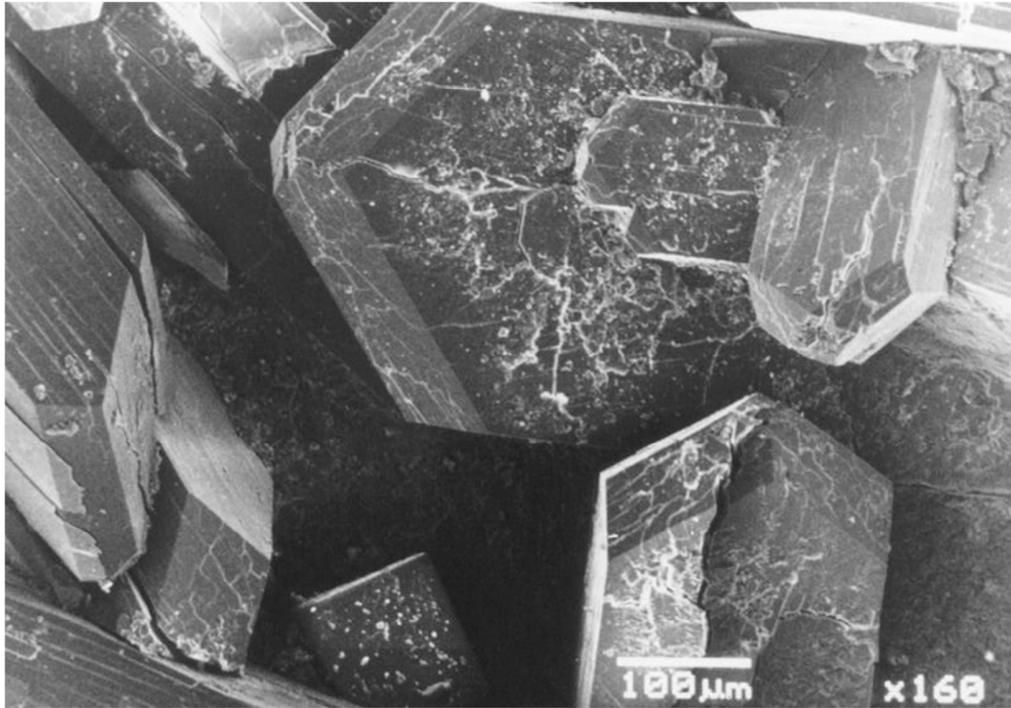
La stilbite-Ca a été décrite à Bertrix en enduits microcristallins tapissant les diaclases de la roche (Hatert, 1998). Cet auteur indique que les cristaux incolores atteignent 1 mm et montrent la combinaison  $\{010\}\{001\}\{110\}\{11\bar{1}\}$ , avec les facettes  $\{20\bar{1}\}$  moins développées.

De très grands placages de plusieurs  $\text{dm}^2$ , avec stilbite-Ca parfois associée à la chabazite-Ca, ont été observés dans un tir de mine en janvier 2003 dans la partie nord-ouest de la carrière au niveau N-2. Ces cristaux sont généralement assez corrodés (Figure 51). De jolis cristaux moins corrodés ont également été observés sur calcite en 2004, dans la partie sud-ouest de la carrière au niveau N-2 (Figure 50).

Le minéral est identifié visuellement et par des analyses chimiques qualitatives EDS, qui montrent la présence majoritaire de Si, Ca et Al, ainsi que Na minoritaire.



**Figure 50** : Stilbite-Ca de Bertrix, sur calcite. (A) L = 1,60 mm, Photo P. Chollet., (B) L = 2 mm, (C) L = 2 mm, (B et C) Photos M. Blondieau.



**Figure 51 :** Stilbite-Ca de Bertrix. Photographie au microscope électronique à balayage, mode électrons secondaires (Photo F. Hatert).

**3.45. Tourmaline : Schorl,  $\text{NaFe}^{2+}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{OH})_4$  – Dravite,  $\text{NaMg}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{OH})_4$**

Hatert & Theye (2005) signalent la présence accessoire d'un minéral du groupe de la tourmaline dans les roches contenant des joints à laumontite ainsi que dans celles contenant la pumpellyite-(Al). Visuellement, quelques petits cristaux prismatiques d'un millimètre au plus ont été observés dans des veines de quartz traversant les boudins. De petits fragments roulés, d'origine détritique, sont également observés dans la pâte de la roche.

**3.46. Zircon,  $\text{ZrSiO}_4$**

Le zircon est signalé comme minéral accessoire des roches contenant la pumpellyite-(Al) (Hatert & Theye, 2005). Ce minéral avait déjà été observé dans le Massif de Serpont par de Bethune (1977), mais nous ne l'avons pas retrouvé dans nos échantillonnages à Bertrix. La mise en évidence de cette espèce nécessite très certainement de réaliser des lames minces à observer avec un microscope polarisant.

#### **4. Conclusions**

La carrière de la flèche de Bertrix se caractérise par la présence de nombreuses zéolites, ce qui est fort rare en Belgique. À côté de 4 espèces déjà signalées (chabazite-Ca, laumontite, natrolite et stilbite-Ca), nos recherches permettent d'en ajouter 3 supplémentaires : analcime, heulandite-Ca et stellerite.

Les observations dans la carrière semblent montrer des associations privilégiées de certaines de ces zéolites avec quelques autres espèces minérales. On distingue notamment des zones à laumontite/prehnite mais aussi des zones à stilbite-Ca/chabazite-Ca. La heulandite-Ca et la stellerite sont parfois associées à la calcioancylite-(Ce) et à la calcioancylite-(Nd). La pumpellyite-(Al), très abondante dans la carrière, ne semble pas associée aux zéolites hormis très rarement à l'analcime (et prehnite). La mise en place de ces associations minérales résulte de processus hydrothermaux ; les zéolites se forment au dépend des roches encaissantes par des processus d'altération sous l'effet de circulations d'eau dans les fissures. L'altération des plagioclases fournit des concentrations élevées en calcium et silicium, ce qui permet la formation de zéolites riches en calcium qui sont accompagnées de silicates de calcium comme la prehnite et l'épidote.

La présence d'amphibolite (roche à hornblende/grenats/plagioclase) dans la région de Libramont (localité située à une dizaine de km de la carrière de Bertrix-Fig 1) a permis à Theye & Fransolet (1993) d'estimer les conditions paroxysmales de mise en place de ces minéralisations à quelques 3 ou 4 kbars et 500°C. Contrairement à Libramont, nous n'avons pas observé d'amphibolites dans la carrière de la Flèche de Bertrix. Par contre, les nombreuses espèces de métamorphisme rétrograde ont permis à Hatert & Theye (2005) de préciser les conditions de pression et de température de leur mise en place : la laumontite se forme entre 200 et 250°C à 2 kbar, et la stilbite-Ca est apparue entre 150 et 200°C. La heulandite-Ca, décrite dans le présent travail, est un minéral stable à basse pression autour de 180°C.

À côté des zéolites et des espèces qui les accompagnent habituellement, la carrière de Bertrix se montre également riche en minéraux de terres rares comme les associations bastnäsité-(Ce)/synchisite-(Ce) mais aussi la calcioancylite-(Ce), la calcioancylite-(Nd) et l'agardite-(Y).

En guise de conclusion, le Tableau 9 reprend toutes les espèces reconnues actuellement dans la carrière de Bertrix. Ce travail permet d'en ajouter 6 supplémentaires, dont trois zéolites et deux minéraux de terres rares. Les espèces mises en « gras » sont nouvelles pour la Belgique.

**Tableau 9** : Espèces minérales de la carrière de la flèche de Bertrix.  
Les noms de solutions solides ou de groupes sont repris en italiques.

<u>Minéral</u>	<u>Formule chimique idéale</u>
<b>Agardite-(Y)</b>	$YCu^{2+}_6(AsO_4)_3(OH)_6 \cdot 3H_2O$
Albite	$Na[AlSi_3O_8]$
<b>Analcime</b>	$Na[AlSi_2O_6] \cdot H_2O$
Anatase	$TiO_2$
<b>Asbolane</b>	$Mn^{4+}(O,OH)_2 \cdot (Co,Ni,Mg,Ca)_x(OH)_{2x} \cdot nH_2O$
Bastnäsité-(Ce)	$Ce(CO_3)F$
<i>Biotite</i>	$(K,NH_4)(Fe^{2+},Mg)_3[Si_3AlO_{10}](OH)_2$
Calcioancylite-(Ce)	$CaCe_3(CO_3)_4(OH)_3 \cdot H_2O$
<b>Calcioancylite-(Nd)</b>	$CaNd_3(CO_3)_4(OH)_3 \cdot H_2O$
Calcite	$CaCO_3$
Cérusite	$PbCO_3$
Chabazite-Ca	$Ca_2[Al_4Si_8O_{24}] \cdot 13H_2O$
Chalcopyrite	$CuFeS_2$
Chamosite	$(Fe^{2+},Mg)_5Al[Si_3AlO_{10}](OH)_8$
Chrysocolle	$(Cu_{2-x}Al_x)H_{2-x}Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$
<b>Clinoclase</b>	$Cu_3(AsO_4)(OH)_3$
Clinozoisite	$Ca_2Al_3[Si_2O_7][SiO_4]O(OH)$
Covellite	$CuS$
Fluorapatite	$Ca_5(PO_4)_3F$
Galène	$PbS$
Goethite	$FeO(OH)$
<i>Grenats</i>	$(Fe^{2+},Mn^{2+},Ca)_3Al_2[SiO_4]_3$
Gypse	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Hématite	$Fe_2O_3$
<b>Heulandite-Ca</b>	$(Ca,Na,K)_5(Si_{27}Al_9)O_{72} \cdot 2H_2O$
Ilménite	$Fe^{2+}Ti^{4+}O_3$
Laumontite	$CaAl_2Si_4O_{12} \cdot 4H_2O$
Malachite	$Cu_2(CO_3)(OH)_2$
Marcasite	$FeS_2$
Microcline	$K[AlSi_3O_8]$
Montmorillonite	$(Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$
Natrojarosite	$NaFe^{3+}_3(SO_4)_2(OH)_6$
Natrolite	$Na_2(Si_3Al_2)O_{10} \cdot 2H_2O$
Opale	$SiO_2 \cdot nH_2O$
Orthose	$K[AlSi_3O_8]$
Prehnite	$Ca_2Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
Pumpellyite-(Al)	$Ca_2Al_3(Si_2O_7)(SiO_4)(OH,O)_2 \cdot H_2O$
Pyrite	$FeS_2$
Pyromorphite	$Pb_5(PO_4)_3Cl$
Pyrrhotite	$Fe_7S_8$
Quartz	$SiO_2$
Rutile	$TiO_2$
Sphalérite	$(Zn,Fe)S$
<b>Stellerite</b>	$Ca_4(Si_{28}Al_8)O_{72} \cdot 28H_2O$
Stilbite-Ca	$NaCa_4(Si_{27}Al_9)O_{72} \cdot 28H_2O$
Synchisite-Ce	$CaCe(CO_3)_2F$
<i>Tourmaline</i>	$Na(Fe^{2+},Mg)_3Al_6(BO_3)_3[Si_6O_{18}](OH)_4$
Zircon	$ZrSiO_4$

## 5. Remerciements

Nous remercions chaleureusement Pascal Barthelemy, le directeur de la carrière de la flèche, qui nous a toujours donné l'autorisation de faire des recherches minéralogiques dans son site d'exploitation. Nous souhaitons également remercier Pascal Chollet qui, comme toujours, a réalisé avec brio les magnifiques photos des fort petits échantillons de Bertrix. Nos remerciements vont aussi à Philippe Compère pour son aide très précieuse lors de l'utilisation du microscope électronique à balayage ainsi qu'à Fabrice Dal Bo et François Fontaine qui nous ont aidés à identifier respectivement la stellerite et la montmorillonite-15A. Nous remercions également Pietro Vignola qui a fait des analyses à la microsonde électronique des cristaux de calcioancylite-(Nd). Enfin, l'un de nous (S.P) souhaite remercier Jean Detaille qui lui a fourni un échantillon de pyromorphite de la carrière.

## 6. Références

- Antun, P., 1953. Laumontite de Serpont, *Annales de la Société géologique de Belgique*, **77**, B63-B71.
- Bos, A., de Haas, G.J.L.M., Voncken, J.H.L., Van der Berden, A.M.J. & Jansen, J.B.H., 1987. Hydrothermal synthesis of ammonium-phlogopite. *Geologie en Mijnbouw*, **66**, 251-258.
- Burnham, C.W., 1991. *LCLSQ version 8.4., least-squares refinement of crystallographic lattice parameters*. Dept. of Earth and Planetary Sciences, Harvard University, 24 p.
- Buttgenbach, H., 1947. *Les minéraux de Belgique et du Congo belge*. Imp. H. Vaillant-Carmanne, Liège. 573 p.
- De Bethune, S., 1977. Les minéraux de la zone métamorphique de Libramont. *Professional paper, Service Géologique de Belgique*, 1977/5, **142**, 42 p.
- Eby, R.K. & Hawthorne, F.C., 1990. Clinoclase and the geometry of [5]-coordinate  $\text{Cu}^{2+}$  in minerals. *Acta Crystallographica*, **C46**, 2291-2294.
- Favreau, G., 2006. *Faces, version 4.4, logiciel interactif de tracé de cristaux*.
- Ghose, S., Fehlmann, M. & Sundaralingham, M., 1965. The crystal structure of clinoclase,  $\text{Cu}_3\text{AsO}_4(\text{OH})_3$ . *Acta Crystallographica*, **18**, 777.
- Ghysel, 2005. Carte géologique de Wallonie. Description de l'affleurement 6470312 le 11 mai 2005. *Service géologique de Wallonie*.
- Godfroid, E., 1999. *Minéralogie des sulfures des massifs métamorphiques ardennais (Libramont-Bastogne, Rocroi et Stavelot)*. Mémoire de Licence, Université de Liège, 48 p.
- Gulinck, M., Hoge, E. & Geukens, F., 1952. Résultats préliminaires des sondages de Bras (massif de Serpont). *Bulletin de la Société belge de Géologie*, **61**, 236.

Hatert, F., 1998. Données nouvelles sur la laumontite de la zone métamorphique de Libramont, Belgique. *Geologica Belgica*, **1**, 3-7.

Hatert, F., 2004. Les carbonates de terres rares de Bertrix. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, **73**, 27-34.

Hatert, F. & Theye, T., 2005. Zeolites, prehnite, and pumpellyite from Bertrix, Belgian Ardennes. *Geologica Belgica*, **8/1-2**, 33-42.

Hatert, F., Deliens, M., Houssa, M. & Coune, F., 2000. Native gold, native silver, and secondary minerals in the quartz veins from Bastogne, Belgium. *Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique*, **70**, 223-229.

Hatert, F., Deliens, M., Fransolet, A.-M. & Van Der Meersche, E., 2002. *Les minéraux de Belgique*, Éd. Institut Royal des Sciences naturelles de Belgique, Bruxelles, Belgique, deuxième édition, 304 p.

Hatert, F., Pasero M., Perchiazzi N. & Theye, T., 2007. Pumpellyite-(Al), a new mineral from Bertrix, Belgian Ardennes. *Eur. J. Mineral*, **19**, 247-253

Hermann, C., 2004. *Cristallochimie des grenats des Massifs ardennais*. Mémoire de Master, Université de Liège, 50 p.

Huby, M., 2007. *Étude cristallographique des minéraux de Quenast, Deux-Acren, Bierghes et Lembecq*. Mémoire de Master, Université de Liège, 47 p.

Kenis, I. & Sintubin, M., 2007. About boudins and mullions in the Ardenne-Eifel area (Belgium, Germany). *Geologica Belgica*, **10/1-2**, 79-91.

Lohest, M., Stainier, X. & Fourmarier, P., 1908. Compte rendu de la session extraordinaire de la Société géologique de Belgique, tenue à Eupen et Bastogne les 29, 30 et 31 août 1908. *Annales de la Société géologique de Belgique*, **36**, 275-282.

Mélon, J., Bourguignon, P & Fransolet, A.-M., 1976. *Les minéraux de Belgique*. Éditions G. Lelotte, Dison (Belgique), 283 pp.

Piscart, B., 2003. *Étude cristallographique de quelques feldspaths provenant des massifs ardennais et des terrains dévoniens discordants*. Mémoire de Master, Université de Liège, 30 p.

Rondeux, M. & Hatert, F., 2007. La titanite de Bertrix et les minéraux associés. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, **76**, 1-11.

RRUFF, 2021. IMA database of mineral properties. <https://rruff.info/ima/>

Theye, T. & Fransolet, A.M., 1993. Amphibolitfazielle Metamorphite im Rhenoharzynikum der Ardennen. *Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, Beihefte zum European Journal of Mineralogy*, **5**, 255.