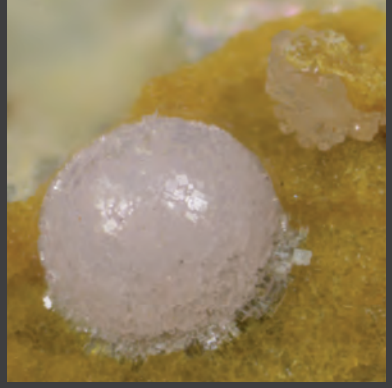
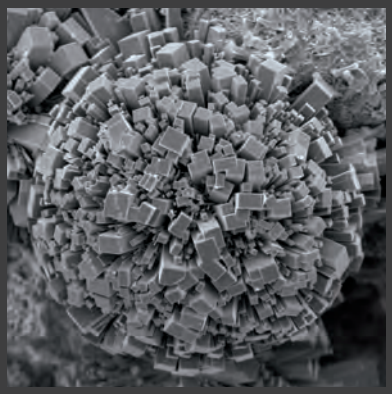
Ferrantia

ISSN 1682 - 5519







Minéralogie de la commune de Visé (Argenteau, Richelle et Visé), Province de Liège, Belgique

Simon Philippo (éditeur)

81 2019

Travaux scientifiques du Musée national d'histoire naturelle Luxembourg

Ferrantia est une revue publiée à intervalles non réguliers par le Musée national d'histoire naturelle à Luxembourg. Elle fait suite, avec la même tomaison, aux TRAVAUX SCIENTIFIQUES DU MUSÉE NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE DE LUXEMBOURG parus entre 1981 et 1999.



Ferrantia est publiée sous la licence Creative Commons BY-NC-ND 3.0 LU.
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/lu/

Comité de rédaction:
Eric Buttini
Guy Colling
Alain Frantz
Thierry Helminger
Ben Thuy

Mise en page:
Romain Bei

Design:
Thierry Helminger

Prix du volume: 15 €

Rédaction:
Musée national d'histoire naturelle
Rédaction Ferrantia
25, rue Münster
L-2160 Luxembourg

Tél +352 46 22 33 - 1
Fax +352 46 38 48

Internet: http://www.mnhn.lu/ferrantia/
email: ferrantia@mnhn.lu

Échange:
Exchange MnhnL
c/o Musée national d'histoire naturelle
25, rue Münster
L-2160 Luxembourg

Tél +352 46 22 33 - 1
Fax +352 46 38 48

Internet: http://www.mnhnl.lu/biblio/exchange
email: exchange@mnhn.lu

Page de couverture:

1. Boule rose de koninckite sur cacoxénite de Richelle avec des cristaux produisant certaines réflexions, collection et photo P. Chollet.
2. Boule rose de koninckite de Richelle montrant une multitude de cristaux, image MEB de l'échantillon RIC8.
3. Richellite en pseudomorphoses de cristaux de gypse de Richelle belles pseudomorphoses sur quartz, collection M. Blondieau, photo P. Chollet.

Citation:

Philippo S. (éditeur) 2019. - Minéralogie de la commune de Visé (Argenteau, Richelle et Visé), Province de Liège, Belgique. Ferrantia 81, Musée national d'histoire naturelle, Luxembourg, 88 p.

Date de publication:
1 octobre 2019
(réception du manuscrit: 29.01.2019)

Impression:
Imprimerie Reka imprimé sur papier FSC

Musée national d'histoire naturelle Luxembourg, 2019 ISSN 1682-5519

Ferrantia

81

Minéralogie de la commune de Visé (Argenteau, Richelle et Visé), Province de Liège, Belgique

Simon Philippo (éditeur)

Luxembourg, 2019

Travaux scientifiques du Musée national d'histoire naturelle Luxembourg

Simon Philippo (éditeur)

Minéralogie de la commune de Visé (Argenteau, Richelle et Visé), Province de Liège, Belgique

Table des matières

Introduction 8

Contexte géologique 9

Les différents types de gisements 10

- Les calcaires viséens à Visé 10
- Les couches namuriennes 10
- Les poches de dissolution des calcaires 10
- Les poches à argilites dans le calcaire viséen à Visé 12
- La poche à argilites avec richellite et koninckite, dans le calcaire viséen d'Argenteau 12
- Les poches à delvauxite dans le calcaire viséen à Visé 13

Les brèches de dissolution radioactives d'Argenteau et de Richelle 14

- La brèche de dissolution radioactive d'Argenteau 14
- La brèche de dissolution radioactive de Richelle 14

Méthodes analytiques 15

Les minéraux des calcaires viséens à Visé 15

- « Anthraxolite » 15
- Chalcopyrite et malachite 17
- Autres espèces des calcaires viséens 17

Les minéraux des couches nauriennes 18

- Destinézite 18
- Delvauxite 18
- Jarosite 20
- Phosphosidérite 20
- Todorokite 23

Les minéraux néoformés dans les poches de dissolution des calcaires 23

- Allophane 23
- Alumohydrocalcite 23
- Calcite 25
- Cuivre natif, Cu, azurite, malachite et cuprite 25
- Gibbsite 25

Goethite 26
Halloysite 27
Koninckite 28
Richellite 28

Les minéraux des poches à delvauxite dans le calcaire viséen à Visé 30
Delvauxite et phosphosidérite 30
Delvauxite en pseudomorphoses de cristaux de gypse, avec richellite 31
Fluorapatite 31
Ferristrunzite 31
Viséite 32

Les minéraux des brèches de dissolution radioactives d'Argenteau et de Richelle 33
Les phosphates 34
Autunite et méta-autunite 34
Béraunite 37
Cacoxénite 37
Corkite et hinsdalite 37
Crandallite 39
Delvauxite 40
Drugmanite 40
Evansite 40
Fluellite 40
Fluorapatite 40
Hopeite 43
Koninckite 43
Minyulite 47
Mitryaevaite 47
Phosphosiderite et strengite 49
Pyromorphite 49
Richellite 51
Scholzite 51
Torbernite et métatorbernite 51
Vivianite 52
Wavellite 54

Autres espèces minérales 56
Akaganéite 56
Anglésite 56
Brianyoungite 57
Brochantite 57
Cérusite 57
Chalcopyrite 58
Covellite 58

Cryptomélane 58
Galène 59
Gibbsite 59
Gypse 59
Hawleyite-greenockite 59
Jarosite 64
Lepidocrocite et goethite 64
Malachite 65
Marcasite et pyrite 65
Quartz et calcédoine 65
Sidérite 65
Smithsonite 67
Soufre 67
Sphalérite 67
Wulfénite 67
Relations génétiques entre quelques espèces de phosphates 67
Les rognons de destinézite et de delvauxite 67
Destinézite 67
Delvauxite 67
La richellite et les phosphates néoformés 72
La delvauxite et les phosphates néoformés 74
Conclusions 77
Remerciements 80
Bibliographie 80

Minéralogie de la commune de Visé (Argenteau, Richelle et Visé), Province de Liège, Belgique

Michel Blondieau
Val des Cloches, 131
B-6927 Tellin, Belgique
michelblondieau@freegates.be

Stéphane Puccio
Rue des Fontaines, 156
B-4041 Vottem, Belgique
stephane.puccio@gmail.com

Frédéric Hatert
Laboratoire de Minéralogie, Université de Liège B18
B-4000 Liège, Belgique
fhatert@uliege.be

Yannick Bruni
Laboratoire de Minéralogie, Université de Liège B18
B-4000 Liège, Belgique
yannick.bruni@iliege.be

Simon Philippo
Musée national d'histoire naturelle
25 rue Münster
L-2160 Luxembourg
simon.philippo@mnhn.lu

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt die Mineralogie des Visé-Gebiets, Belgien. Die Beschreibungen basieren auf vorher veröffentlichten Daten sowie auf neu durchgeführten Analysen von kürzlich gesammeltem Material. Dreizehn neue Mineralien wurden gefunden, die in den vorherigen Untersuchungen nicht vorhanden waren, darunter ein sehr seltenes Phosphatmineral, der Mitryaevait. Achtundzwanzig Phosphatmineralien sind jetzt in der Gegend bekannt. Amorphe Phosphate wie Richellit und Delvauxit wurden im Detail untersucht und zeigen das Vorhandensein von späten Rekristallisationsprozessen.

Abstract

This paper describes the mineralogy of the Visé area, Belgium. The descriptions are based on previously published data, as well as on new analyses performed on recently-collected material. Thirteen new minerals were found, which were absent from the previous investigations, among which a very rare phosphate mineral, mitryaevaite. Twenty-eight phosphate minerals are now reported in the area. Amorphous phosphates like richellite and delvauxite were examined into detail, thus showing the presence of late recrystallization processes.

Résumé

Cet article fait le point sur la minéralogie de la commune de Visé, en se basant sur les observations anciennes décrites dans la littérature, mais aussi sur de nombreuses analyses effectuées sur des échantillons anciens et sur du matériel récolté plus récemment. Nous pouvons ainsi ajouter treize espèces nouvelles pour ces localités dont un très rare phosphate secondaire, la mitryaevaite. Aujourd'hui, on peut ainsi recenser 28 espèces de phosphates dans le massif de Visé. Nous nous sommes également penchés sur la minéralogie d'espèces phosphatées amorphes comme la richellite et la delvauxite, dans lesquelles nous avons pu mettre en évidence la présence de phases tardives recristallisées.

Introduction

Le massif calcaire de Visé (Argenteau, Richelle et Visé), situé en Belgique à une quinzaine de kilomètres au nord de Liège, est connu de longue date pour sa minéralogie et particulièrement pour les nombreux phosphates qui y ont été observés. La commune de Visé regroupe, depuis la fusion des communes (1977), les anciennes communes d'Argenteau, Richelle et Visé, ainsi que Cheratte, Lanaye et Lixhe.

Des falaises calcaires jalonnent le cours de la Meuse entre Argenteau et Visé et, assez logiquement, de nombreuses carrières et fours à chaux y ont prospéré au XIX^{e} et début du XX^{e} siècle (Fig. 1). Ces carrières, depuis longtemps abandonnées, ont fait reculer la falaise de plus de 150 mètres en certains endroits et ont permis des observations nombreuses tant au niveau géologique que paléontologique ou minéralogique ; ce dernier aspect constituant notre principal centre d'intérêt. Les carrières minéralogiquement intéressantes sont situées de Visé au nord à Richelle au sud, ainsi que sur les hauteurs d'Argenteau. Dans cet article, nous avons adopté la numérotation des carrières proposée par Pirlet (1966) (Fig. 2).

Les premières observations minéralogiques réalisées dans ces localités sont fort anciennes, et l'ont été à la faveur des nombreuses carrières en activité au 19^{e} siècle, mais également grâce à la construction vers 1880 d'une route en lacet partant du pont d'Argenteau et reliant le fond de la vallée au village de Richelle situé au sommet de la falaise. A la faveur de ces derniers travaux, Forir (1880) découvre la destinézite à Argenteau et, un peu plus tard, Cesàro & Despret (1883) et Cesàro (1884) décrivent deux autres espèces phosphatées : la richellite et la koninckite. La viséite de Visé, découverte par Cesàro en 1888, fut étudiée en détail par Mélon (1942).

Fin des années '50, on explore l'uranium partout en Europe et aussi en Belgique. Lors d'une campagne de recherche, Legrand (1957) met en évidence l'existence de brèches radioactives à Argenteau, puis à Richelle. Jedwab (1958) découvre alors des cristaux de torbernite. L'intérêt minéralogique de la localité est relancé et Van Tassel (1959a, b) étudie la minéralogie de la brèche radioactive d'Argenteau et puis de celle de la vieille carrière N' de Richelle. Il décrit ainsi de nombreuses espèces alors inconnues en Belgique, dont la fluellite.



Fig. 1 : Carte postale datée de 1902 montrant les carrières en bord de Meuse à Visé.

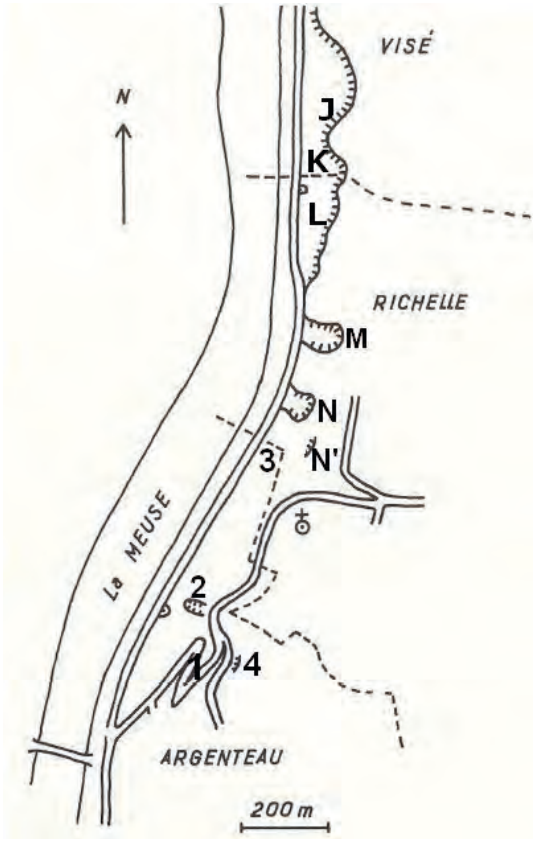


Fig. 2 : Anciennes carrières le long de la Meuse entre Visé et Richelle ; en pointillés, les limites des anciennes communes regroupées aujourd'hui dans le « grand Visé ». Localisation d'affleurements minéralogiquement intéressants : affleurements dans le namurien (1, 2 et 3), ancienne carrière dans le calcaire viséen à Argenteau (4), anciennes carrières dans le calcaire frasnien à Richelle (M, N et N'), anciennes carrière de Visé (J et K). 1 : Localité-type de la destinézite, 2 : Brèche cimentée par de la jarosite, 3 : Couches avec rognons de delvauxite et de destinézite mises au jour lors de travaux en 1995, 4 : Localité-type de la richellite et de la koninckite.

Au début des années '70, de nouvelles récoltes réalisées principalement dans l'ancienne carrière N de Richelle conduisent Fransolet et al. (1974a, b, c, d, 1977) à la découverte d'un grand nombre d'espèces supplémentaires et de nombreuses publications minéralogiques voient le jour avec, en point d'orgue, une nouvelle espèce minérale : la drugmanite (Van Tassel et al. 1979). Dans la deuxième édition des minéraux de Belgique, Hatert et al. (2002) recensent ainsi 23 espèces à Visé, 50 à Richelle et 17 à Argenteau. Pour le « grand-Visé », cela donne un total de 56 espèces différentes, ce qui en fait, après Vielsalm, la commune la plus richement minéralisée de Belgique.

Fin des années '70, après certains excès, ces anciennes carrières deviennent interdites d'accès et la minéralogie de Richelle tombe peu à peu dans l'oubli et ce, pendant plus de 30 ans. Vers 2010, un amateur habitant Richelle, Yves Jockin, s'engage à retrouver les sites minéralisés de sa commune et découvre un gros bloc de brèche grise au pied d'une racine d'un arbre abattu. Dans son bloc « magique », comme il l'avait appelé, il observe de nombreuses espèces minérales dont de fort jolis cristaux de fluellite. L'intérêt pour la localité de Richelle est de nouveau relancé. Pendant quelques décennies, plus personne n'a visité ces sites et durant tout ce temps, des blocs minéralisés sont tombés des parois des vieilles carrières et il n'y avait plus qu'à les « cueillir »...

Cet article propose de faire le point sur la minéralogie de ces localités, en se basant sur les observations anciennes décrites dans la littérature, mais aussi sur de nombreuses analyses effectuées sur des échantillons anciens et sur du matériel récolté plus récemment. Cette étude permettra ainsi de compléter l'inventaire minéralogique de cette région et de mieux cerner le mode de formation de ces paragenèses minérales. Quelques autres sites de moindre importance comme Sarolay et Bagatelle sur l'ancienne commune d'Argenteau, mais aussi aux autres sections de la commune actuelle de Visé que sont Cheratte (ancienne mine de charbon), Lanaye et Lixhe, ne sont pas envisagés dans ce travail.

Contexte géologique

La géologie du massif calcaire de Visé est fort complexe et a déjà fait l'objet de très nombreuses interprétations qui dépassent le cadre de cet article (Barchy & Marion 2000). Voici une description très simplifiée des affleurements minéralisés qui nous intéressent.

A Visé, des carrières ont exploité un calcaire d'âge viséen (Carbonifère inférieur) ; Visé étant initialement la coupe de référence de ces couches géologiques. Ce stratotype a cependant été abandonné au profit d'une coupe en Chine où les séries se

présentent en une séquence chronologique continue et homogène, ce qui n'est pas vraiment le cas à Visé.

Localement on observe dans ce calcaire une brèche d'âge frasnien (dévonien supérieur) dont les éléments, également calcaires, peuvent avoir des dimensions gigantesques de plusieurs mètres cubes. On pense qu'il s'agirait d'une falaise frasnienne qui se serait effondrée dans la mer viséenne. Plus au sud, on trouve des anciennes carrières de calcaire frasnien (M, N et N', Fig. 2) où s'observent d'importantes poches et cavités à remplissage lithologique fort complexe attribué au viséen et au houiller. Dans ces poches se trouvent des brèches de dissolution dans lesquelles se sont formées de très nombreuses espèces minérales.

Les calcaires sont surmontés de couches silto-gréseuses (phtanites) du namurien (base du houiller) dans lesquelles s'observent des niveaux avec rognons phosphatés (destinézite et delvauxite). Un extrait de la carte géologique (Fig. 3) montre la présence des terrains primaires affleurant dans la vallée de la Meuse sous une couverture de terrains récents.

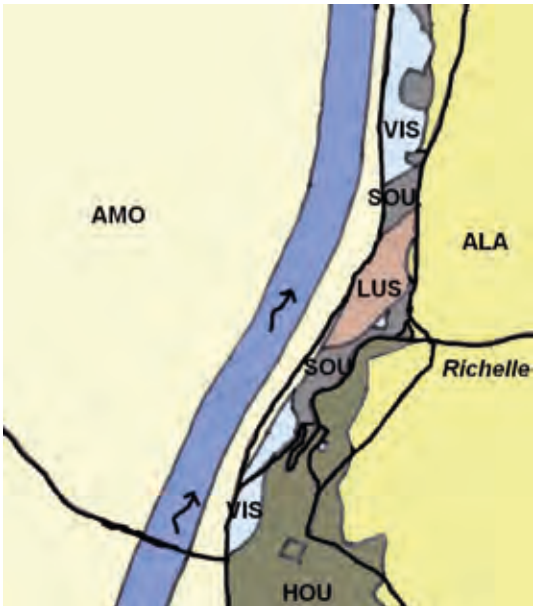


Fig. 3 : Extrait d'après la carte géologique de Wallonie 1:25000, planchette 42/3-4 Dalhem-Herve (Barchy & Marion 2000). LUS : Formation de Lustin (Frasnien), VIS : Formation de Visé (Viséen), SOU : Formation de Souvré (Namurien E2), HOU : Houiller, AMO : Alluvions modernes, ALA : Alluvions anciennes.

Les différents types de gisements

Les calcaires viséens à Visé

Au 19e et début du 20ième siècle, les carrières de Visé ont exploité le calcaire viséen et, à cette époque, elles fournissaient pas mal de fossiles (stratotype viséen) mais aussi quelques jolis cristaux. Aujourd'hui, il n'est plus possible de collecter ces minéraux mais de beaux échantillons sont conservés dans les anciennes collections dont celles du Laboratoire de Minéralogie de l'Université de Liège.

Les couches namuriennes

Les couches de transition entre le calcaire carbonifère (Viséen) et la base du houiller (Namurien) renferment des lits avec nombreux rognons phosphatés de destinézite et de delvauxite. Ces couches, qui recouvrent les formations calcaires (Viséen et Frasnien), ont été reconnues dans les trois anciennes communes de l'entité et renferment également des lits d'un schiste alumineux appelé «ampélite», dans lequel se trouve de la pyrite disséminée ainsi que de la halotrichite en petites couches fibreuses. L'ampélite a été exploitée par le passé pour en extraire de l'alun ; une alunière a d'ailleurs été en exploitation à Argenteau. La halotrichite est un minéral soluble dans l'eau qui ne s'observe pas à l'affleurement. Par contre, en collection, des efflorescences millimétriques en petites fibres blanches développées sur un minéral transparent vert pâle sont apparues sur un échantillon, et l'analyse par diffraction des rayons X a montré qu'il s'agissait de halotrichite sur mélantérite.

Les poches de dissolution des calcaires

Aux époques primaire et secondaire, les calcaires du massif de Visé (Viséen et Frasnien) ont, à plusieurs reprises, été soumis à l'érosion karstique, créant des cavités de toutes tailles dans lesquelles sont apparues la majorité des espèces minérales que nous décrivons dans cet article. Nous pouvons distinguer au moins deux processus successifs de mise en place de ces espèces minérales : minéralisations des

argilites formées sur les parois calcaires des poches de dissolution d'une part, et minéralisations formées au fond des poches de dissolution dans des brèches de dissolution d'autre part.

L'érosion karstique qui s'est produite anciennement dans les calcaires a créé des vides qui se sont progressivement remplis, par soutirage, de matériaux divers parfois riches en pyrite et en nodules phosphatés provenant des couches du Namurien. Par la suite, des eaux météoriques ont percolé tous ces dépôts et se sont acidifiées suite à l'oxydation de la pyrite. Ces solutions acides ont ensuite été neutralisées par réaction avec le calcaire des parois sur lesquelles ont pu se déposer des couches parfois fort épaisses d'argilites (dépôt d'allophane et d'halloysite, deux silicates d'aluminium). Des minéralisations comparables ont été signalées à Beez (Blondieau et al. 2012). Ces occurrences d'argilites, observées aux XIX^{e} et XX^{e} siècles à Visé et à Argenteau, sont décrites dans la littérature ancienne dont nous avons repris ci-après les schémas et quelques commentaires. De même, Herbosch et al. (1979) signalent aussi des argilites dans la carrière «F» de Visé mais nous n'avons pas eu l'occasion de les observer.

Après le dépôt des argilites sur les parois calcaires, les solutions qui percolent la poche sont enrichies en fer, calcium et phosphore. Arrivées au fond des poches où se sont accumulés aussi des matériaux résiduels de la dissolution du calcaire, ces solutions dont le pH a augmenté, précipitent de nombreuses espèces minérales dont des phosphates et en particulier la richellite qui est un phosphate de fer et calcium. Au fond des grandes poches, on peut observer l'accumulation d'un matériel argileux peu induré cimentant divers fragments rocheux dont des phtanites et des calcaires siliceux. Cet ensemble constitue une « brèche de dissolution » qui a été, par ailleurs, reconnue radioactive. Dans

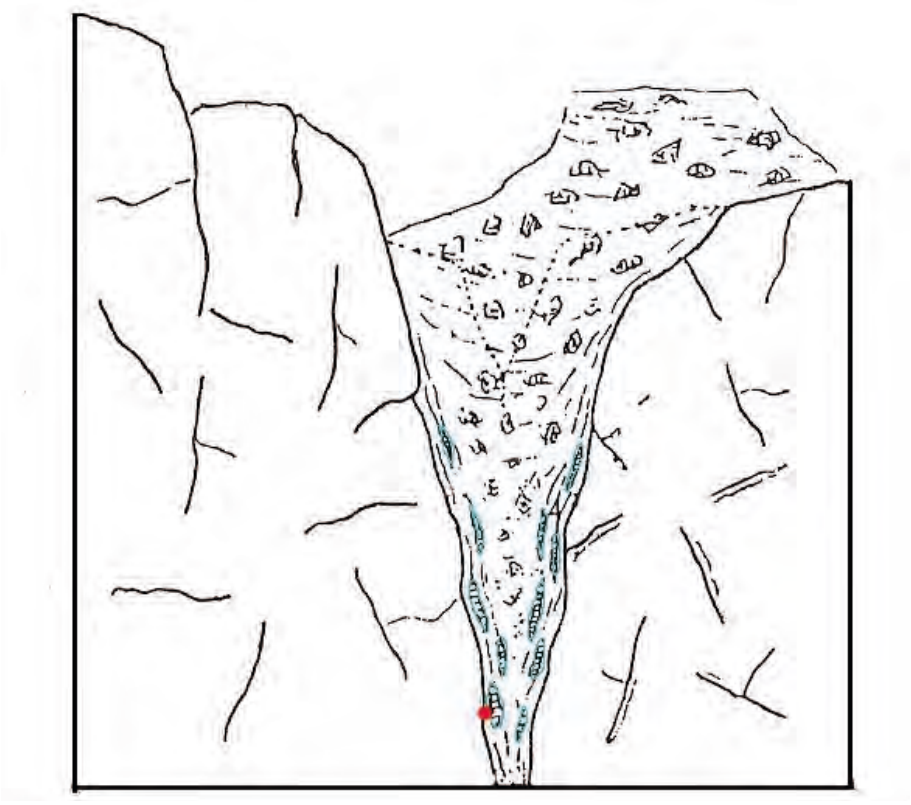


Fig. 4 : Poche de dissolution dans le calcaire viséen de Visé, d'après Lespineux, 1903.
Près des parois, argile jaunâtre stratifiée et allophane (en bleu sur le schéma). Le point rouge indique l'endroit où a été trouvé l'échantillon avec fragment de cuivre natif. Le milieu de la poche est rempli avec de l'argile noire et des fragments de phtanite plus ou moins altéré.

le massif calcaire de Visé, ces minéralisations sont bien observées dans les carrières de Richelle mais aussi à Argenteau où se trouve la localité-type de la richellite et de la koninckite.

Les poches à argilites dans le calcaire viséen à Visé

Dans une carrière de Visé, Lespineux (1903) signale la présence de nombreuses poches de dissolution des calcaires et, dans l'une d'elles, de beaux échantillons d'allophane ont été observés non loin du contact avec l'encaissant calcaire. Nous reproduisons, à la Figure 4, le schéma de Lespineux (1903) qui illustrait la description des minéralisations observées dans la poche. Cet auteur indique la présence, près des parois calcaires, d'une argile jaunâtre stratifiée contenant de la l'allophane ; au fond de la poche, un échantillon de cuivre natif a pu être observé.

Au cours de nos recherches, nous avons pu observer des minéralisations semblables dans une carrière de Visé, la carrière« J » du plan Pirlet (1966) qui est située à l'arrière d'un grand garage de montage de pneus («Visé-pneus»). Une paroi de cette carrière est recoupée par une large fissure remplie d'un matériel constitué de roches diverses non minéralisées, mêlées à de l'argile (Fig. 5). Au sol, il nous a été possible de trouver des échantillons d'allophane provenant vraisemblablement d'un endroit inaccessible situé plus haut. Ces minéralisations sont comparables à celles décrites par Lespineux (1903) et à celles conservées dans les collections de l'Université de Liège.

La poche à argilites avec richellite et koninckite, dans le calcaire viséen d'Argenteau

Lohest (1883) donne une description précise de cette poche célèbre qui a montré des argilites sur



Fig. 5 : Vue d'une poche de dissolution dans la carrière « J » de Visé, photo M. Blondieau, octobre 2012.

les parois calcaires et de la richellite cimentant des cailloux au fond de la poche. Cette occurrence est la localité-type de la richellite décrite par Cesàro & Despret (1883) mais aussi de la koninckite décrite un peu plus tard sur des échantillons de richellite par Cesàro (1884).

Lohest écrit : « On arrive ainsi à la bifurcation du chemin [].. [après avoir monté la route en lacets],[].. A 80 mètres plus loin, le phtanite arrive encore jusqu'au chemin. Un peu en arrière se dresse une petite éminence calcaire, recouverte de débris de phtanite et présentant deux fentes presque verticales. C'est le gîte où M. G. Cesàro a découvert la richellite. » Cesàro n'était malheureusement jamais très précis quant à la provenance exacte des échantillons qu'il étudiait… Un peu plus loin, Lohest ajoute : « […] La poche à richellite, [].. , creusée dans le calcaire carbonifère, qui renferme en ce point des traces de pyrite, elle présente deux ouvertures, l'une tournée vers le Nord, l'autre vers l'Ouest. »La description qu'en fait Lohest est très instructive et nous en reprenons quelques extraits : « L'ouverture nord … On observe une stratification irrégulière parallèle aux parois de la poche. [].. On trouve d'abord contre le calcaire de l'allophane brune, impure, ferrugineuse, souvent mélangée à de l'halloysite blanchâtre [].. L'ouverture ouest montre un faciès peu différent de l'ouverture nord. Le remplissage y est rendu intéressant par la présence de richellite [].. qui occupe la partie inférieure de la poche [].. »

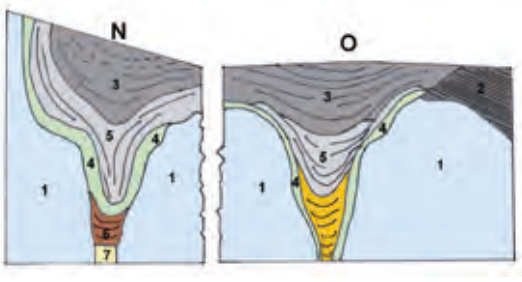


Fig. 6 : Poche à richellite d'après Lohest (1883). La richellite est représentée en orange et n'a été observée que sur la coupe ouest de la poche. 1. Calcaire carbonifère (viséen), 2. Couche de phtanite non altéré, 3. Phtanite altéré, 4. Couche d'argilite (halloysite et allophane brune), 5. Halloysite gris blanchâtre et terreuse, 6. Limon stratifié, 7. Sable argileux, et tout au fond de la poche, côté ouest, en orange, le dépôt de richellite.

Nous reproduisons, à la Figure 6, le schéma que Lohest (1883) donne de cette poche d'Argenteau.

L'observation d'argilites sur les parois calcaires de la poche d'Argenteau est à rapprocher des observations faites par Lespineux (1903) à Visé. Mais ici à Argenteau, on observe, en plus, de la richellite au fond de la poche. Ce minéral, qui est un phosphate de fer, s'est formé par précipitation du fer et du phosphore accumulés dans les solutions arrivées au fond de la poche. Aujourd'hui, le pointement calcaire décrit par Lohest (1883) est encore visible dans une vieille carrière bien embroussaillée, mais les chances d'y retrouver de la richellite y sont très faibles.

Les poches à delvauxite dans le calcaire viséen à Visé

Dans la littérature, Stainier (1908) signale la présence abondante de nodules de delvauxite dans des poches de la carrière «Andrien» de Visé. Cette carrière doit sans doute correspondre à la carrière «F» du plan Pirlet (1966), lequel indique la présence d'une grande poche de dissolution à cet endroit. De même, Legrand (1958) précise que de jolis nodules de delvauxite ont été signalés anciennement dans la brèche de dissolution d'Argenteau, située quelques mètres au Sud de la fameuse poche à richellite.

Ces poches, qui ont accumulé des rognons de delvauxite soutirés des couches du Namurien comme à Beez (Blondieau et al. 2012), ont été le siège de nouvelles genèses minérales fort intéressantes dont sans doute la viséite, mais aussi la ferristrunzite, espèce non encore été signalée dans la région.

Nous n'avons pas pu retrouver de poche à delvauxite comme celles signalées dans la littérature. Par contre, à la carrière K de Visé, nous avons pu observer une brèche de plusieurs mètres cubes, constituée de blocs de calcaire et de phtanite cimentés par un matériel rougeâtre phosphaté contenant une multitude de petits cristaux de quartz biterminés infra millimétriques, qui se sont accumulés après la dissolution du calcaire silicifié. Dans ce contexte, des phosphates de fer nouveaux ont pu être produits aux dépens des phosphates disséminés et des rognons de delvauxite soutirés des couches namuriennes sus-jacentes, et accumulés dans les poches de dissolution.

Les brèches de dissolution radioactives d'Argenteau et de Richelle

La brèche de dissolution radioactive d'Argenteau

Legrand (1957) apporte des précisions sur la nature des « brèches de dissolution » d'Argenteau. Il indique qu'il ne s'agit pas que de brèches sédimentaires montrant des niveaux lithologiques soutirés dans les vides karstiques, mais bien de roches remaniées réduites en bouillie rocheuse, formant un ciment induré mais non lapidifié gris perle, jaunâtre, ou brunâtre. Des phénomènes anciens de dissolution sont à l'origine de ces roches. On y rencontre également des fragments de phtanite et de calcaire silicifié, en fait des quartzites cristallins au sens pétrographique.

Legrand (1957) met aussi en évidence la radioactivité de cette brèche et y observe un minéral en petites paillettes vert-jaune que Van Tassel (1959a) identifiera comme méta-autunite. Lors de cette étude minéralogique, ce dernier y découvre également de l'évansite et de la fluellite. Toutes ces espèces sont cependant fort petites et très peu spectaculaires. Cette brèche de dissolution d'Argenteau se trouve à quelques dizaines de mètres de la localité-type de la richellite (N°4, Fig. 2) et est encore accessible.

La brèche de dissolution radioactive de Richelle

A Richelle, les espèces minérales sont observées dans une brèche radioactive exposée dans les anciennes carrières notées M, N et N' sur le plan de Pirlet (1966) (Fig. 2). Ces carrières sont fort anciennes et étaient déjà à l'arrêt en 1883 (carrières M et N) (Lohest, 1883). A cette époque la toute petite carrière N' devait être également arrêtée depuis bien longtemps déjà. Ces anciennes carrières sont situées dans des propriétés privées et les propriétaires ne sont pas toujours enclins à donner des autorisations d'accès.

La carrière M est située juste derrière une habitation. Legrand (1958) écrit : « … carrière abandonnée, renommée par sa minéralisation en bornite et chalcopyrite, … ». Nos recherches ne nous ont pas permis d'en observer. Par contre, la koninckite en petites boules radiées couvertes d'une pellicule de richellite s'est localement montrée très abondante dans quelques blocs.

La carrière N est située à route juste à côté d'une maison. La brèche de cette carrière est constituée de trois types d'éléments dans lesquels peuvent s'observer des minéralisations : les éléments gris siliceux très poreux, les éléments noirs massifs très durs et les éléments jaunes et bruns assez tendres.

Les éléments gris proviennent de calcaire silicifié renfermant de nombreuses cavités millimétriques à centimétriques, dans lesquelles se trouvent encore parfois des tiges d'encrines fossiles. Les nombreux petits trous de ce calcaire silicifié renferment une multitude de cristaux microscopiques dont des phosphates tels que la fluellite, la phosphosidérite et la cacoxénite. Les espèces minérales rencontrées dans une cavité peuvent d'ailleurs être très différentes de celles rencontrées dans la cavité voisine qui n'est pourtant distante que de quelques millimètres. Ces blocs renferment également un peu de sphalérite dont l'altération est à l'origine d'un carbonate, la smithsonite, ainsi que de deux phosphates, la scholzite et la hopéite.

Les éléments de quartzite noir massif extrêmement dur et coupant («phtanite») renferment des joints de faible largeur et aussi des géodes tapissées de cristaux de quartz parfois enfumé et centimétriques. Le gypse en cristaux dépassant parfois le centimètre est fréquent et accompagne souvent la fluellite en cristaux incolores pouvant atteindre 5 mm de longueur sur leur plus grande dimension. Des blocs de cette brèche noire très dure renferment parfois de la chalcopyrite et de la galène, qui a conduit à la formation de sept espèces plombifères : la cérusite, l'anglésite, la wulfénite, la pyromorphite, la corkite/hinsdalite et la drugmanite.

Les éléments jaunes et bruns ressemblent assez à des masses d'argile légèrement durcies dans lesquelles se trouvent notamment des cristaux de torbernite, mais également des phosphates comme la mitryaevaite récemment observée.

De nombreux échantillons de cette carrière ont été étudiés par Fransolet et al. (1974a, b, c, d, 1977), ainsi que par Van Tassel et al. (1979) qui y découvrent une nouvelle espèce minérale : la drugmanite.

La carrière N' se trouve tout en haut de l'escarpement rocheux en contrebas d'une maison et est presque complètement nivelée. Son accès est un peu périlleux. Legrand (1957) décrit deux types de brèches en place : une brèche à ciment jaune assez friable et une brèche limonitisée sous-jacente. Dans les maigres déblais, nous avons trouvé des blocs d'une sorte de limonite avec fluorapatite. Il s'agit très certainement de l'endroit pour lequel Dumont (1832) signale : «Contre les carrières de Richelle (entre Argenteau et Visé), on voit un filon vertical d'un mètre environ de puissance, formé de fer hydraté pulvérulent, de fer hydraté compact, et de fer hydraté argileux : ce filon, qui paraît se diriger du SO au NE, renferme des géodes tapissées d'halloysite en très petits mamelons, des veines de cette substance à l'état compacte, vitreux, translucide, blanc-verdâtre, vert-pomme, grisâtre, brunâtre, et de la variété terreuse blanchâtre.» Legrand (1957) précise aussi que la radioactivité mesurée de la brèche friable semble deux fois plus grande que celle de l'autre brèche et peut renfermer jusqu'à 800 ppm d'uranium. Van Tassel (1959b) a traité mécaniquement 50 kg de la brèche friable et a isolé une fraction lourde de 15,3 g dans laquelle il a pu observer différentes minéralisations dont de l'autunite, de la torbernite, de la fluorapatite et du cryptomélane. Sur le sol, on retrouve des blocs assez comparables à ceux de la carrière N. Ainsi, le gros bloc trouvé par Yves Jockin au début des années 2010 correspond à la brèche grise de calcaire silicifié.

Méthodes analytiques

Les échantillons décrits dans cet article ont été examinés sous la loupe binoculaire et l'identité de plusieurs espèces a été confirmée par diffraction des rayons X sur un diffractomètre de poudres PANALYTICAL PW-3710 utilisant la radiation FeK_{α} (λ = 1,9373 Å). Lorsque les quantités de matière étaient très faibles, un diffractomètre à 4 cercles Rigaku Xcalibur, équipé d'un détecteur EOS et utilisant la radiation MoK_{α} (λ = 0,7107 Å), a été utilisé en mode « Debye-Scherrer ».

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 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 ») de microanalyse élémentaire aux rayons X ont été obtenus avec le même microscope, équipé 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 l'identification des éléments.

Nous avons également déterminé la composition chimique de quelques échantillons avec un spectromètre à fluorescence X portable Niton XL3T-980 GOLDD+ de chez Thermo Fisher. Ce spectromètre possède un tube à rayon X Niton XL3T composé d'une anode d'or pouvant émettre un faisceau de 3 mm de diamètre d'une intensité allant de 9 à 50 kV pour une charge de 0 à 40µA. Les rayons X réémis passent ensuite dans un détecteur de type GOLDD (Geometrically Optimized Large Area Drift Detector) d'une résolution : ≤185 eV à 60000 cps pour un temps de mise en forme de 4µs.

Les minéraux des calcaires viséens à Visé

« Anthraxolite »

Un matériau organique noir, en globules d'aspect fluidal dans des géodes ou en bâtonnets coniques, appelé « anthraxolite », a pu être trouvé en abondance lors de l'exploitation des carrières de calcaire (Planche 1). Le minéral est déjà signalé par Tonnellier (1807) qui écrit : « On le trouve engagé dans le calcaire, en masses plus ou moins considérables ; les morceaux les plus riches forment des rognons de l'épaisseur de trois à cinq centimètres jusqu'à la grosseur du poing ; d'autre fois il ne montre que de légers indices. »

Lohest (1884) apporte plus de précision sur cette espèce. Il écrit : «L'anthracite [= anthraxolite] se présente le plus communément sous la forme de petites masses globuliformes ou aplaties, très noires, très compactes, à cassure conchoïdale, d'aspect résineux, à surface parfaitement lisse et brillante. Certains échantillons de cette substance atteignent exceptionnellement plusieurs centimètres de diamètre. […] Il



Planche 1 : Anthraxolite de Visé (1a) agrégat d'anthraxolite en bâtonnets, échantillon ULG 14655 – (1b) anthraxolite globuliforme, échantillon ULG 14654 – (1c) anthraxolite dans calcaire silicifié de Richelle, collection et photo P. Chollet, largeur de l'image 4,0 mm.

est une sorte d'échantillons plus remarquables encore […] sous la forme de petits bâtons d'un millimètre environ de section et de deux à trois centimètres de longueur. […] Il y a quelques années, les échantillons d'anthracite en bâtons abondaient à Visé.»

Antenucci & Bourguignon (1986) ont réalisé des études cristallographiques sur ce matériel et montrent qu'il s'agit d'un bitume contenant moins de 5% de matières volatiles, ce qui est fort peu. Cette composition traduit une évolution poussée

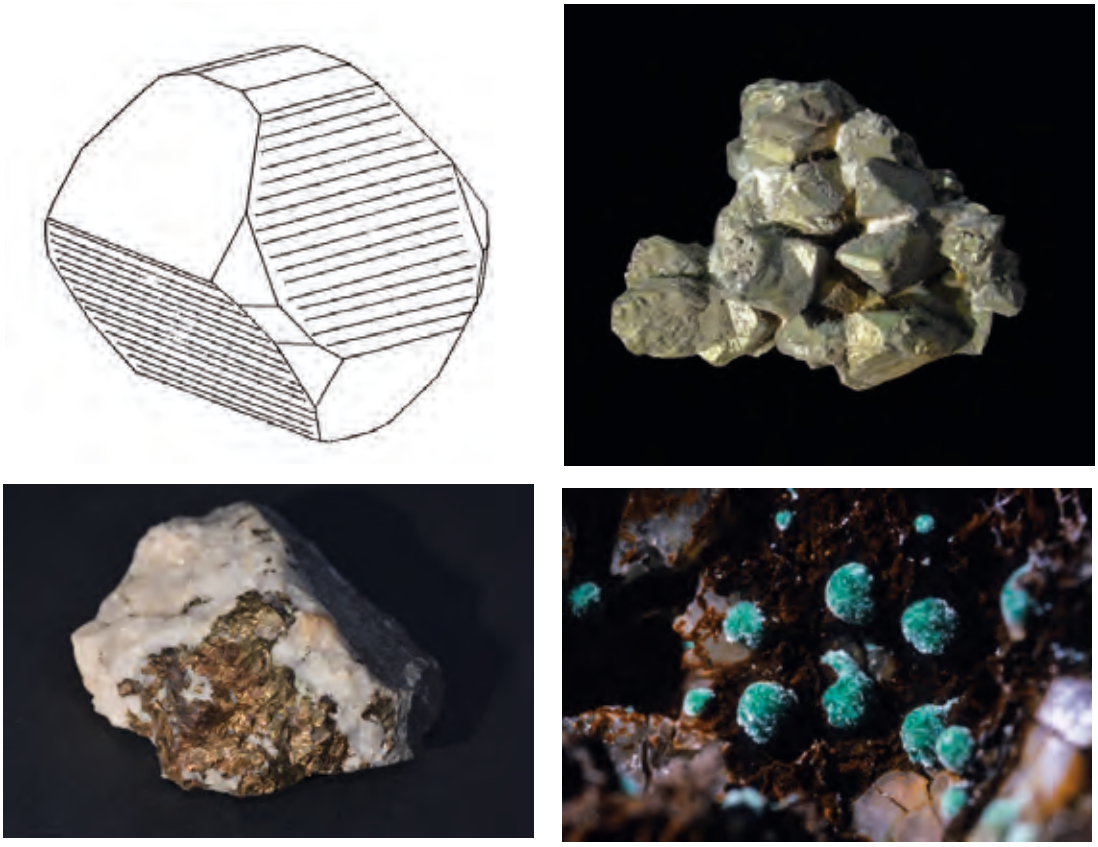


Planche 2 : Chalcopyrite de Visé (2a) dessin d'un cristal réalisé par Buttgenbach (1898) - (2b) groupement de cristaux, échantillon ULG 941 – (2c) chalcopyrite massive dans la calcite, échantillon ULG 19782. Malachite de Visé, formant des agrégats globulaires (2d). Echantillon ULG , photo Eddy Van Der Meersche.

de ce bitume qui aurait migré à l'état fluide, simultanément au développement de filonnets de calcite. Aujourd'hui, il est encore possible d'observer des veinules ou globules noirs parfois centimétriques de cette matière dans les calcaires silicifiés de la région. L'anthraxolite n'est pas une espèce reconnue par l'I.M.A.

Chalcopyrite, $CuFeS_2$, et malachite, $Cu_2(CO_3)(OH)_2$

Tonnellier (1807) écrit : « La carrière située près de Visé où se trouve l'anthracite [= anthraxolite], contient aussi du cuivre pyriteux [= chalcopyrite] et du cuivre carbonaté vert [= malachite] ; ces deux substances y sont rares et sont engagées dans les cristaux rhomboïdaux [= calcite]. » (Planche 2). Cette occurrence de chalcopyrite dans la calcite est confirmée par Buttgenbach (1898) : « Ces cristaux, qui se trouvent dans la calcite, sont accompagnés de pyrite, de dolomie et de petits globules d'anthracite. Ils ont au plus 2 mm de dimension moyenne mais ils sont très nets et très réguliers ; les plus beaux se trouvent à l'intérieur de la calcite. »

Cesàro (1897) décrit un échantillon de malachite de Visé (N°4978) : «Ce sont les plus gros cristaux que nous avons ayons rencontrés en Belgique : à la loupe, on aperçoit nettement les faces m et la macle ordinaire.»

Autres espèces des calcaires viséens

La littérature mentionne la présence de quelques autres espèces de peu d'intérêt qu'il n'est plus

vraiment possible d'observer aujourd'hui. Lohest (1884) mentionne notamment : calcite, dolomite et «blende» (sphalérite). Pour Visé, Hatert et al. (2002) signalent aussi bornite, fluorite, pyrite, quartz et sidérite. Buttgenbach (1947) précise que la fluorite de Visé est violette ou incolore. La galène a, semble-t-il, été exploitée à Souvré (Polrot 2002), un hameau de Visé situé non loin des carrières. Toutes ces espèces sont assez communes dans les calcaires carbonifères et dévoniens. Cesàro (1897) décrit les cristaux de calcite de Visé comme des rhomboèdres à peu près simples ou bien des scalénoèdres avec chalcopyrite et pyrite ayant des faces très inégalement développées et terminées par un rhomboèdre à faces bien réfléchissantes. Il précise également que la dolomite se présente en rhomboèdres primitifs selliformes et est associée à la chalcopyrite.

Les minéraux des couches naurienne

Destinézite, $Fe^{3+}_2(PO_4)(SO_4)(OH)\cdot 6H_2O$

A Argenteau, au sud de Richelle, la construction vers 1880 de la route en lacets a offert de belles coupes dans le namurien (base du houiller) dans lesquelles H. Forir a pu recueillir de nombreux rognons blanchâtres. Ces derniers, de forme comparable à celle des rognons de delvauxite trouvés un demi-siècle auparavant à Berneau, également dans le namurien, sont cependant de teinte blanc jaunâtre et non brun marron comme ceux de delvauxite.

Forir (1881) signale qu'il s'agit d'une nouvelle espèce minérale, ce que confirmeront plus tard des études chimiques et cristallographiques. Appelé «destinézite», ce minéral microcristallin est un phosphate de fer chimiquement proche de la diadochite, mais cette dernière est une espèce mal cristallisée. Aujourd'hui, le nom de «diadochite» est conservé pour les phases amorphes ou mal cristallisées alors que le nom de «destinézite» est conservé pour les phases bien cristallines, ce qui ne peut être déterminé que par diffraction des rayons X puisque la dimension des cristaux n'est que de quelques microns seulement.

Aujourd'hui, il est difficile de collecter quelque chose dans ces talus bien végétalisés longeant une route à grande circulation. Néanmoins, on signale la présence de rognons de destinézite dans un petit ravin situé quelques centaines de mètres plus au nord de cette route. Des minéralisations comparables ont été signalées aussi à Visé mais nos recherches ne nous ont pas permis d'en retrouver.

Par contre, en 1995, une profonde tranchée a été réalisée entre les hauteurs de Richelle et la vallée de la Meuse pour la pose de tuyaux d'égout (N°3 de la Figure 2). Passant à une centaine de mètres au sud de la carrière N de Richelle mais encore sur la commune d'Argenteau, elle a permis d'observer une belle coupe renfermant sur trois ou quatre mètres de longueur et un bon mètre de hauteur des rognons phosphatés en place dans de l'argile superposée à un banc de calcaire. Dans la partie inférieure, au contact du calcaire, se trouvait une première couche d'argile de couleur rouge épaisse d'environ 40 cm. On pouvait y voir en abondance des rognons de teinte ocre à rouge. Sans transition, une deuxième couche d'argile bleu noire était superposée à la couche précédente. Son épaisseur était du même ordre de grandeur mais elle renfermait des rognons blanc jaunâtre d'aspect crayeux en surface. Les rognons, d'une forme ovoïde, et d'un diamètre moyen de 2 à 6 cm (exceptionnellement 15 cm), semblaient disposés parallèlement à la stratification des couches. La dimension et la forme de ces rognons étaient identiques dans les deux couches.

L'analyse par diffraction des rayons X d'un rognon blanc jaunâtre, recueilli en 1995 dans la couche d'argile supérieure bleu noire au sud de la carrière N, montre qu'il s'agit de destinézite et que le matériel est bien cristallin. Les analyses chimiques qualitatives EDS réalisées sur cet échantillon indiquent la présence des éléments O, Fe, S et P, confirmant ainsi l'identification du minéral.

Delvauxite, $CaFe^{3+}_4(PO_4)_2(OH)_8\cdot 4\text{-}5H_2O$

Le minéral de la localité-type (Berneau) est décrit par Dumont (1838) comme une matière brunâtre d'éclat résineux se présentant en masses réniformes, fragiles à texture compacte et à cassure parfaitement conchoïdale. Il indique également que, dans l'eau, elle pétille et se divise en fragments alors que dans l'acide chlorhydrique,



Planche 3 : Destinézite de Richelle (3a) échantillon holotype, ULG 9363 – (3b) étiquettes et lame mince correspondant à l'échantillon holotype ULG 9363 – (3c) rognon provenant de la collection S. Puccio.

elle fait effervescence et se dissout avec facilité en formant une légère gelée et une liqueur orangée brunâtre. Forir (1881) précise la couleur des rognons de delvauxite de Berneau qui sont généralement brun foncé sur les bords et jaune brunâtre à l'intérieur. Nous avons analysé un échantillon de ce type et avons remarqué que la partie centrale jaune brunâtre était en fait constituée de destinézite cristalline, tandis que la partie externe brune était constituée de delvauxite amorphe. En collection, la delvauxite brun marron est souvent observée toute craquelée et elle se brise aisément en une multitude de petits fragments au moindre choc.

Lohest (1883) signale la delvauxite abondante à Argenteau, au contact entre le calcaire viséen et les phtanites namuriens, le long de la route « en zig-zag » montant vers Richelle. A vol d'oiseau, Argenteau se trouve à moins de quatre kilomètres de Berneau, la localité-type de cette espèce. Aujourd'hui, le long de cette route, à proximité d'un grand virage, on peut observer un matériel brun résineux formant une veine épaisse de quelques



Fig. 7 : Rognon de delvauxite de Berneau, collection S. Puccio.

centimètres, collée contre le calcaire. Ce matériel, visuellement déterminé comme delvauxite, pourrait être celui décrit par Lohest (1883). On le rencontre intimement mêlé à de la jarosite pulvérulente ainsi qu'à de l'halloysite. Cette delvauxite en couche, directement au contact des bancs calcaires, doit être considérée comme secondaire par rapport à celle observée en rognons dans les couches d'argile. De manière assez similaire, à Visé, des rognons de delvauxite ont été piégés dans des poches de dissolution des calcaires dans lesquelles de nouvelles espèces minérales se sont formées. Nous en discuterons à la fin de cet article.

Des analyses par diffraction des rayons X ont été réalisées sur des échantillons historiques provenant de Berneau et de Visé, mais aussi sur du matériel recueilli récemment à Argenteau, le long de la route en zig zag qui monte à Richelle. Le diffractogramme de poudres de rayons X de la delvauxite de Berneau est celui d'un matériel amorphe montrant un pic très large centré sur 2,77 Å, auquel s'associe un semblant de petit pic large autour de 2,56 Å. Le matériel brun résineux d'Argenteau, associé à la jarosite et aux rognons brun ocre recueillis en 1995 au sud de la carrière N, dans la couche d'argile inférieure rouge au contact avec le calcaire, fournissent des diffractogrammes de poudres de rayons X comparables, ce qui confirme ainsi l'identité de ces matières avec la delvauxite. L'analyse chimique qualitative EDS indique la présence des éléments O, Fe, P et Ca, ainsi qu'un peu de silicium très minoritaire ; cette composition chimique est en bon accord avec celle de la delvauxite.

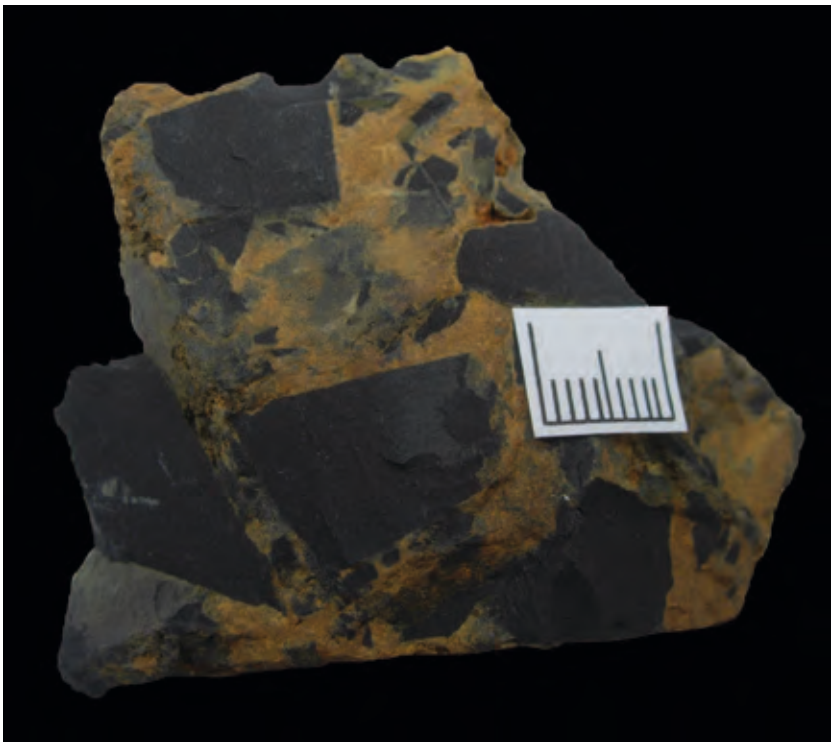
Jarosite, $KFe^{3+}_3(SO_4)_2(OH)_6$

A Argenteau, la jarosite constitue le ciment d'une brèche observée dans un affleurement peu visible se trouvant en contrebas de la route entre le lieu-dit « Au Tourne-Bride » et Richelle. Cet affleurement est situé non loin du contact entre le houiller et la formation de Souvré (= Namurien E2). Les éléments de la brèche sont constitués de roches noires au clivage facile apparaissant comme étant des shales ou des siltites du groupe houiller. Cette jarosite est de couleur orange-brun et peut former des veines parfois pluri-centimétriques (Planche 4). Son aspect est généralement microgrenu mais de minuscules cristaux infra-millimétriques sont visibles à la loupe. Le minéral est identifié par diffraction des rayons X et par des analyses chimiques qualitatives EDS qui mettent en évidence les éléments majoritaires O, Fe, S et K. La présence de silicium très minoritaire est également observée mais il s'agit probablement d'une contamination de surface. En microscopie électronique, le minéral est vu comme constitué d'un grand nombre de cristaux d'aspect rhomboédrique. En Belgique, la jarosite ne se présente le plus souvent qu'en efflorescences ou en enduits, ce qui n'est pas le cas de cet affleurement où les plages de jarosite sont étendues et de grande pureté.

La jarosite est aussi observée en efflorescences jaunes pulvérulentes sur la delvauxite en couche, au contact du calcaire. La jarosite de cet affleurement avait déjà été signalée et analysée par Van Tassel (1956).

Phosphosidérite, $Fe^{3+}PO_4 \cdot 3H_2O$

A Argenteau, de petits enduits blancs de quelques millimètres, logés dans des cavités du ciment jarositique d'une brèche, sont identifiés par diffraction des rayons X comme étant de la phosphosidérite. Le minéral est friable et a un aspect terreux, ressemblant visuellement à une argile. Contrairement aux abondants enduits blanchâtres de Richelle, le matériel d'Argenteau ne semble pas associé à la strengite.



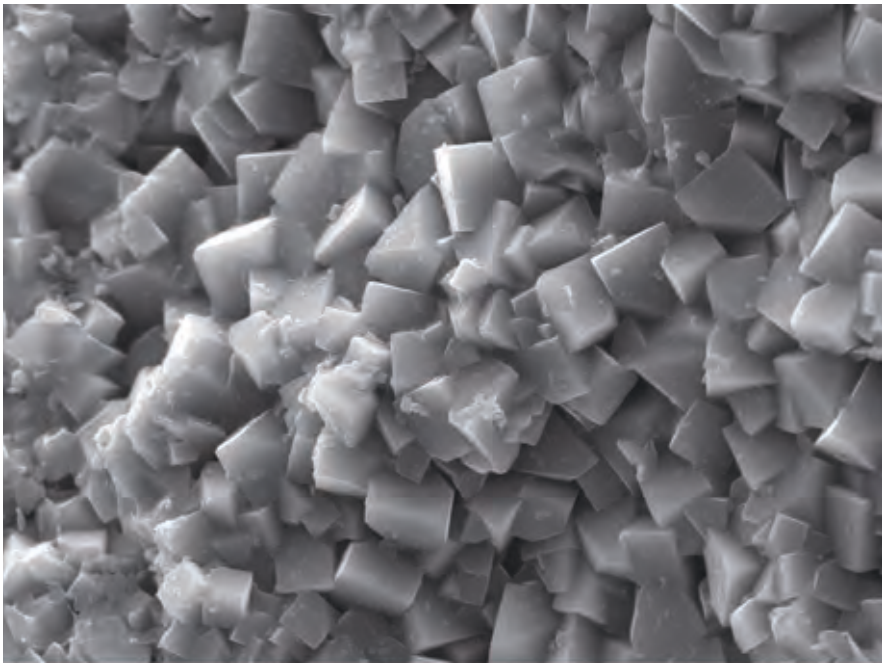


Planche 4 : Jarosite d'Argenteau (4a) jarosite cimentant des fragments anguleux de shales noirs, collection et photo M. Blondieau, largeur de l'image 6cm – (4b) cristaux de jarosite de la brèche d'Argenteau, image MEB de l'échantillon RIC 6.

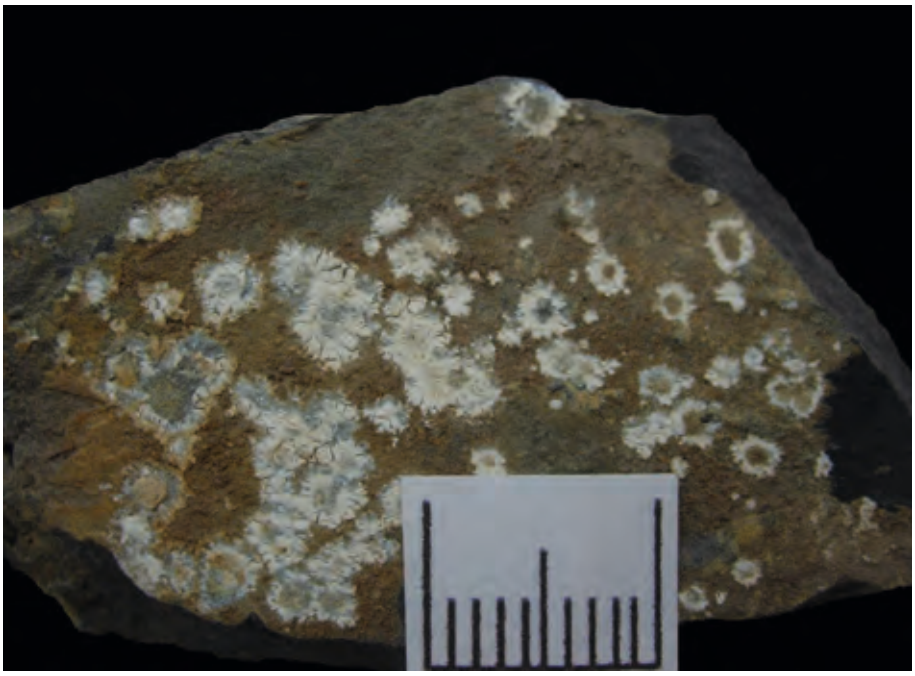


Fig. 8 : Phosphosidérite d'Argenteau, collection et photo M. Blondieau, largeur de l'image 4cm.

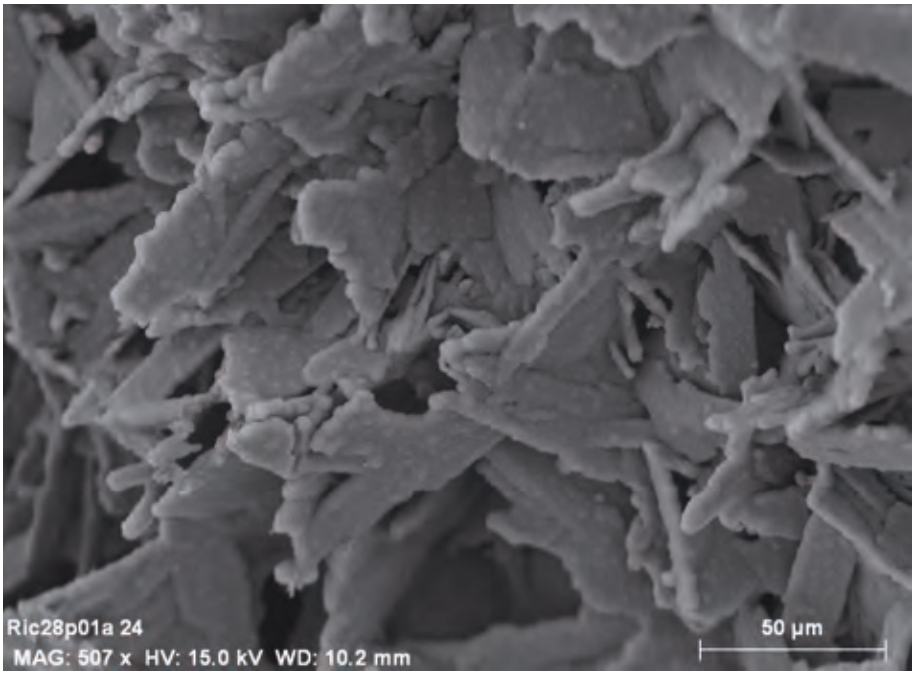


Fig. 9 : Todorokite d'Argenteau, image MEB de l'échantillon RIC 28.

La phosphosidérite, déjà signalée dans les brèches de dissolution à Argenteau et à Richelle, n'avait encore jamais été signalée dans les couches de Namurien de ces localités. La phosphosidérite est également observée dans un nodule de delvauxite de Visé piégé dans une poche de dissolution; nous en parlerons en fin d'article.

Todorokite, $(Na,Ca,K,Ba,Sr)_{1-x}(Mn,Mg,Al)_6O_{12}.3\text{-}4H_2O$

A Argenteau, dans la tranchée réalisée un peu au sud de la carrière N de Richelle en 1995 et où se trouvaient les rognons de destinézite (N°3, Figure 2), un minéral en feuillets brun noir à violacé est observé dans des cavités d'un morceau d'argile imprégné d'oxyde de manganèse noir (Figure 9). Visuellement, le minéral est attribué à la todorokite. Ostwald (1986) indique que la todorokite fournit des raies autour de 9,6 (100), 4,8 (60), 2,4 (50) et 1,4 Å (50). Le minéral d'Argenteau fournit les raies 9,461 (F), 4,745 (F), 2,394 (m) et 1,412 (m), confirmant ainsi l'espèce. Les analyses chimiques qualitatives réalisées par EDS indiquent la présence des éléments majoritaires O, Mn et Fe, ainsi que de Ca, Al, Si, K et Mg minoritaires. Soulignons toutefois que dans la todorokite, il y a relativement peu de fer, ce qui n'est pas le cas du minéral d'Argenteau.

Les minéraux néoformés dans les poches de dissolution des calcaires

En plus des informations collectées dans la littérature, ces espèces néoformées dans les poches de dissolution ont été étudiées sur du matériel récolté à la carrière «J» de Visé lors de nos recherches ainsi que sur des échantillons historiques de richellite conservés dans les collections du Laboratoire de Minéralogie de l'Université de Liège. Les minéraux présents dans les argilites (allophane, halloysite et gibbsite) sont des espèces fort fragiles et l'altération météorique les fait rapidement disparaitre des affleurements.

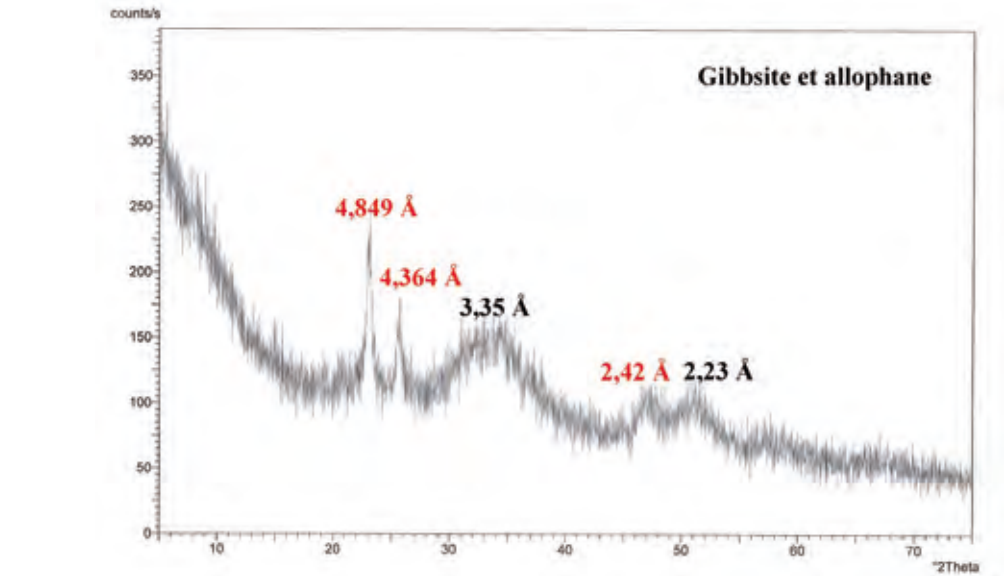
Allophane, $Al_2O_3 \cdot (SiO_2)_{1,3\text{-}2} \cdot (H_2O)_{2,5\text{-}3}$

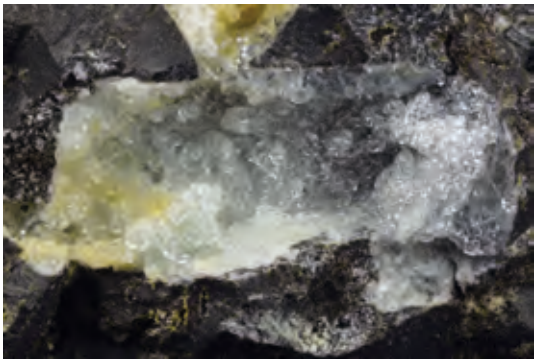
A Visé, Lespineux (1903) signale l'allophane en masses à différents états de pureté dans de l'argile. « L'allophane blanche, la plus pure, se trouvait dans la partie centrale de ces masses alors que l'allophane verte et l'allophane bleue se trouvaient plutôt concentrées au voisinage des parois calcaires. Ces allophanes sont colorées par de la malachite et de l'azurite dont elles sont imprégnées. » Au pied de la poche de dissolution de Visé (Figure 5), nous avons pu ramasser des échantillons d'allophane incolore, blanche ou verte. Elle se présente en petits globules boursouflés sur des croûtes ou petits fragments vitreux de quelques centimètres (Planche 5). L'espèce est confirmée par son diffractogramme de poudres de rayons X ainsi que par des analyses chimiques qualitatives EDS qui mettent en évidence la présence des éléments majoritaires O, Al et Si, ainsi que Ca, Fe et K très minoritaires. On observe également l'allophane en pseudomorphoses d'un minéral inconnu qui formait des cristaux d'apparence octaédrique (Planche 5e). La forme cristalline pourrait laisser à penser qu'il aurait pu s'agir de cuprite, mais aucun argument ne permet d'étayer cette hypothèse.

L'allophane est un minéral qui diffracte très mal mais le diffractogramme de poudres obtenu confirme l'identité du minéral en montrant son caractère amorphe, avec deux pics larges centrés respectivement autour de 3,35 Å et 2,23 Å, ce qui est très proche des valeurs signalées dans la littérature pour ce minéral : 3,30 Å et 2,25 Å (ICDD, fiche 38-449). Les diffractogrammes de poudres réalisés sur nos échantillons indiquent également la présence de trois autres pics plus fins à 4,849, 4,364 et 2,42 Å, que l'on attribue aux trois pics principaux de la gibbsite qui, selon la fiche ICDD 33-18, sont localisés à 4,848 Å (très fort), 4,371 Å (fort) et 2,385 Å (faible) (Planche 5a). A Visé, la gibbsite semble toujours associée à l'allophane même quand cette dernière paraît très pure et bien transparente.

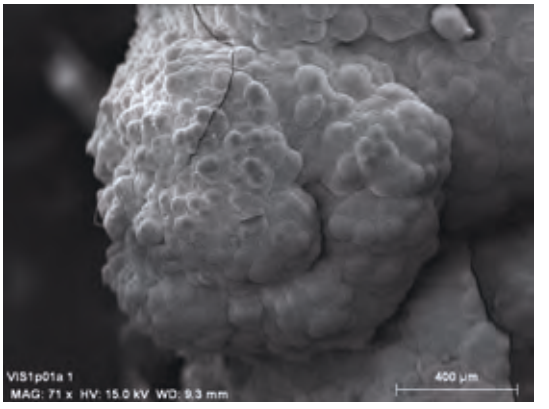
Alumohydrocalcite, $CaAl_2(CO_3)_2(OH)_4 \cdot 3H_2O$

Fransolet & Mélon (1975) signalent la présence d'alumohydrocalcite sur de l'allophane bleutée ou blanchâtre à Visé. Ils décrivent ce minéral comme se présentant en minuscules globules fragiles









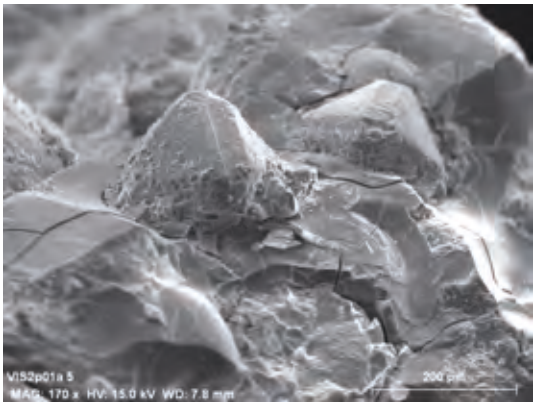


Planche 5 : Allophane de Visé (5a) diffractogramme de poudres de rayons X d'une allophane bleu pâle (rouge = gibbsite, noir = allophane) – (5b) allophane incolore à blanche, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 7,1 mm – (5c) allophane bleutée, collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 4,95 mm - (5d) globule boursouflé d'allophane, image MEB de l'échantillon VIS 1 – (5e) pseudomorphoses de cristaux apparemment octaédriques constitués d'allophane, image MEB de l'échantillon VIS 2.

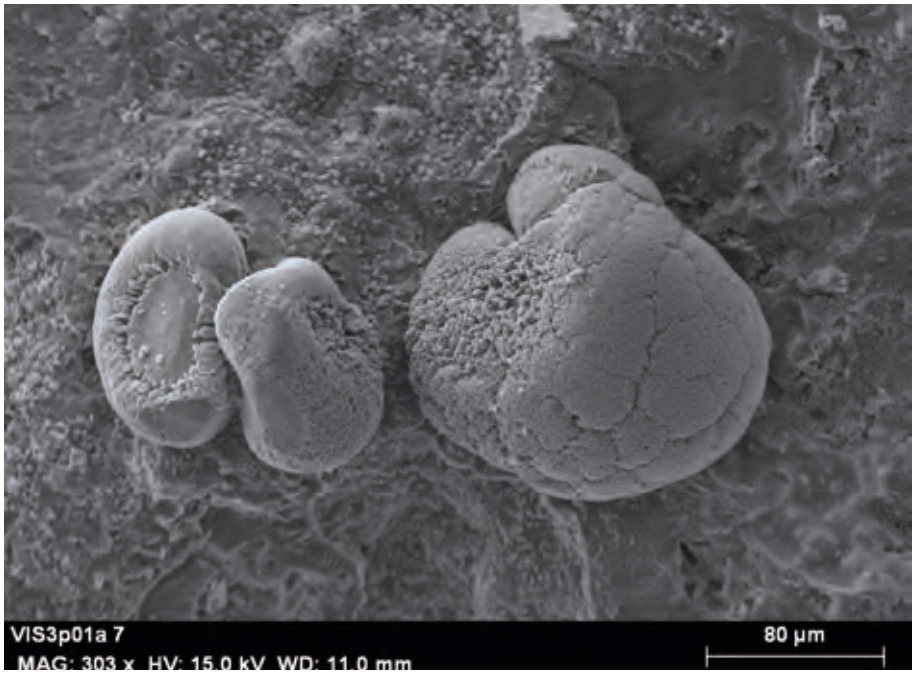


Fig. 10 : Globule de calcite, Visé, image MEB de l'échantillon VIS 3.

d'un diamètre inférieur à 0,5 mm et montrant une structure fibroradiée. Les globules sont blancs avec éclat nacré à apparence talqueuse. Cette espèce n'a pas été retrouvée dans les échantillons collectés récemment.

Calcite, $CaCO_3$

L'analyse par diffraction des rayons X réalisée sur de minuscules globules de l'ordre de 100 micromètres de diamètre (Figure 10), observés sur allophane, montre qu'il s'agit de calcite, ce que confirment les analyses chimiques qualitatives EDS qui indiquent bien la présence des seuls éléments Ca, C et O.

Cuivre natif, Cu, azurite, $Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$, malachite, $Cu_2(CO_3)(OH)_2$, et cuprite, Cu_2O

La chalcopyrite et la malachite sont des espèces déjà recensées dans le calcaire carbonifère (voir ci-dessus). Dans un autre environnement, au fond d'une poche de dissolution des calcaires, Lespineux (1903) (Figure 4) signale l'observation d'un échantillon formé pour la plus grande partie d'une masse argileuse avec allophane bleue et verte associée à des cristaux d'azurite, de la malachite en enduit et d'une parcelle de 3 mm de cuivre natif. Dans une préparation microscopique, la cuprite a également été reconnue en petits cristaux d'un rouge grenat. Ces espèces n'ont pas pu être retrouvées lors de nos récoltes récentes.

Cesàro (1896) décrit un échantillon d'azurite de ce gisement, conservé dans les collections de l'Université de Liège (n°3790). Il précise l'existence de petits cristaux très nets mais avec des faces très rarement réfléchissantes. Il a illustré un de ces cristaux atteignant à peine un demi-millimètre, et nous reprenons la morphologie qu'il a publiée (Planche 6a). Il ajoute également : «… les cristaux de plus grande dimension ne peuvent fournir aucune mesure car ils sont formé par l'assemblage de petits cristaux joints à axes imparfaitement parallèles.»

Gibbsite, $Al(OH)_3$

La gibbsite est intimement associée à l'allophane mais se présente également en fine croûte vert pâle de

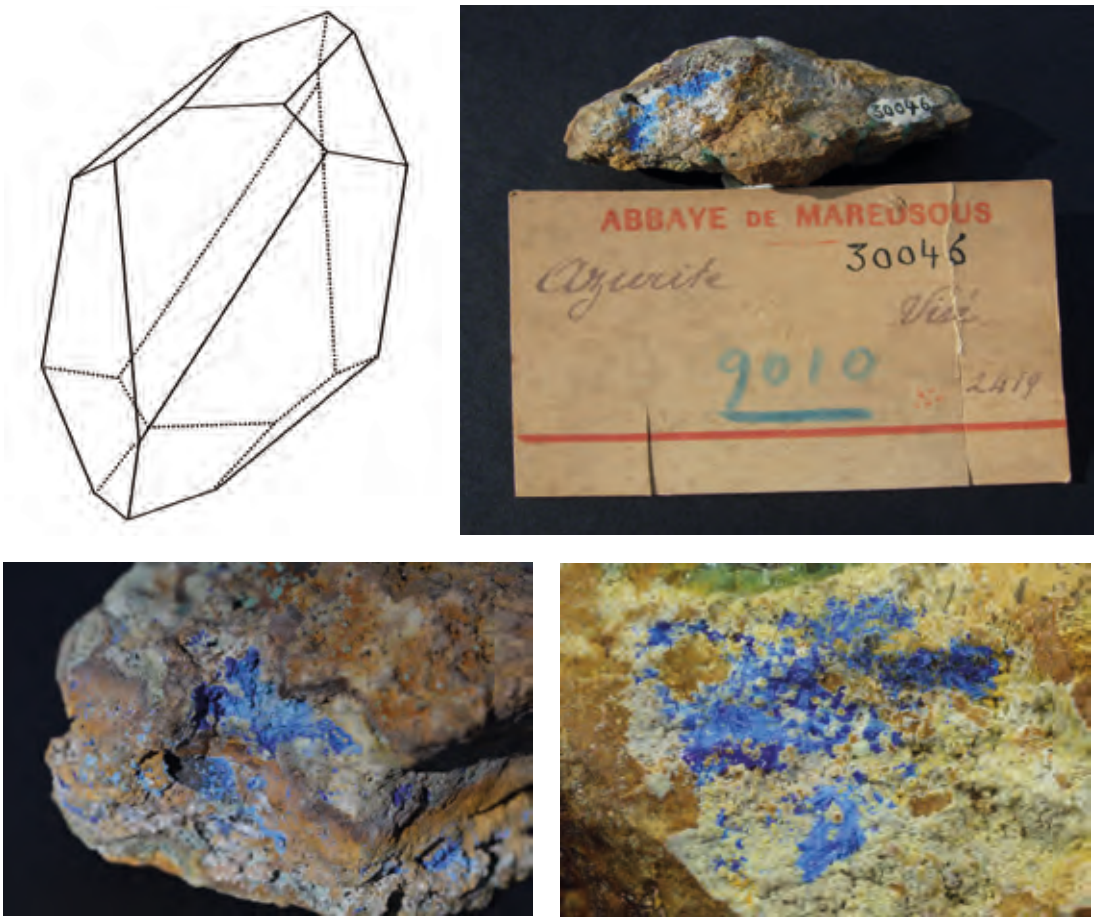


Planche 6 : Azurite de Visé (6a) morphologie d'un cristal dessinée par Cesàro (1896) – (6b) échantillon ULG 9010 – (6c) échantillon ULG 9002 – (6d) échantillon de la collection S. Puccio, photo P.Chollet, largeur de l'image 6,6 mm.

structure fibreuse. Elle a été également reconnue en petites boules avec bâtonnets blancs sur un échantillon provenant d'une vieille collection (Planche 7). Son identification est confirmée par diffraction des rayons X. Les radiogrammes de poudre indiquent la présence des trois raies principales de l'espèce à 4,848 Å (très fort), 4,371 Å (fort) et 2,385 Å (faible). Les analyses chimiques qualitatives EDS indiquent des compositions chimiques comparables pour les fines croûtes, les boules et les bâtonnets, qui sont tous constitués majoritairement d'oxygène et d'aluminium, confirmant ainsi l'identification de l'espèce. On observe également de manière très minoritaire du silicium, sans doute attribuable à l'allophane qui accompagne le minéral.

La gibbsite n'était pas encore signalée à Visé. En Belgique, et dans un contexte assez comparable à celui de Visé, l'espèce a été aussi reconnue à Beez (Blondieau et al. 2012) avec allophane et halloysite.

Goethite, α-FeO(OH)

Des petites boules brunes à noires de taille submillimétrique (0,2 mm) et montrant sur cassure une structure radiée sont observées dans l'allophane (Figure 11). Les analyses chimiques qualitatives EDS indiquent la seule présence des éléments Fe et O ; il s'agit vraisemblablement de goethite.

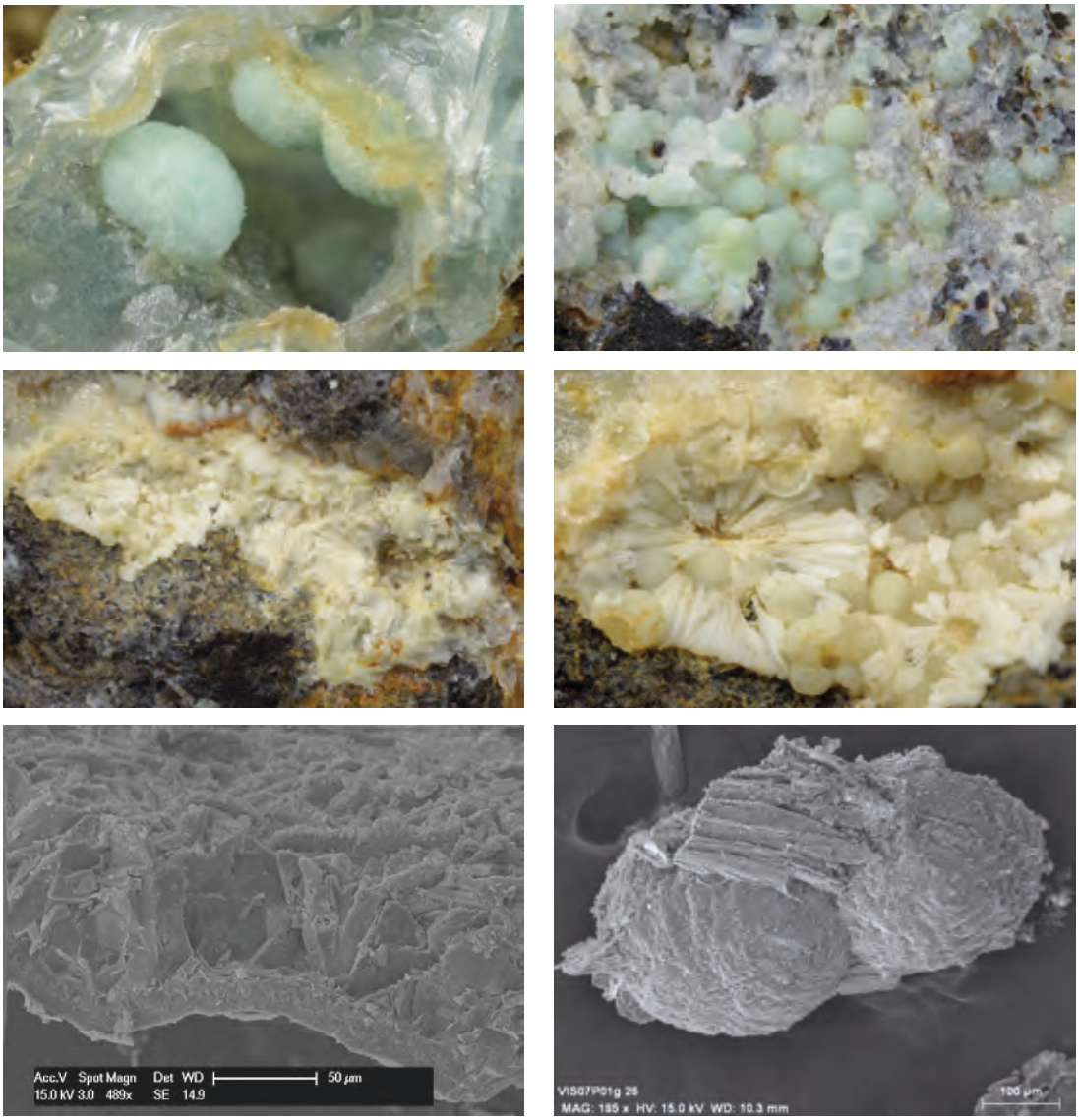


Planche 7 : Gibbsite de Visé – (7a) globules vert pâle sur allophane, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 2,85 mm – (7b) ensemble de globules vert pâle sur allophane incolore, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 3,95 mm – (7c) boules et lattes blanches de gibbsite, collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 9,1 mm – (7d) idem, collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 3,2 mm – (7e) structure des lattes blanches de gibbsite de Visé, image MEB de l'échantillon VIS 08 – (7f) boules et lattes de gibbsite de Visé, image MEB de l'échantillon VIS 07.

Halloysite, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$

A Visé, de la matière blanche associée à un échantillon d'allophane que nous avons collecté, a été analysée par diffraction des rayons X et elle s'est avérée être de l'halloysite. A Argenteau, l'halloysite signalée dans la poche à richellite, n'est plus observable. Toutefois, de l'halloysite en masse blanche très pure est encore observable dans la zone de contact entre le namurien et le calcaire viséen, là où de la delvauxite secondaire s'est formée en une couche d'épaisseur centimétrique,

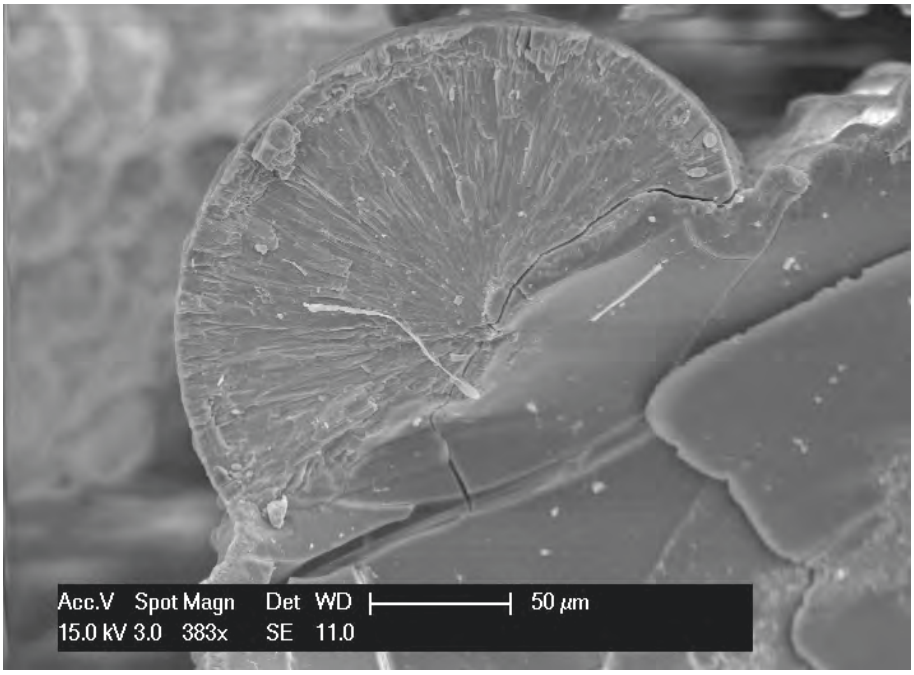


Fig. 11 : Goethite de Visé, images MEB de l'échantillon VIS 1.

selon un processus proche de celui impliqué dans les poches de dissolution. Cette halloysite est identifiée par diffraction des rayons X. A Richelle, un échantillon très abîmé d'halloysite a été retrouvé à la carrière N. L'halloysite est une espèce très fragile qui disparait rapidement des affleurements soumis aux agents météorologiques (Figure 12).

Koninckite, $Fe^{3+}PO_4 \cdot 3H_2O$

La koninckite est l'une des cinq espèces minérales pour lesquelles la commune actuelle de Visé est la localité-type. Cesàro (1884) l'a observée associée à la richellite dans la fameuse poche d'Argenteau (Figure 6). Cet auteur précise que la koninckite s'y présente en globules ou demi-sphères brun pâle fibroradiées ne dépassant pas 0,5 mm de diamètre (Planche 8). Il ajoute que la teinte brune de surface est probablement due à une pellicule de richellite car dans la cassure, la couleur est d'un blanc légèrement rosé et l'éclat est vitreux.

Richellite, $CaFe^{+3}_3(PO_4)_3(OH)_2 \cdot 9H_2O$

La richellite de la localité-type (en fait Argenteau mais le gisement ne se trouve qu'à une bonne centaine de mètres seulement des anciennes limites communales de Richelle) est décrite par Cesàro & Despret (1883) (Figure 6). Les échantillons historiques montrent des faciès variables : compact, stratoïde, mamelonné, coralloïde ou terreux (Planche 9). La couleur se décline dans les tons jaunes crème ou jaune d'ocre clair. Cesàro (1884) reconnaît le caractère amorphe de ce minéral d'éclat résineux et ne montrant aucun clivage, ce qui sera confirmé plus tard par des analyses par diffraction des rayons X.

Au cours de nos recherches, nous avons eu la chance de pouvoir disposer d'échantillons historiques, les échantillons N°1243 et 9362 conservés au Laboratoire de Minéralogie de l'Université de Liège. L'échantillon de richellite N°1243 avait été analysé chimiquement en 1975 par J.M. Speetjens, et ces résultats avaient été publiés par Mélon et al. (1976) dans le premier tome «Les minéraux de Belgique». Ils ont fourni formule idéalisée $CaFe^{3+}_3(PO_4)_3(OH)_2 \cdot 9 H_2O$, qui est reprise en tête de rubrique. Cette formule est différente de celle reconnue par l'I.M.A.

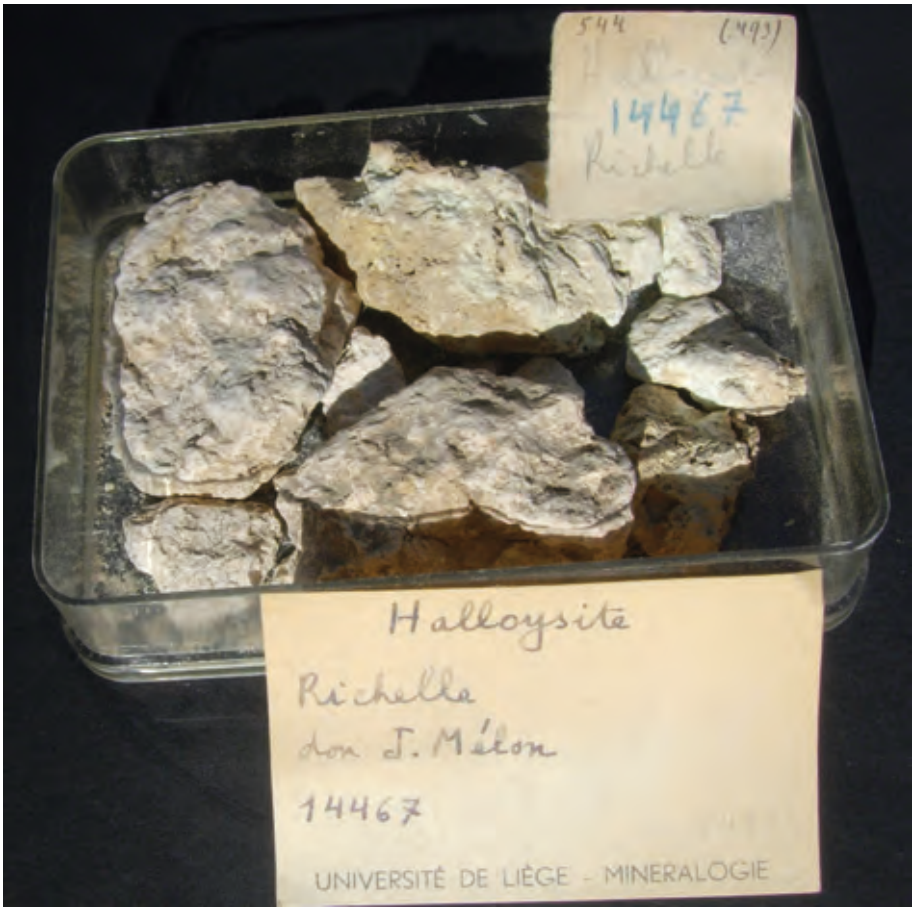


Fig. 12 : Halloysite de Richelle, ULG 14467.

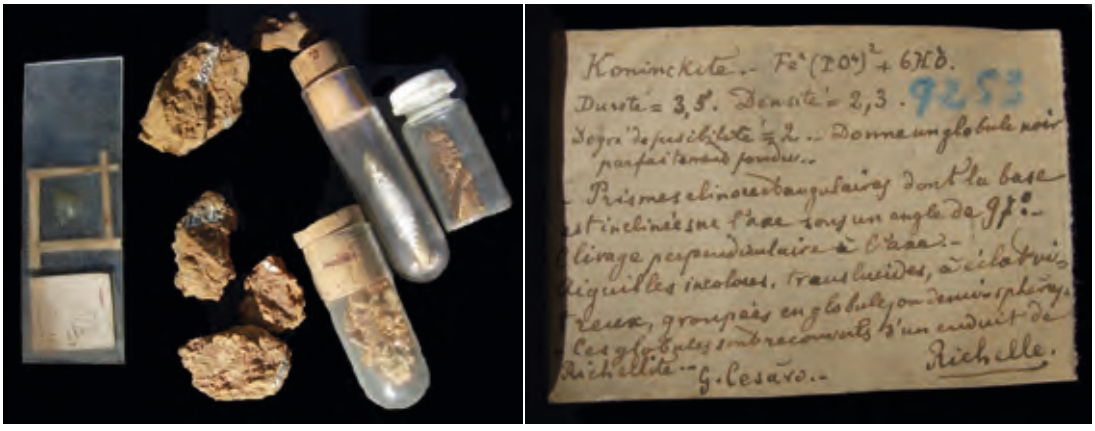


Planche 8 : Koninckite de Richelle (en fait d'Argenteau) (8a) Echantillons étudiés par G. Cesàro, ULG 9253 – (8b) Description de la main de G. Cesàro.



Planche 9 : Richellite de Richelle (en fait d'Argenteau) (9a) faciès massif, échantillon ULG 9256 – (9b) contact avec le gravier du fond de la poche, échantillon ULG 9361 – (9c) faciès stratoïde, échantillon ULG 9256 – (9d) échantillon ULG 1243, à partir duquel les analyses ont été réalisées.

Les minéraux des poches à delvauxite dans le calcaire viséen à Visé

Delvauxite et phosphosidérite

Une analyse par diffraction des rayons X d'une veinule de couleur grise et d'épaisseur millimétrique traversant un nodule de delvauxite de Visé (échantillon d'une ancienne collection dont le diffractogramme de poudres est fort proche de la delvauxite de Berneau) indique qu'elle est constituée de phosphosidérite bien cristalline et de strengite fort minoritaire.

Le matériel brun marron de remplissage, observé dans le ciment de la brèche de la carrière K de Visé, a été diffracté ; il s'agit d'une delvauxite avec amorces de cristallisation de phosphosidérite et de strengite. Ces associations de phosphosidérite/strengite et de delvauxite n'avaient jamais été signalées et autorisent un regard neuf sur la genèse de ces minéralisations. Nous en discuterons en détail à la fin de cet article.

Delvauxite en pseudomorphoses de cristaux de gypse, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, avec richellite

La delvauxite se présente habituellement en rognons brun marron bien caractéristiques mais Cesàro (1884) la signale également à Visé en pseudomorphoses de petits cristaux de gypse sur des échantillons de delvauxite impure. Il indique que ces cristaux, qui ne dépassent que rarement 2 mm, sont vides à l'intérieur mais présentent l'aspect général d'un cristal de gypse, lequel a été complètement dissous. A Visé, dans la carrière K, nous avons également pu observer des cristaux de quelques millimètres pseudomorphosés en une matière brune qui se craquèle rapidement (Figure 13). Il doit s'agir d'un matériel analogue à celui décrit par Cesàro (1884). Ces pseudomorphoses brunes sont partiellement couvertes d'un enduit beige qui ne se craquèle pas et qui est attribué à de la richellite.

Fluorapatite, $Ca_5(PO_4)_3(F,OH,Cl)$

Provenant d'une ancienne collection, des croûtes avec globules de couleur miel posées sur un matériel brun craquelé constitué vraisemblablement de delvauxite fournissent un diffractogramme avec des pics peu intenses appartenant à l'apatite (Planche 10). Les analyses chimiques qualitatives EDS montrent la présence des seuls éléments O, Ca, P et F, indiquant qu'il s'agit de fluorapatite. La faible intensité des pics de diffraction pourrait indiquer qu'il s'agit d'une phase relativement mal cristallisée.

Ferristrunzite, $Fe^{3+}Fe^{3+}_2(PO_4)_2(OH)_3 \cdot 5H_2O$

Dans le ciment rougeâtre phosphaté de la brèche de la carrière K de Visé, on a pu observer à la loupe de nombreux petits cristaux fibreux de couleur beige à brun-rouge. Les diffractogrammes de poudres mettent en évidence la ferristrunzite, minéral non encore signalé dans le massif calcaire



Fig. 13 : Delvauxite et richellite en pseudomorphoses de cristaux de gypse (?), carrière K de Visé. La delvauxite craquelée est bien visible sur la gauche de l'image. La richellite, de couleur beige, recouvre partiellement la delvauxite et solidifie les pseudomorphoses. Collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 6,65 mm.

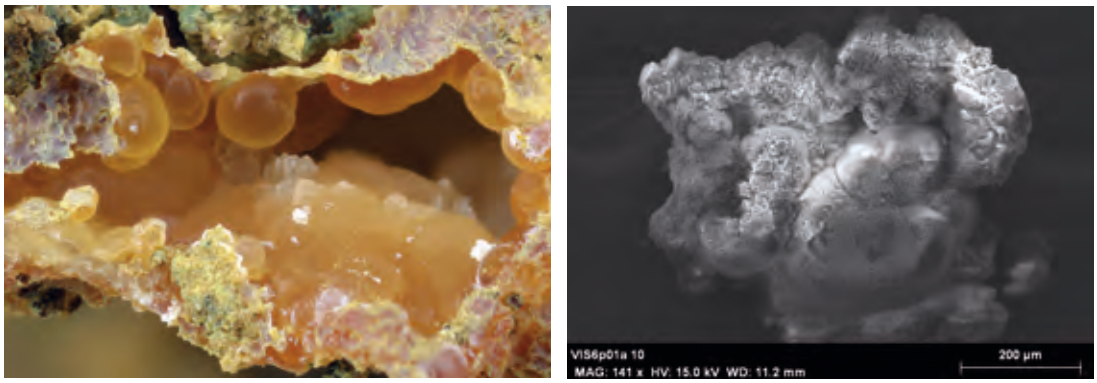


Planche 10 : Fluorapatite en boules orangées, carrière K de Visé (10a) boules orange, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 2,2 mm – (10b) boule de fluorapatite orange de visé, image MEB, échantillon VIS 6.

de Visé. L'aspect visuel du minéral est fort comparable à la ferristrunzite de Blaton si ce n'est que le matériel de Visé paraît tâché de brun-rouge par des oxydes de fer et qu'il est parfois associé à des pseudomorphoses de gypse en delvauxite et en richellite (Planche 11). La couleur beige typique de la ferristrunzite ne s'observe que dans les joints les plus étroits, là où l'altération météorique est la moins avancée.

Pascal Chollet, qui a réalisé les microphotographies illustrant cet article, a remarqué un changement de couleur de ce minéral qui est vu jaune paille sous éclairage LED et rosé sous éclairage incandescent (lampe halogène au tungstène ; Planche 11b, c). La couleur la plus fidèle à celle observée en lumière naturelle est donnée par les photos réalisées sous éclairage LED.

Les analyses chimiques qualitatives EDS, réalisées sur les cristaux beiges, indiquent la présence des éléments majoritaires O, Fe et P, et confirment l'identification du minéral. On remarque aussi la présence très minoritaire de Ca. Les cristaux brun rouge plus corrodés ont une composition chimique fort comparable pour tous les éléments chimiques, hormis le phosphore qui semble deux fois moins abondant. On peut en rendre compte si on admet la formation de goethite sur la ferristrunzite altérée.

La brèche sédimentaire à ferristrunzite est constituée essentiellement d'argile mêlée à de nombreux petits quartz bi-terminés (au plus millimétriques mais généralement de quelques centaines de micromètres) provenant de l'attaque chimique de calcaires silicifiés. L'ensemble est peu induré mais durci localement par le dépôt de richellite et de delvauxite sur lesquels s'est formée la ferristrunzite.

Viséite, $Ca_{10}Al_{24}(SiO_4)_6(PO_4)_7O_{22}F_3 \cdot 72\ H_2O$ (?)

Mélon (1942) a réalisé l'analyse d'un minéral repéré par G. Cesàro dans des échantillons de delvauxite de Visé (Figure 14). Ce nouveau minéral est nommé «viséite» et voici la description qu'il en donne : «La viséite se présente en petites masses mamelonnées, translucides, blanches, blanc-bleuâtres ou blanc-jaunâtres rappelant la smithsonite. []… Au microscope, le minéral est parfaitement transparent et homogène et ressemble au verre. Il est isotrope et ne présente pas de trace de clivage»… L'analyse chimique du minéral indique qu'il renferme du phosphore, de l'aluminium, du calcium et du silicium. Le minéral est amorphe mais parfois parsemé de petits nodules fibro-radiés, dont l'identification n'est pas réalisée.

Mc Connell (1952), sur base d'analyses par diffraction des rayons X, estime que la viséite est analogue à l'analcime et appartiendrait donc au groupe des zéolites, ce que Di Renzo & Gabelica (1995) réfutent.

Un minéral en croûte verte trouvé dans la carrière M de Richelle et que nous attribuons à la crandallite (voir la rubrique crandallite) fournit un diffractogramme en tous points comparable à celui fourni par un échantillon du lot de ceux analysés par Di Renzo & Gabelica (1995) et attribués à la viséite. De plus, l'imagerie en microscopie électro-

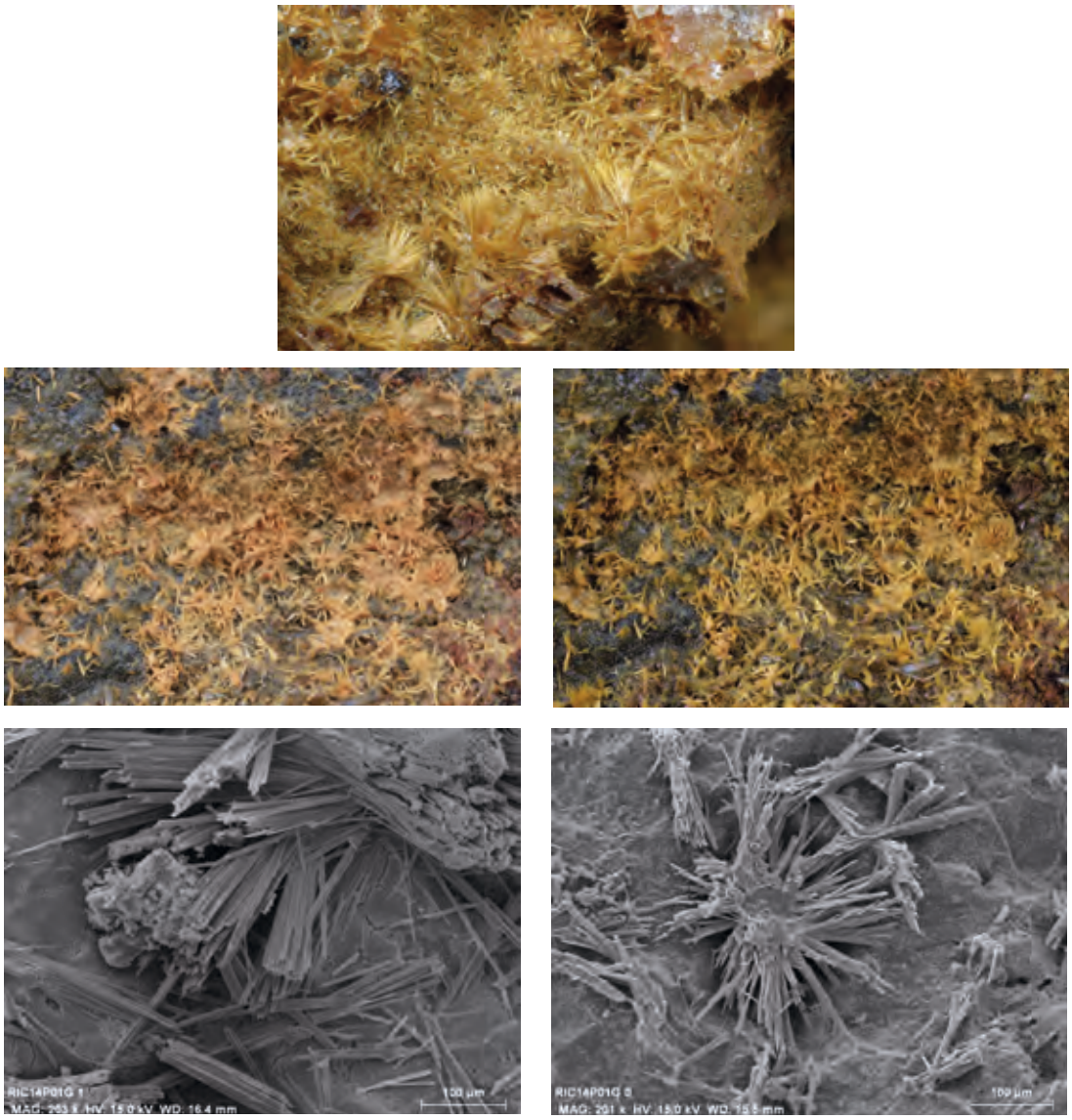


Planche 11 : Ferristrunzite de Visé (11a) échantillon de la collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 2,75 mm – (11b) échantillon vu sous un éclairage LED, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 4,1 mm – (11c) le même échantillon vu sous un éclairage incandescent (tungstène), collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 4,1 mm – (11d) cristaux de ferristrunzite de couleur beige, image MEB de l'échantillon RIC 15 – (11e) cristaux de ferristrunzite plus altérée de couleur brun rouge, image MEB de l'échantillon RIC 14.

nique de notre matériel est tout à fait comparable aux photos publiées par ces auteurs qui considèrent la viséite comme une crandallite riche en silicium. Mais ces études n'ont pas été menées sur des échantillons holotypes mais sur des récoltes faites dans les années '70 ; la viséite reste encore un minéral mal défini.

Les minéraux des brèches de dissolution radioactives d'Argenteau et de Richelle

Les brèches de dissolution phosphatées et radioactives d'Argenteau et de Richelle se caractérisent



Fig. 14 : Echantillon holotype de viséite, ULG 9476.

par un très grand nombre d'espèces minérales appartenant à la classe des phosphates. Pour cette raison, nous avons trouvé intéressant de les regrouper dans une première rubrique avant la description des autres espèces.

Les phosphates

Richelle est la localité-type de trois espèces minérales appartenant à la classe des phosphates : La koninckite, la richellite et la drugmannite. Avec ses 28 espèces, cette classe minérale est fort bien représentée dans le massif de Visé. Le phosphore a été mobilisé par les eaux météoriques percolant la brèche viséo-namurienne riche en sédiments et nodules phosphatés. Le soufre et le fer l'ont été aux dépens de pyrites disséminées dans ces mêmes couches et l'aluminium provient de l'altération de minéraux argileux ou micacés. Enfin le calcium a été mobilisé par le contact des solutions minéralisantes (acides) avec l'encaissant calcaire. Ces éléments principaux (P, S, Fe, Ca, Al), associés aussi au fluor, composent près de deux tiers des phosphates observés dans les brèches de Richelle et d'Argenteau. Ainsi, au moins sept phosphates ne renferment que le fer comme cation majoritaire et, le plus souvent, sous sa forme la plus oxydée, Fe^{3+}. Trois de ces espèces sont des polymorphes de phosphates de fer III : la phosphosidérite, la strengite et la koninckite. Trois autres espèces sont des phosphates de fer basiques : la béraunite, la cacoxenite et la ferristrunzite. Une seule espèce est un phosphate de fer II : la vivianite. De même, six phosphates renferment l'aluminium comme cation majoritaire : l'évansite, la fluellite, la mitryaevaite et la wavellite, ainsi que la crandallite et la minyulite, ces deux dernières renfermant aussi respectivement du calcium et du potassium.

Enfin quelques autres éléments chimiques complètent le cocktail chimique de ces brèches : le cuivre, le plomb, le molybdène, l'uranium et le zinc. On les retrouve dans la composition d'une dizaine d'espèces de phosphates. Finalement, les nombreuses espèces de phosphates observées à Argenteau et Richelle se sont formées à partir d'un nombre d'éléments chimiques fort limité.

Autunite, $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 11H_2O$ et méta-autunite, $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 6{,}5H_2O$

A Argenteau, Van Tassel (1959a) décrit la méta-autunite en nids de minuscules cristaux (10 à 20 μm) ou en cristaux isolés atteignant 150 μm. Cet

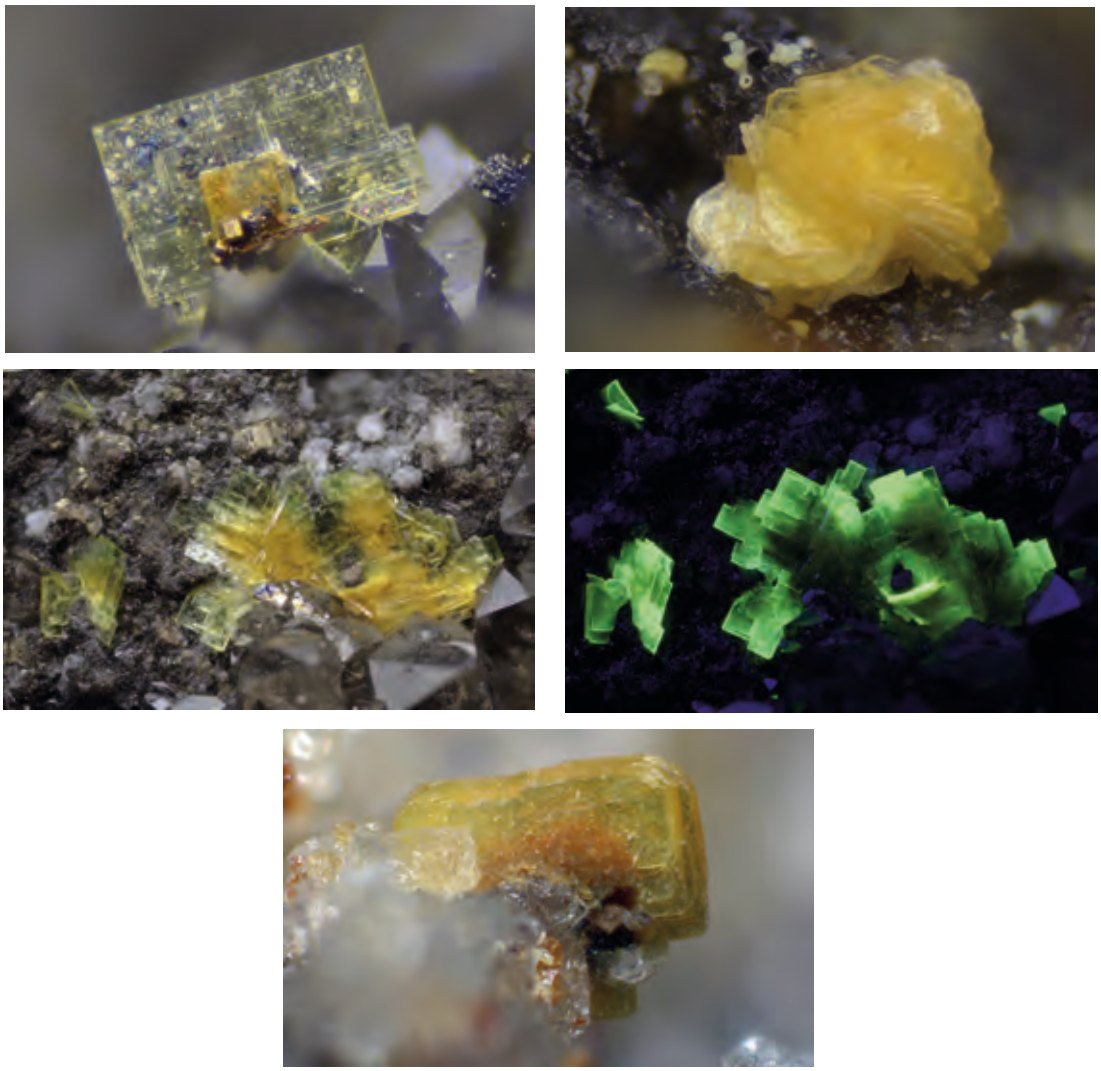


Planche 12 : Autunite de Richelle (12a) cristal très mince avec minuscule cube de pyrite, sur quartz, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 0,50 mm – (12b) groupe de cristaux, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 0,60 mm – (12c) beau groupe de cristaux, collection S. Puccio photo P. Chollet, largeur de l'image 1,1 mm – (12d) agrégat de cristaux, collection M. Blondieau, photos P. Chollet, largeur de l'image 2,05 mm – (12e) même échantillon en lumière ultraviolette, montrant la forte fluorescence.

auteur avait repéré les cristaux en utilisant une lampe ultra-violette ; cette méthode permet encore de récolter le minéral aujourd'hui. La fluorescence est observée en ondes longues mais aussi en ondes courtes.

A Richelle, dans la fraction lourde de la brèche de la carrière N', Van Tassel (1959a) a observé d'autres cristaux, tabulaires ou en barillets, atteignant 1,5 mm.

Ces cristaux montrent des zones fluorescentes alors que d'autres zones ne le sont pas. Il y a, dans un même cristal, des zones d'autunite associées à des zones de torbernite. Les analyses par diffraction des rayons X ont permis de mettre en évidence l'autunite mais aussi la meta-autunite, qui se forme très rapidement par déshydratation de la première (Van Tassel, 1959a). Fransolet et al. (1974a) signalent aussi

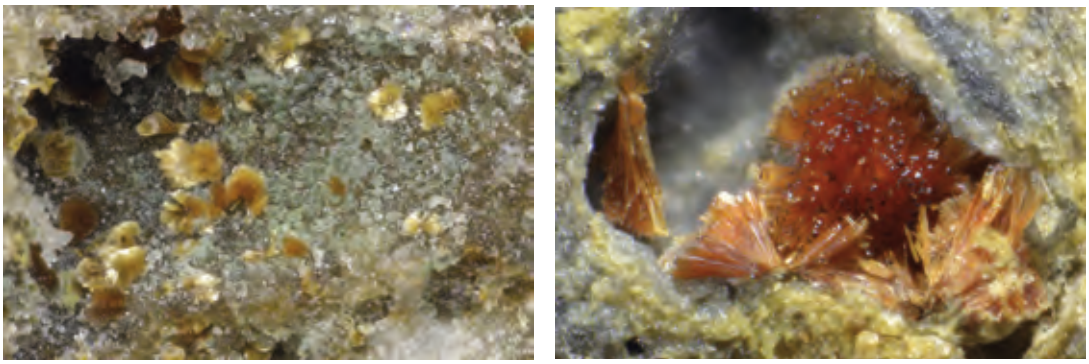


Planche 13 : Béraunite de Richelle – (13a) petites touffes brunes, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 2,0 mm – (13b) groupe très rouge de béraunite (éléonorite ?), collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 0,85 mm.

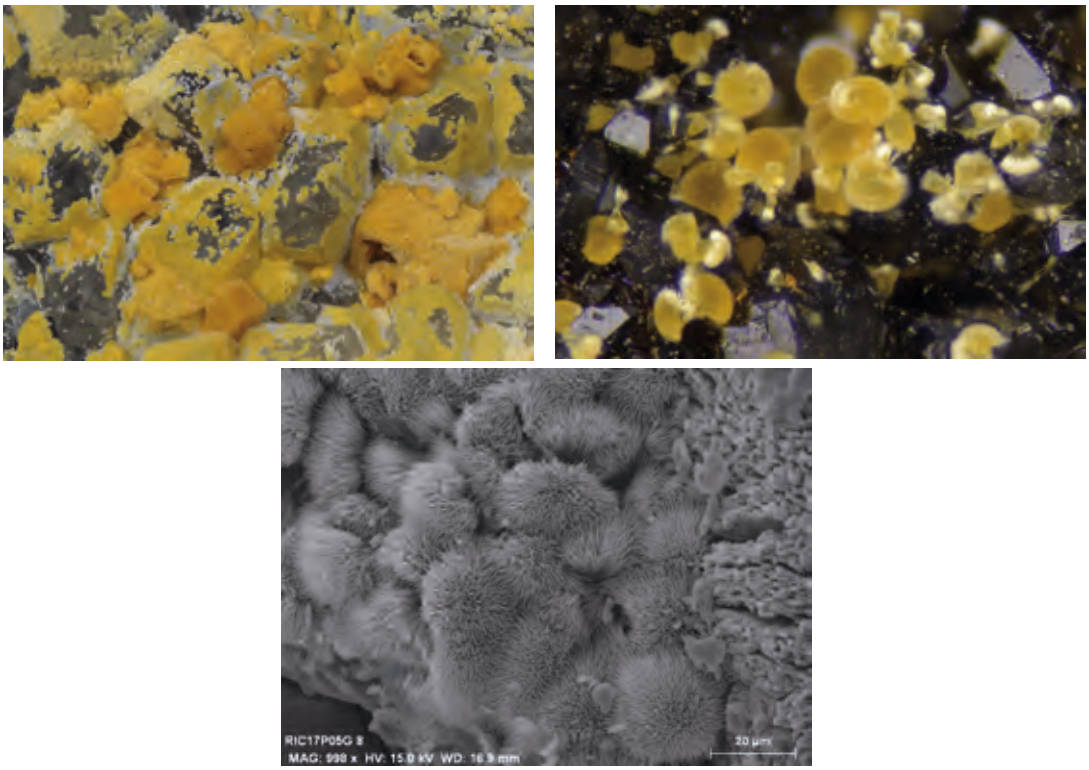


Planche 14 : Cacoxénite de Richelle (14a) minuscule feutrage de cacoxénite sur quartz et sur pseudomorphoses cubiques, collection M. Blondieau photo P. Chollet, largeur de l'image 4,0 mm – (14b) petites boules sur quartz noir, collection M. Blondieau photo P. Chollet, largeur de l'image 0,8 mm – (14c) oursins fibreux de cacoxénite, image MEB de l'échantillon RIC 17.

l'autunite à la carrière N mais ne la décrivent pas. Aujourd'hui, il est encore possible d'observer l'autunite en cristaux millimétriques tabulaires dans la brèche siliceuse grise des carrières N et N' (Planche 12). Nous n'avons cependant pas retrouvé de cristaux en barillets ni de cristaux mixtes d'autunite et de torbernite comme signalé dans la littérature.

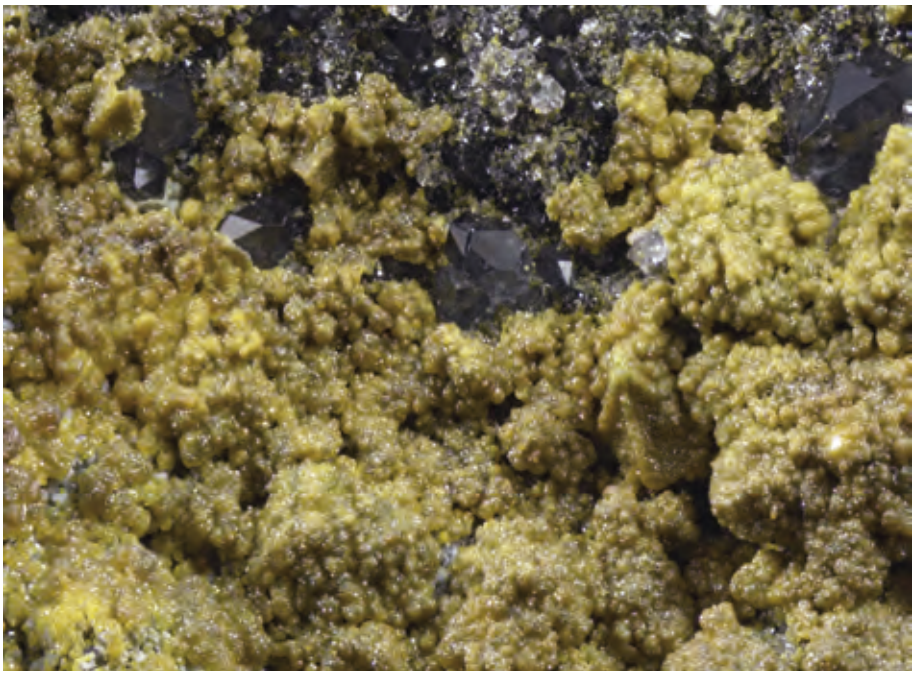


Fig.15 : Corkite de Richelle, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 4,15 mm.

Béraunite, $Fe^{2+}Fe^{3+}_5(PO_4)_4(OH)_5 \cdot 4H_2O$

La béraunite est signalée à Richelle en petites rosettes d'un diamètre de 0,1 mm par Hatert et al. (2002) qui indiquent que l'espèce a été identifiée par diffraction des rayons X. Le minéral semble fort rare car nous ne l'avons pas retrouvé lors de nos recherches. Les échantillons photographiés ci-dessous proviennent d'anciennes collections. La couleur très rouge de certains échantillons pourrait laisser à penser qu'il pourrait s'agir également d'éléonorite, une espèce reconnue récemment par l'IMA.

Cacoxénite, $AlFe^{3+}_{24}(PO_4)_{17}O_6(OH)_{12} \cdot 75H_2O$

Dans la carrière N' de Richelle, Van Tassel (1959b) a observé la cacoxénite en minuscules globules de 25 à 75 µm de diamètre, à surface lisse, en contact avec des cristaux de quartz noir. La couleur est jaune-miel à brune. Dans cette carrière, le minéral a été retrouvé par Yves Jockin dans un bloc de brèche grise silicifiée. Fransolet et al. (1974a) signalent également la cacoxénite dans la carrière N, mais ils ne la décrivent pas en détail. Nous l'avons observée aussi dans cette carrière, notamment en pseudomorphoses de cristaux apparemment cubiques (pyrite ?) (Planche 14). Elle s'y présente souvent aussi en enduits jaunes très minces, sur des pellicules blanches de l'association phosphosidérite-strengite, avec parfois torbernite. Le minéral a également été observé en minuscules oursins accompagnant une boule verte constituée de petits cristaux de torbernite. L'analyse chimique qualitative EDS réalisée sur ces oursins indique bien la présence des éléments majoritaires O, Fe et P, avec Al minoritaire, ce qui confirme l'identification de l'espèce.

Corkite, $PbFe^{3+}_3(P_{0,5}S_{0,5}O_4)_2(OH)_6$, et hinsdalite, $(Pb,Sr)Al_3(PO_4)(SO_4)(OH)_6$

A la carrière N de Richelle, la corkite est observée par Fransolet et al. (1977) sur des roches siliceuses très noires et très dures («phtanites»), en association avec la galène très altérée. Ces auteurs précisent que la corkite se présente sous différentes formes : pellicule brune couvrant

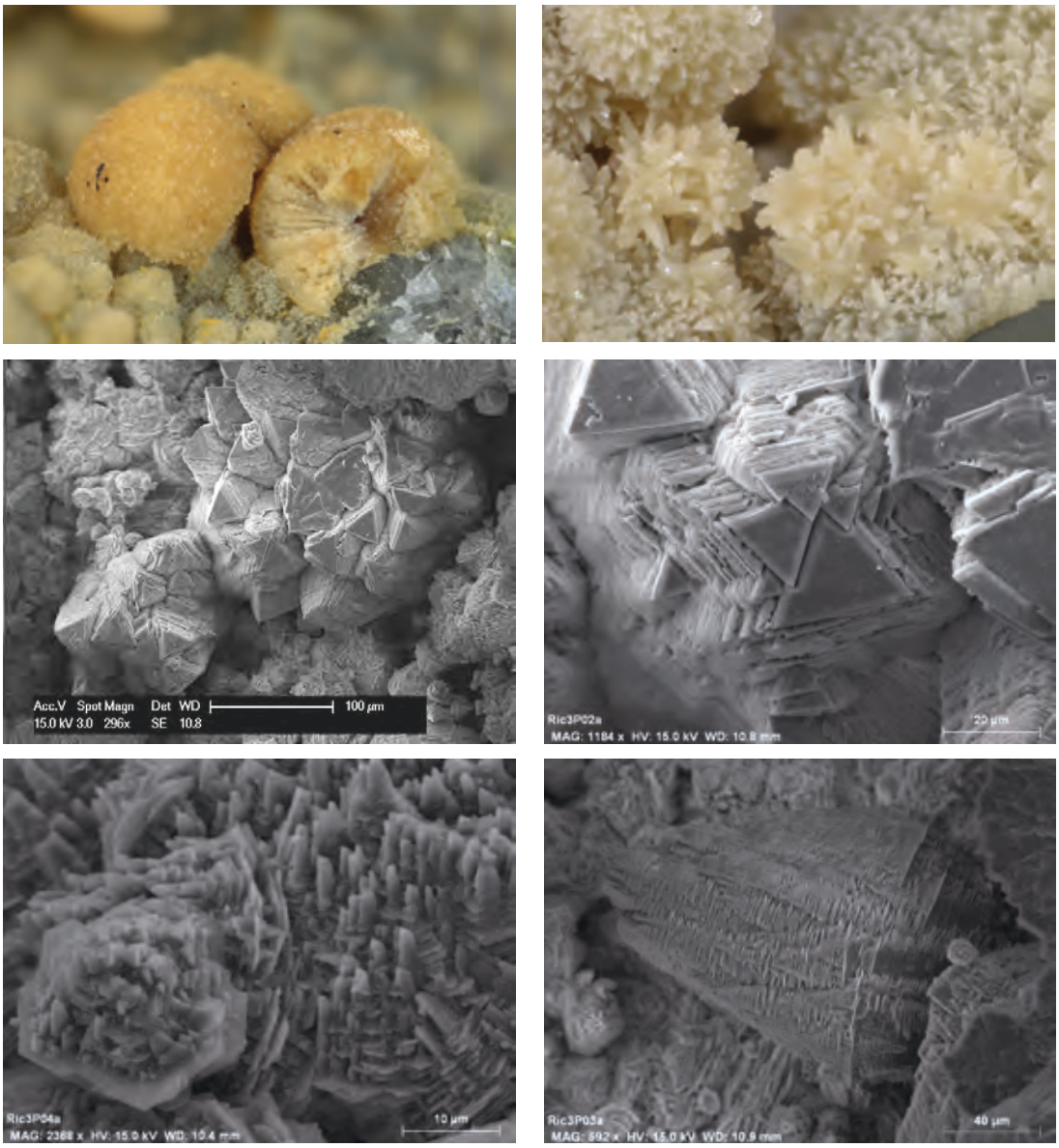


Planche 15 : Crandallite de Richelle (15a) belles boules sur quartz, collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 2,75 mm – (15b) cristaux, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,3 mm – (15c et d) images MEB mettant en évidence les faces triangulaires sur l'échantillon RIC 3 (15e et f) images MEB de l'échantillon RIC 3.

la phosphosidérite et des cristaux de quartz, sphérules brunes de 40 µm dans une matrice blanche compacte de phosphosidérite, globules jusqu'à 80 µm sur pyromorphite ou quartz, agglomérats de 40 µm constitués de petits cristaux bruns rhomboédriques. Les analyses chimiques et radiogrammes de poudre du minéral semblent indiquer la coexistence intime de hinsdalite avec la corkite, mais cette présence n'est admise qu'avec une certaine réserve. L'échantillon de la Figure 15 a été contrôlé par diffraction des rayons X, et il s'agit bien de corkite, ce qui est également confirmé par

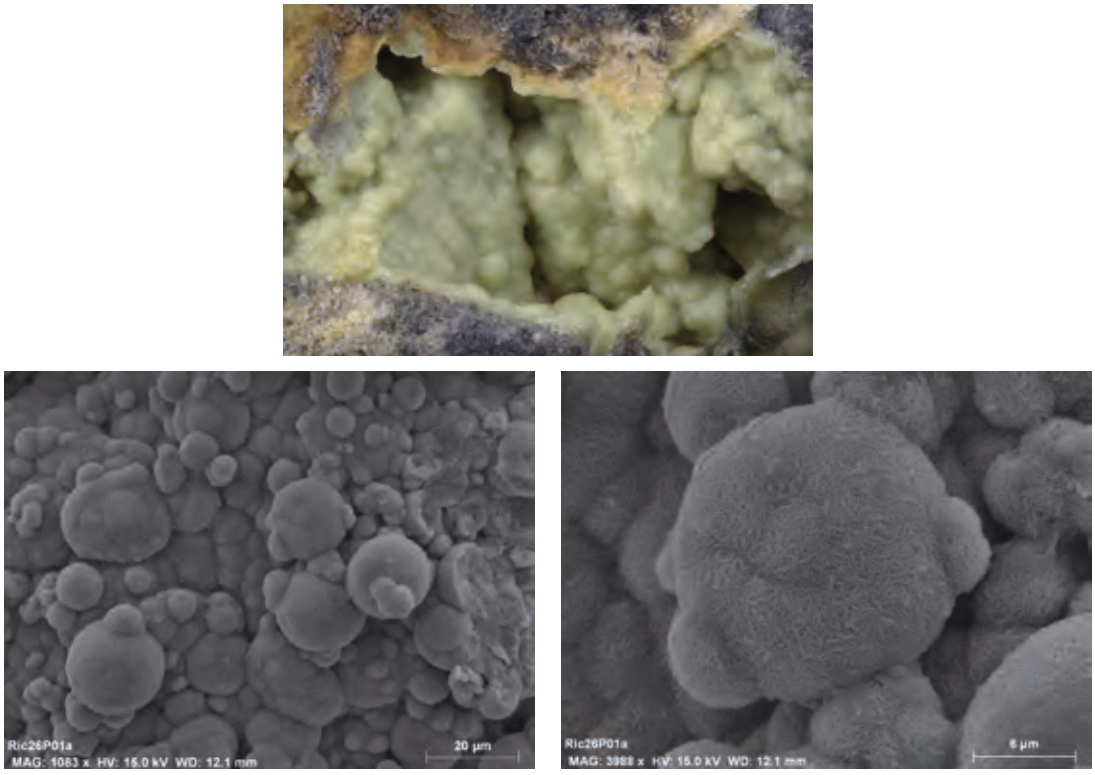


Planche 16 : Crandallite en croûte verte de la carrière M de Richelle (16a) échantillon de la collection M. Blondieau photo P. Chollet, largeur de l'image 4,15 mm – (16b et c) images MEB de l'échantillon RIC26.

la spectrométrie de fluorescence X qui met bien en évidence la présence des éléments Pb, P, S et Fe. Al est présent mais très minoritaire, et Sr n'a pas été détecté. Enfin, signalons également la présence d'un peu d'arsenic.

Crandallite, $CaAl_3(OH)_5(PO_4)_2 \cdot H_2O$

Dans les échantillons étudiés, on observe la crandallite assez rarement, en agrégats millimétriques constitués de cristaux beiges dans des roches de la brèche siliceuse grise. Le minéral, d'abord identifié visuellement, est confirmé par diffraction des rayons X et par des analyses chimiques qualitatives EDS qui mettent en évidence les éléments majoritaires O, Al, P et Ca, ainsi que Fe et Si très minoritaires. Les photographies obtenues en microscopie électronique à balayage sont spectaculaires, et montrent des cristaux avec une face sommitale triangulaire assez caractéristique de l'espèce qui, pour cette raison, avait été baptisée anciennement «deltaite». Les images à fort grossissement montrent des assemblages cristallins conférant à l'ensemble une structure fort squelettique (Planche 15).

Dans la carrière M, des croûtes jaune-vert voire parfois vert pomme translucides sur une roche bréchique de couleur brune sont aussi constituées de crandallite (Planche 16). Sous cet aspect, le minéral est confirmé par diffraction des rayons X et par des analyses chimiques qualitatives EDS qui mettent en évidence la présence majoritaire des éléments O, Al, P et Ca, ainsi que Si et Fe très minoritaires. Ces croûtes vert pomme sont vues en microscopie électronique à balayage comme constituées d'une multitude de petites boules toutes couvertes de minuscules cristaux lamellaires et montrant sur cassure une structure fibroradiée. Il est saisissant et troublant de constater une étrange similitude entre la photo MEB de cet échantillon et celle du minéral considéré comme «viséite» par Di Renzo & Gabelica (1995).

Enfin, les analyses par diffraction des rayons X ont également permis de mettre en évidence de la crandallite souvent mal cristallisée dans de nombreux enduits ou croûtes beige ou brun clair de Richelle, visuellement déterminés comme «richellite». Cet aspect est abordé en détail en fin d'article.

Delvauxite, $CaFe^{3+}_4(PO_4,SO_4)_2(OH)_8 \cdot 4\text{-}6H_2O$

Dans les brèches de Richelle, la delvauxite s'observe en minces enduits très craquelés et accompagne généralement la richellite et la koninckite. Cette delvauxite, comparable à celle de la carrière K de Visé, est de formation secondaire par rapport à la delvauxite en rognons comme à Berneau ou même à celle en couches épaisses comme à Argenteau. Nous en reparlons en fin d'article.

Drugmanite, $Pb_2(Fe,Al)H(PO_4)_2(OH)_2$

A la carrière N de Richelle, Van Tassel et al. (1979) décrivent un nouveau minéral : la drugmanite. Le minéral n'est observé que sur un seul échantillon de la paragenèse à plomb, et est associé à des cristaux d'anglésite incolore, à de la corkite en globules bruns, à des esquilles de pyromorphite incolore et à des croûtes laiteuses de phosphosidérite. Il se présente dans des petites géodes en bouquets jaune pâle de cristaux aplatis pouvant atteindre 0,2 mm et qui, une fois isolés, apparaissent incolores. Ce minéral n'a pas été retrouvé.

Evansite, $Al_3(PO_4)(OH)_6.6H_2O$ (?)

Dans la brèche grise d'Argenteau, Van Tassel (1959a) observe des nodules blanc à gris ne dépassant guère le millimètre mais manifestant une fluorescence dans les teintes bleu-blanc. Le radiogramme de poudre ne fait apparaître que quelques bandes diffuses indiquant qu'il s'agit d'un minéral amorphe. L'analyse chimique montre qu'il s'agit d'un phosphate d'aluminium hydraté. Avec beaucoup de réserve, Van Tassel (1959a) assimile ce minéral d'Argenteau à de l'évansite.

Un échantillon provenant d'une ancienne collection et étiqueté « évansite de Richelle » montre, sur l'une de ses faces, un enduit grisâtre en grandes plages centimétriques manifestant une fluorescence bleutée sous une lampe ultra-violette. Cet échantillon a été analysé par diffraction des rayons X, et son radiogramme de poudre indique qu'il s'agit d'un mélange de quartz et de calcite et non d'évansite. Par ailleurs, Fransolet et al. (1974a) ne signalent pas l'évansite dans la liste des espèces minérales de Richelle.

Fluellite, $Al_2(PO_4)F_2(OH).7H_2O$

A Argenteau, Van Tassel (1959a) observe de petites géodes dont les parois sont tapissées d'un minéral incolore et limpide en cristaux atteignant 0,2 mm. Les analyses par diffraction des rayons X indiquent qu'il s'agit de fluellite. Dans la carrière N de Richelle, des cristaux incolores et vitreux de 0,3 mm en moyenne mais pouvant atteindre 0,6 mm, d'habitus bipyramidal, sont observés dans des petites géodes de la brèche radioactive grise. Fransolet et al. (1974b) les déterminent comme étant de la fluellite et précisent : «Le minéral est implanté, soit sur des cristaux de quartz, soit sur des lamelles de gypse, soit sur croûte de minyulite fibreuse ou compacte, soit sur un lit de phosphosidérite globulaire.»

Aujourd'hui, la fluellite s'observe encore régulièrement dans les carrières N et N' de Richelle, soit dans la brèche grise siliceuse, soit dans des brèches noires coupantes. Des associations de cristaux en forme de rosettes assez curieuses peuvent atteindre 5 mm (Planche 17). Yves Jockin a trouvé de nombreux cristaux de fluellite dans le gros bloc de brèche grise silicifiée trouvé dans la carrière N'. Ce minéral n'est cependant pas toujours facile à observer (et à photographier) du fait de sa grande limpidité.

Fluorapatite, $Ca_5(PO_4)_3(F,OH,Cl)$

A Richelle, dans la fraction lourde de la brèche de la carrière N', Van Tassel (1959a) a observé de nombreux cristaux idiomorphes et incolores de fluorapatite pouvant atteindre 0,5 mm. Ces cristaux présentent un habitus tabulaire ou bipyramidé. L'espèce est identifiée par diffraction des rayons X. Dans un autre article, Van Tassel (1959b) signale avoir observé le minéral sous forme de délicates touffes blanches finement fibroradiées, qui se trouvaient implantées dans des petites géodes sur des enduits bruns d'oxyde de fer.

Lors de nos recherches dans la carrière N', nous avons pu retrouver un bloc de ce type avec de l'apatite présentant la morphologie fibreuse qui, en lumière ultraviolette, manifeste une vive fluorescence blanc crème sous ondes longues et une fluorescence plus jaune et moins vive en ondes courtes. Nous en avons également trouvé dans un échantillon visuellement déterminé comme une limonite très scoriacée. Sous la loupe binoculaire, il a été possible d'observer des amas millimétriques de petits cristaux incolores en prismes hexagonaux, associés à de la goethite et à un minéral rouge identifié par diffraction des rayons X comme étant de la lépidocrocite. L'analyse chimique qualitative EDS de ces cristaux incolores met en évidence la présence des éléments Ca, P, O

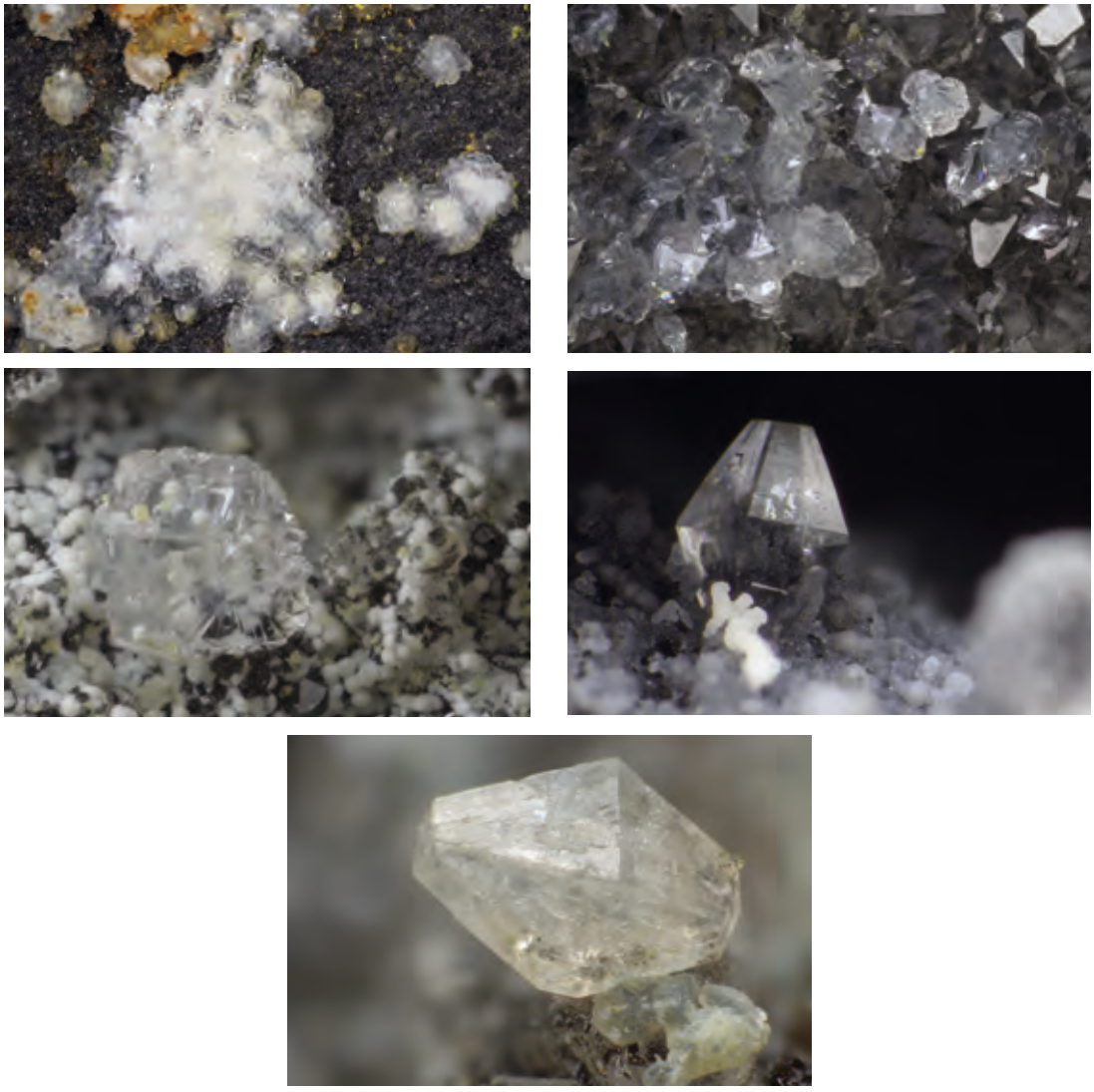
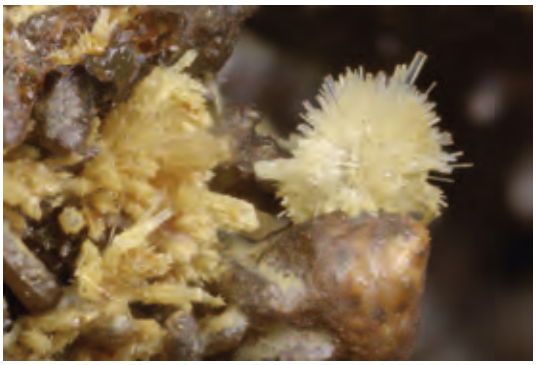


Planche 17 : Fluellite de Richelle (17a) échantillon de la collection M. Blondieau photo P. Chollet, largeur de l'image 8,6 mm – (17b) ensemble de cristaux, collection M. Blondieau photo P. Chollet, largeur de l'image 4,4 mm – (17c) agrégat cristallin sur phosphosidérite, collection et photo P. Chollet, largeur de l'image 1,54 mm – (17d) cristal isolé sur phosphosidérite, collection M. Blondieau photo P. Chollet, largeur de l'image 0,90 mm – (17e) beau cristal isolé, collection S. Puccio photo P. Chollet, largeur de l'image 1,0 mm.





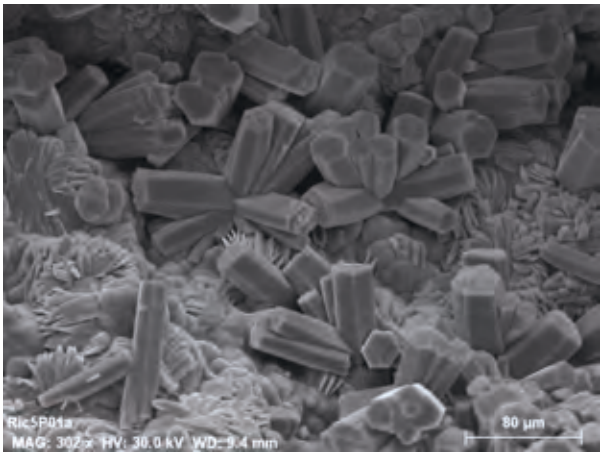
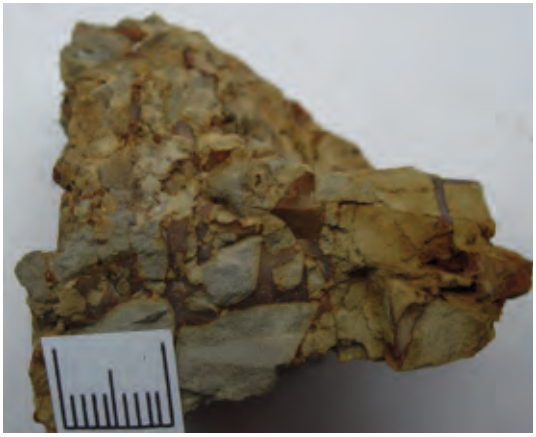


Planche 18 : Fluorapatite de Richelle (18a) petite géode avec des cristaux, collection M. Blondieau photo P. Chollet, largeur de l'image 3,85 mm – (18b) boules avec petits cristaux, collection M. Blondieau photo P. Chollet, largeur de l'image 2,0 mm – (18c) bouquets de fluorapatite en prismes hexagonaux avec lépidocrocite (en bas à gauche) et boules de goethite de Richelle, image MEB de l'échantillon RIC5.



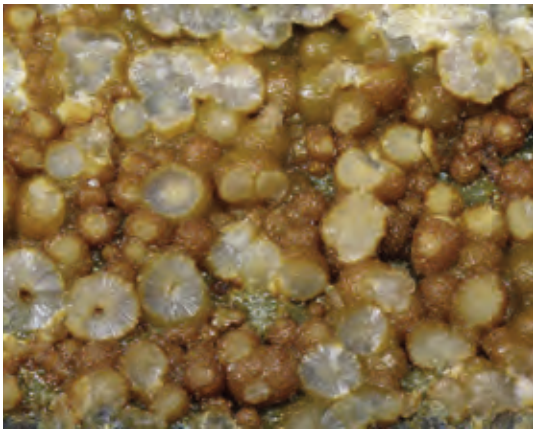


Planche 19 : Koninckite de Richelle en veine et en petits globules fibro-radiés (19a) brèche cimentée par des veines blanc grisâtres de koninckite, collection et photo M. Blondieau, largeur de l'image 4 cm – (19b) boules de koninckite couvertes d'un enduit brun de richellite. Certaines boules cassées montrent la structure fibro-radiée du minéral, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 3,25 mm.



Planche 20 : Koninckite rose sur cacoxénite de Richelle (20a) ensemble de boules roses, collection et photo P. Chollet, largeur de l'image 6,15 mm – (20b) magnifique association de boules roses, collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,85 mm (20c) splendide boule rose avec des cristaux produisant certaines réflexions, collection et photo P. Chollet, largeur de l'image 1,50 mm.

et F, confirmant ainsi la fluorapatite. Les images en microscopie électronique montrent de beaux bouquets de cristaux hexagonaux incolores, atteignant 100 μm de diamètre environ (Planche 18).

Hopeite, $Zn_3(PO_4)_2.4H_2O$

L'espèce est signalée avoir été identifiée par diffraction des rayons X sur du matériel de la carrière N de Richelle (Hatert et al. 2002). Nous n'avons pas retrouvé cette espèce.

Koninckite, $Fe^{3+}PO_4 \cdot 3H_2O$

Fransolet et al. (1974a) signalent la koninckite dans la carrière N de Richelle, mais ne la décrivent pas en détail. Aujourd'hui, il est encore possible d'observer ce minéral dans les carrières M, N et N', où il forme plusieurs facies différents. Son identification repose sur des analyses par diffraction des rayons X et sur des analyses chimiques qualitatives qui mettent en évidence les éléments O, P et Fe, ainsi que des traces de Si et Al.

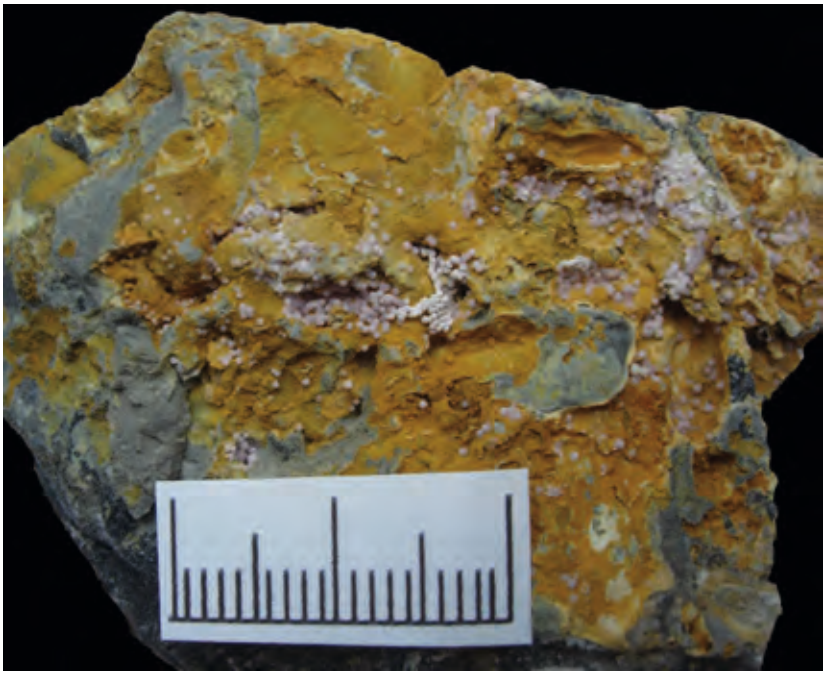


Fig. 16 : Koninckite en boules roses sur cacoxénite de Richelle, collection et photo M. Blondieau, largeur de l'image 4 cm.

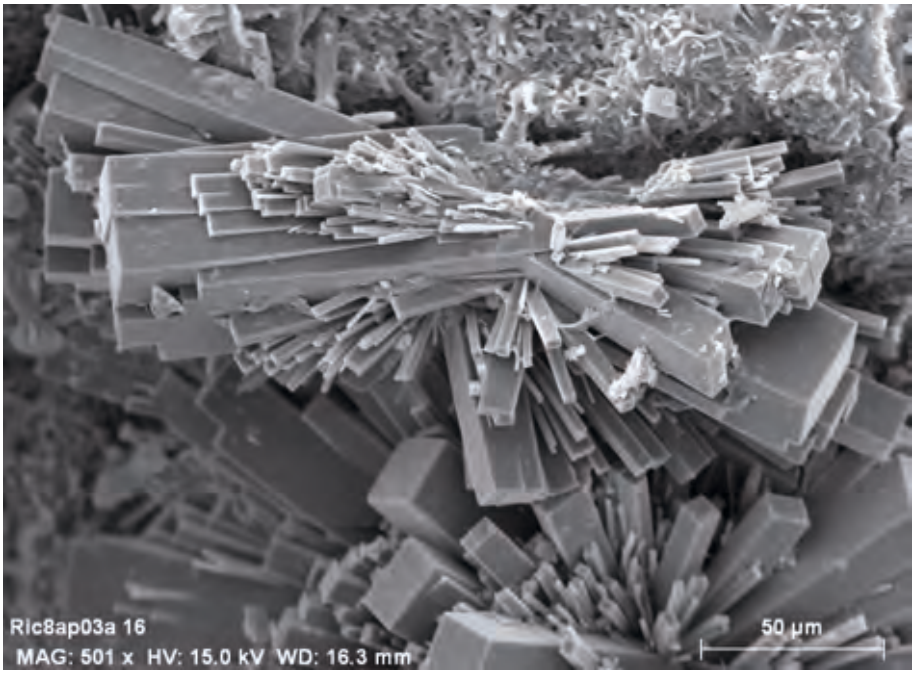
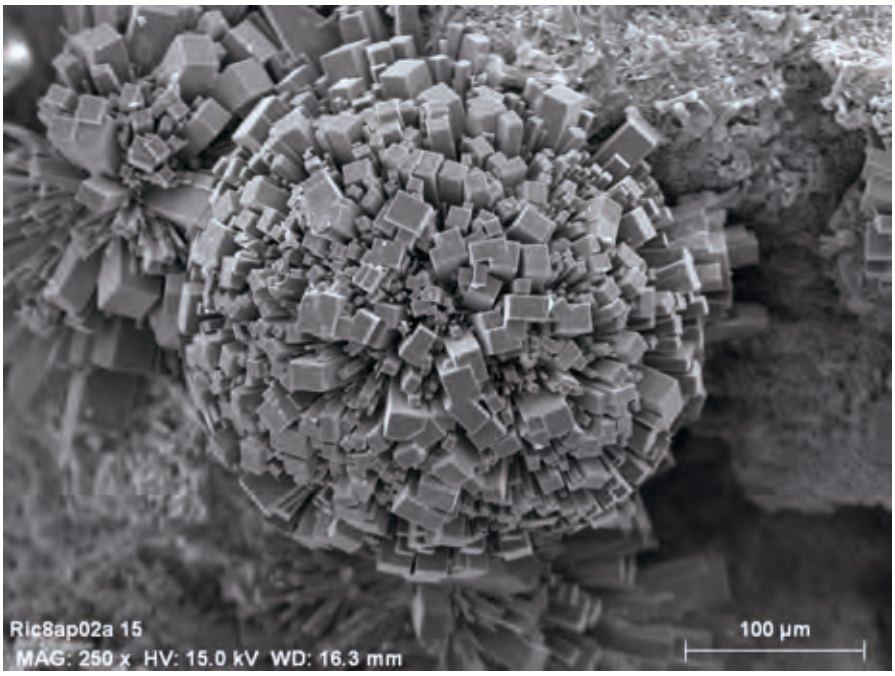


Fig. 17 : Koninckite rose de Richelle, images MEB de l'échantillon RIC8.



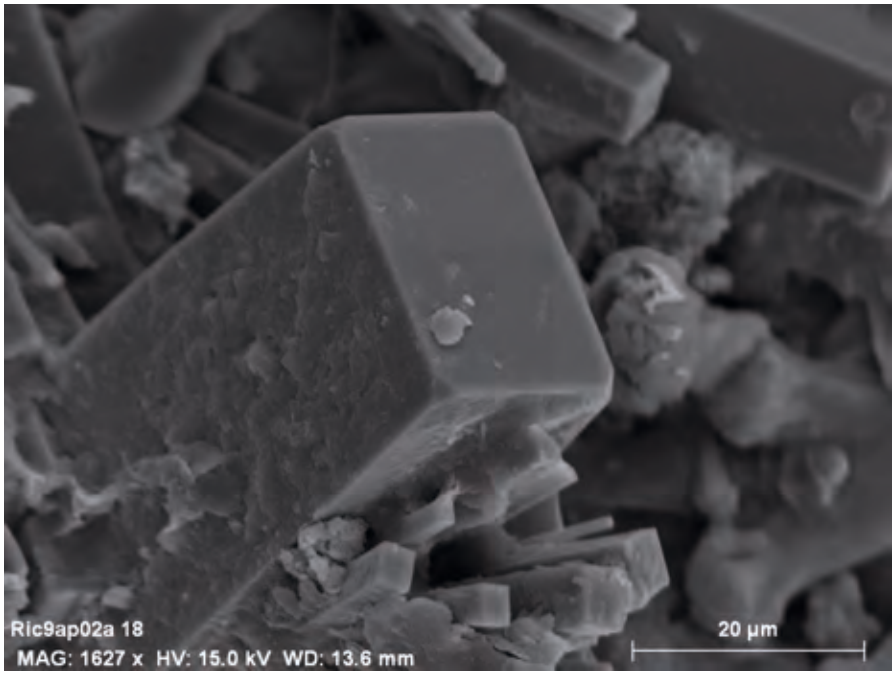


Planche 21 : Koninckite rose de Richelle, images MEB spectaculaires (21a) boule rose de koninckite de Richelle montrant une multitude de cristaux, image MEB de l'échantillon RIC8 – (21b) gros plan sur un cristal de koninckite rose de Richelle, image MEB de l'échantillon RIC9.

Dans la carrière M, la koninckite est observée en petits globules comme ceux décrits par Césàro (1884) mais on l'observe également en veines d'épaisseur parfois presque centimétriques, paraissant former le ciment d'une brèche dont les éléments semblent être une sorte de roche jaune-brunâtre siliceuse comparable à un grès assez friable. Sous ce faciès, la koninckite n'avait pas encore été décrite (Planche 19).

Dans certains de ces blocs, on observe également des petits encroûtements de delvauxite et de richellite. En surface, les globules de koninckite sont couverts d'une pellicule vernissée dans laquelle l'analyse EDS montre la présence des éléments O, Fe, Ca et P prouvant ainsi qu'il s'agit bien de richellite comme signalé dans la littérature. Les veines de koninckite sont de couleur blanc grisâtre et d'éclat plutôt gras sans aucune texture particulière. Visuellement, on pourrait les confondre avec de la calcédoine dont l'aspect est toutefois un peu moins gras. Aux contacts de la veine avec les éléments de la brèche se trouve un film brun vernissé de richellite comparable à celui entourant les globules. Sous la loupe binoculaire, il est parfois possible d'observer des petites structures étoilées noyées au sein des veines généralement les plus étroites. Ces structures sont visuellement assez comparables aux globules de koninckite précédemment décrits (Planche 19). Le minéral est confirmé par diffraction des rayons X tant sur les petits globules que sur les veines cimentant la brèche.

Dans la carrière N, la koninckite se présente parfois en belles boules rosées, déposées sur cacoxénite (Figures 16 et 17, Planches 20, 21). Sous la loupe binoculaire, on observe de minuscules cristaux montrant une section carrée, ce qui est bien mis en évidence sur les spectaculaires photographies

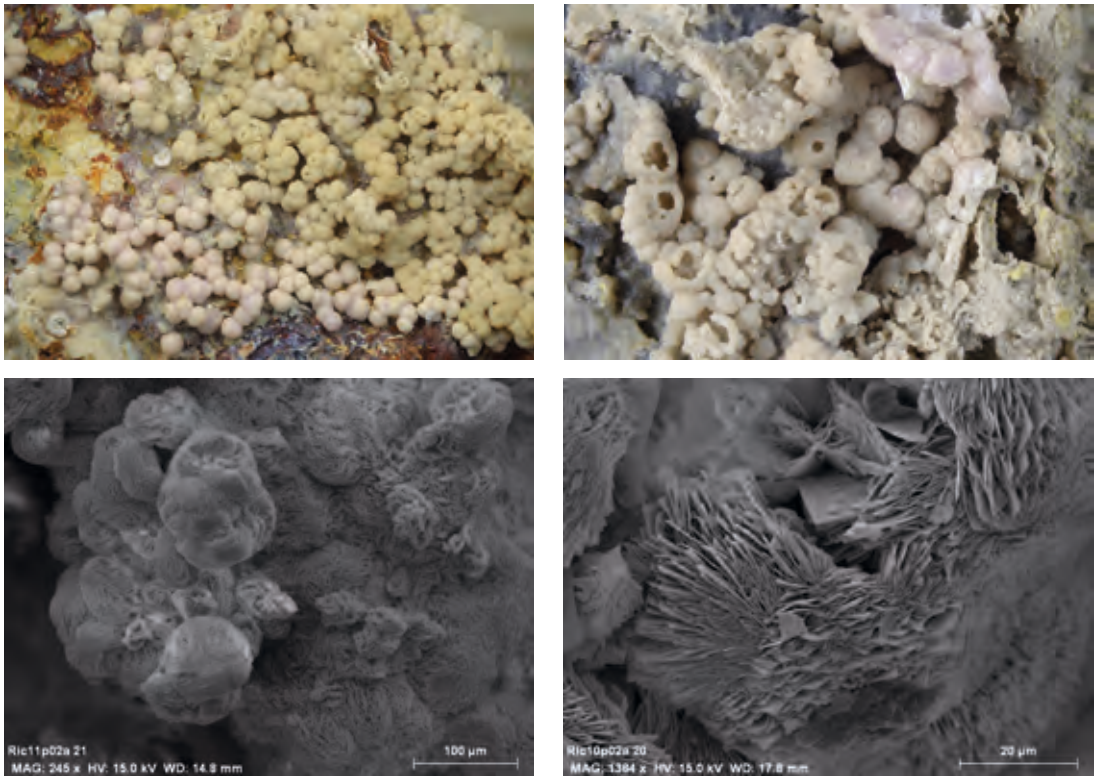


Planche 22 : Koninckite en boules creuses de Richelle (22a) ensemble de boules assez creuses, collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 10,60 mm (22b) boules creuses et boules roses (en haut à droite), collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 4,55 mm (22c) boules creuses de koninckite de Richelle, image MEB de l'échantillon RIC 11 (22d) gros plan sur la structure cristallisée d'une boule de koninckite creuse de Richelle, image MEB de l'échantillon RIC 10.

en microscopie électronique à balayage. Associés aux boules, on observe également des cristaux prismatiques assemblés en « fagots » (Figure 17). De minuscules facettes {111} sont parfois visibles au sommet des cristaux les plus grands (Planche 21b).

Des boules blanches souvent creuses, analysées par diffraction des rayons X, sont également constituées de koninckite et l'analyse chimique qualitative EDS indique une même composition chimique que celles des boules roses hérissées de cristaux. Par contre, les photos en microscopie électronique à balayage montrent un habitus cristallin très différent. La koninckite se présente ici en cristaux lamellaires très minces, qui s'associent pour former des structures plus ou moins sphériques (Planche 22).

Les paramètres de maille de la koninckite ont été déterminés par Van Tassel (1968), qui signale que le volume de la maille ne concorde pas avec la formule habituellement admise pour le minéral, laquelle pourrait être moins simple que ne le suggèrent les analyses. La structure cristalline de ce minéral a été décrite récemment par Plášil et al. (2015), à partir d'échantillons provenant de Kociha, Rimavská, Sobota (Slovaquie).

Minyulite, $KAl_2(PO_4)_2(OH,F).4H_2O$

La minyulite est observée dans la carrière N de Richelle, au sein d'une roche bréchique siliceuse noire très dure (Fransolet et al., 1974d). Ces auteurs en donnent la description suivante : «La minyulite est souvent associée à la fluellite, au gypse et à la phosphosidérite. Elle se présente le plus souvent sous forme d'agrégats soyeux finement fibreux, disposés en touffes de l'ordre du mm ou en rosettes pouvant atteindre 8 mm de diamètre. Elle est généralement incolore et transparente mais peut parfois prendre des tons verdâtres.» Dans la carrière N, le minéral a été à nouveau reconnu par diffraction des rayons X dans le matériel récemment collecté (Planche 23) ; la minyulite y forme des touffes fibreuses blanches sur la roche noire coupante («phtanite»).

Mitryaevaite, $Al_5(PO_4)_2[(P,S)O_3(OH,O)]F_2(OH)_2.14,5H_2O$

Dans la carrière N de Richelle, une brèche à ciment grisâtre présente des fissures tapissées d'un minéral en fibres blanches. Visuellement déterminé comme une wavellite fort abîmée, le minéral a été analysé par diffraction des rayons X et le radiogramme de poudre a indiqué qu'il s'agit de mitryaevaite. Les images en microscopie électronique à balayage montrent des agrégats d'une centaine de microns de diamètre, constitués de l'association d'une multitude de cristaux prismatiques dont la section ne dépasse guère 3 ou 4 microns (Planche 24).

Le Tableau 1 fournit le dépouillement du radiogramme de poudres de rayons X de la mitryaevaite de Richelle, comparé aux données publiées par Ankinovich et al. (1997), qui ont décrit l'espèce dans le sud du Kazakhstan à Karatau Range, Zhabagly mountains. Les valeurs de d des raies du minéral de Richelle sont tout à fait comparables à celles de la localité-type, hormis la présence d'un peu de quartz (qz), principalement dans le premier échan-

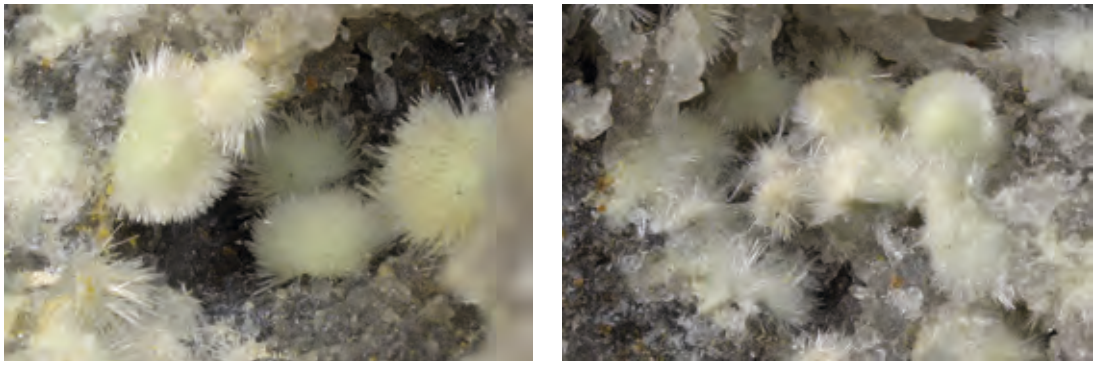


Planche 23 : Minyulite de Richelle (23a) boules vert pâle, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 7,2 mm – (23b) idem, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 7,9 mm.

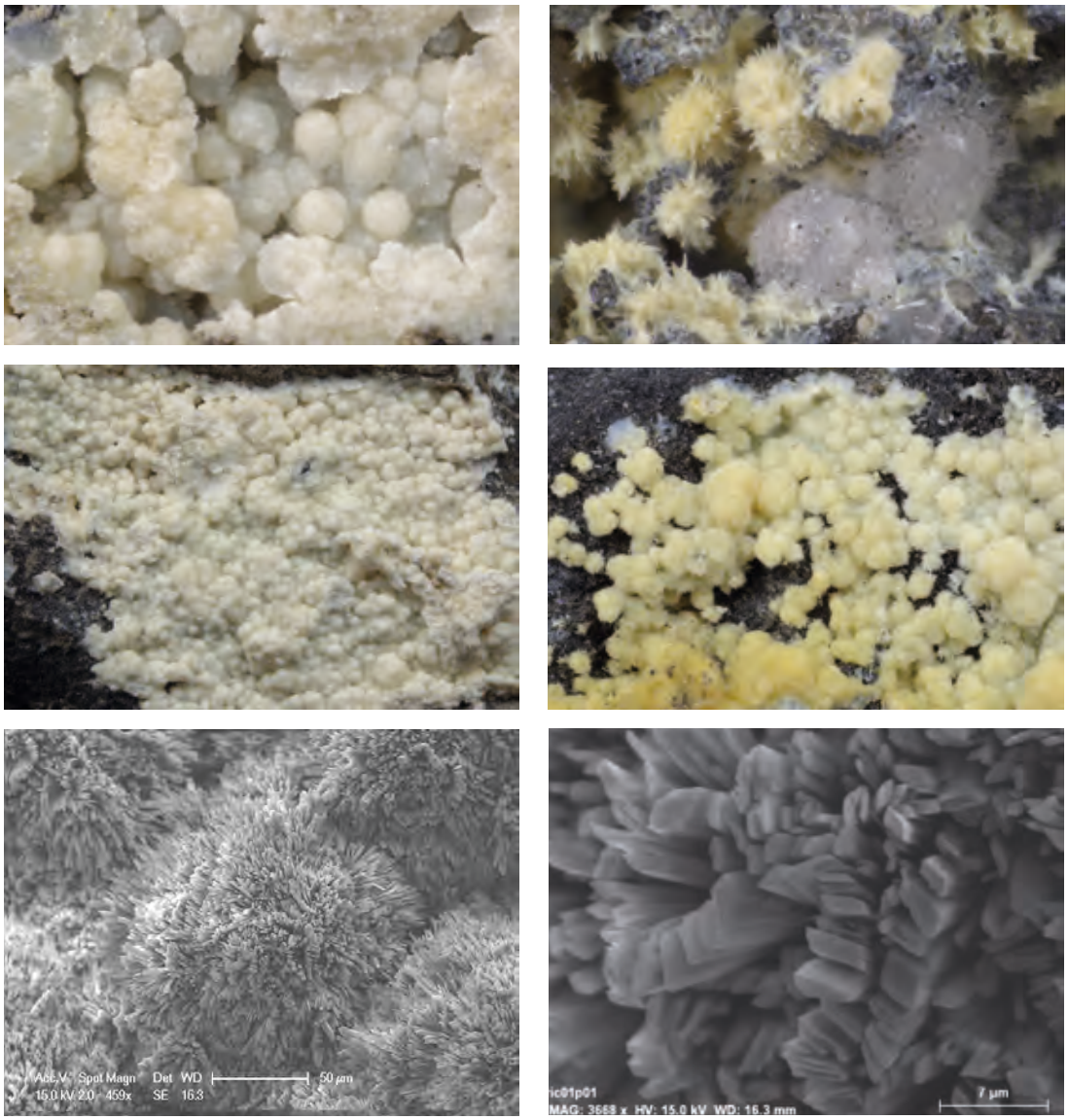


Planche 24 : Mitryaevaite de Richelle (24a) boules blanches, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 2,05 mm – (24b) boules fibreuses associées à deux boules de koninckite rose, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,35 mm – (24c) belle plage toute couverte de boules blanches du minéral, collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 7,15 mm – (24d) ensemble de petites boules, collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 2,95 mm – (24e) boule de mitryaevite de Richelle toute couverte de minuscules cristaux, image MEB de l'échantillon RIC 01 – (24f) gros plan montrant la forme des cristaux, image MEB de l'échantillon RIC 01.

tillon analysé. L'analyse chimique qualitative EDS indique la présence majoritaire des éléments O, Al, P et F, ainsi que Fe très minoritaire. Cette composition chimique correspond bien à la mitryaevaite et confirme l'identification du minéral.

La mitryaevaite est un minéral très rare et Richelle semble être la deuxième occurrence mondiale de cette espèce. Comme à Richelle, la mitryaevaite du Kazakhstan est en association avec notamment la minyulite, la crandallite, la wavellite et le gypse.

Tableau 1 : Dépouillement du radiogramme de poudres de rayons X de la mitryaevaite de Richelle.

* Mitryaevaite de la localité-type au Kazakhstan, d'après Ankinovich et al. (1997) qz : quartz

Kazakhstan*	Richelle 1	Richelle 2
	15 janvier 2014	12 fév 2014
9,75 (100)	9,727 (95,38)	9,740 (100)
9,24 (20)		
7,54 (10)	7,541 (9,85)	7,558 (9)
6,53 (10)	6,524 (18,16)	6,522 (18,11)
6,35 (30)	6,342 (27,16)	6,344 (17,94)
4,90 (⩽10)	4,913 (10,08)	4,907 (9,5)
	4,261 (12,52) = qz	
3,763 (10)	3,771 (17,52)	3,768 (12,50)
		3,584 (11,58)
3,573 (10)	3,573 (16,50)	3,570 (14,88)
	3,344 (100) = qz	3,348 (36,59) = qz
3,333 (20)		3,331 (24,98)
	3,259 (23,03)	3,256 (16,41)
3,222 (20)	3,225 (16,22)	3,220 (12,88)
3,131 (10)	3,132 (21,26)	3,134 (17,79)
2,923 (20)	2,929 (19,14)	2,929 (20,48)
2,761 (10)	2,762 (16,89	2,763 (15,08)
2,550 (10)	2,558 (17,46)	2,557 (11,01)
	2,460 (19,03) = qz	
	2,237 (16,66) = qz	
1,932 (10)	1,932 (7,47)	1,932 (6,21)
	1,819 (17,33) = qz	

Phosphosiderite, $Fe^{3+}PO_4 \cdot 3H_2O$, et strengite, $Fe^{3+}PO_4 \cdot 3H_2O$

Dans la carrière N' de Richelle, Van Tassel (1959b) décrit la strengite et la phosphosidérite. Il indique que la strengite est identifiée par son radiogramme de poudre de rayons X et qu'elle se présente sous forme de petits globules fibroradiés de maximum 0,1 mm de diamètre, de couleur blanche, légèrement jaunâtre ou verdâtre et d'aspect cristallin, saccharoïde ou subrésineux. Cet auteur décrit également la phosphosidérite et précise qu'elle se trouve toujours en mélange avec la strengite, mais qu'elle devient dominante dans des sphérules à éclat gras de couleur blanche ou légèrement jaunâtre. Les sphérules ont une texture fibroradiée et un diamètre maximum de 0,2 mm. Enfin, Van Tassel (1959b) indique que le constituant majeur de la substance compacte jaunâtre à éclat gras, moulant les cristaux de quartz blancs et noirâtres, est également de la phosphosidérite.

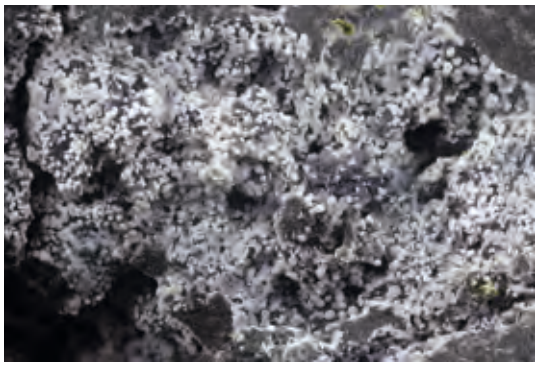
Aujourd'hui, il est encore possible d'observer de nombreux enduits, croûtes ou remplissages de petites géodes avec des minuscules globules correspondant aux descriptions de Van Tassel (1959b). De nombreuses analyses par diffraction des rayons X réalisées sur des échantillons de ce type ont souvent fourni des diffractogrammes avec des pics très larges et très peu intenses, indiquant le caractère mal ordonné de ces phases. Les échantillons récoltés indiquent toujours un mélange de phosphosidérite et de strengite, et nous n'avons pas retrouvé de globules de strengite comparables à ceux décrits par Van Tassel (1959b).

Dans la carrière N, Fransolet et al. (1974a) signalent la présence de ces deux espèces mais ne les décrivent pas en détail. Dans leurs autres publications, Fransolet et al. (1974b, c, d) indiquent toujours une association avec phosphosidérite mais jamais avec strengite. Parmi nos échantillons, la phosphosidérite apparaît systématiquement dominante sur la strengite, sauf sur un enduit blanc d'aspect argileux formé sur une brèche de la carrière N, et sur lequel ont pu se déposer de la cacoxénite et de la torbernite. Nous reparlons de cet échantillon particulier en fin d'article.

Dans la carrière N, l'association phosphosidérite-strengite est également très fréquente sous l'aspect de petites boules blanches à grises parfois associées en chapelet, et localisées dans des petites géodes de quartz. En microscopie électronique à balayage (Planche 25), on observe une association intime de nombreux et minuscules cristaux.

Pyromorphite, $Pb_5(PO_4)_3Cl$

La pyromorphite est observée par Fransolet et al. (1977) dans la carrière N de Richelle, sur des phtanites, en association avec la galène très altérée, la cérusite, l'anglésite, et parfois aussi la corkite ou la wulfénite.





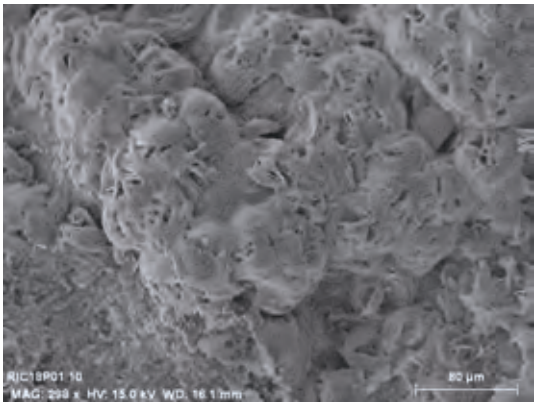
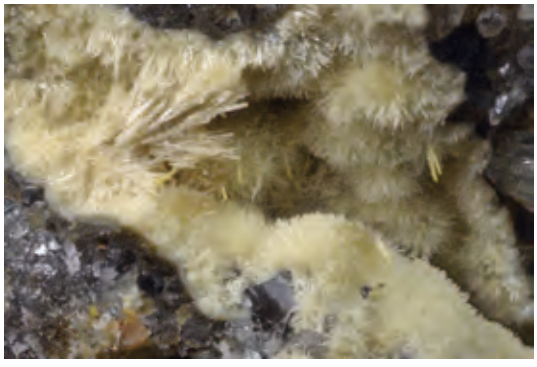


Planche 25 : Phosphosidérite de Richelle (25a) phosphosidérite en petites boules blanches sur phtanite, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 8,65 mm – (25b) belle concrétion de couleur blanc bleuté, collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 3,15 mm - (25c) structure cristalline de boules de phosphosidérite de Richelle, image MEB de l'échantillon RIC18.



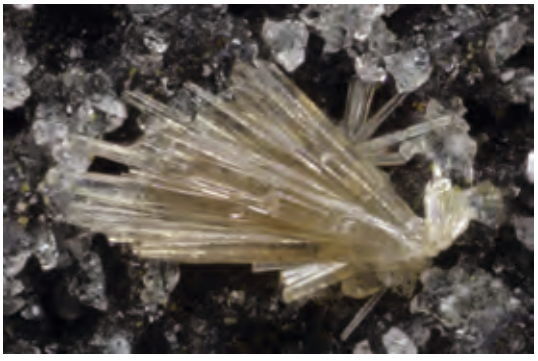


Planche 26 : Pyromorphite de Richelle (26a) géode tapissée de pyromorphite fibreuse blanche, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 2,3 mm – (26b) gerbe de cristaux, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,4 mm.

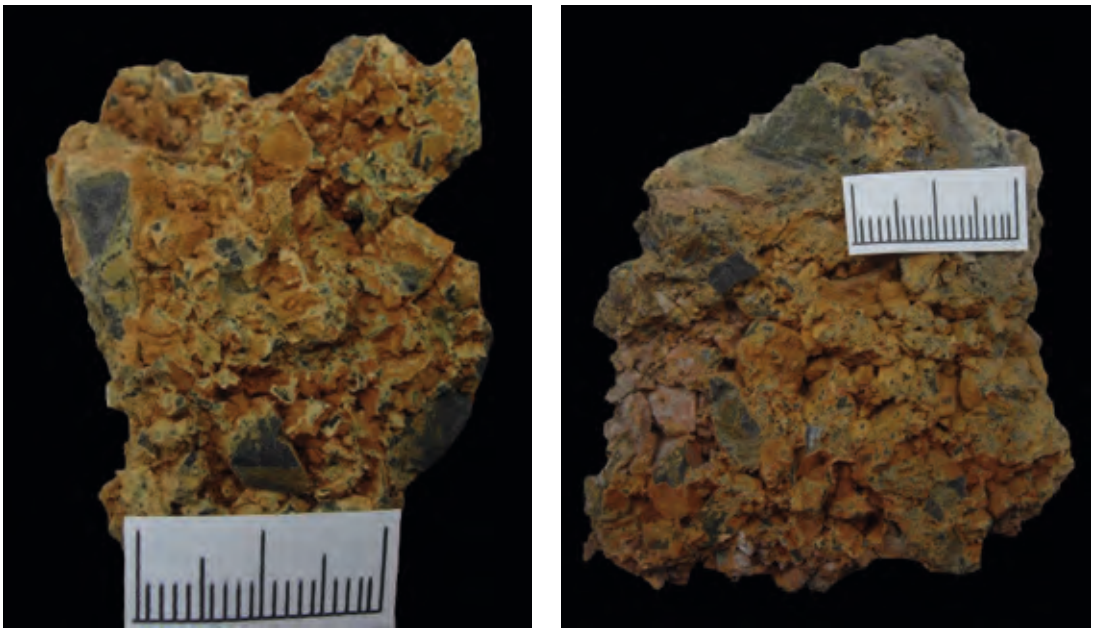


Planche 27 : Richellite en enduits ou petite croûtes tapissant (cimentant) les éléments d'une brèche de la carrière M de Richelle, collection et photos M. Blondieau, largeur de l'image 6 cm.

La pyromorphite se présente généralement en fines aiguilles ou minces bâtonnets blancs (Planche 26). Des cristaux prismatiques à faces courbes peuvent atteindre 1,4 mm en longueur.

Richellite, $Ca_3Fe^{+3}_{10}(PO_4)_8(OH,F)_{12}\cdot nH_2O$ (?)

Dans les carrières de Richelle, on rencontre fréquemment des croûtes ou enduits de même apparence que celle des échantillons historiques de richellite (Planche 27), hormis l'épaisseur qui n'est plus centimétrique mais bien millimétrique. Après avoir réalisé de nombreuses analyses par diffraction des rayons X, nous pouvons assimiler ces échantillons récents à de la richellite. Les informations tirées de toutes ces analyses sont décrites en fin d'article.

Comme déjà signalé par Cesàro (1884) à Argenteau, la richellite s'observe également très fréquemment en enduits très minces sur des boules de koninckite de la carrière M (Planche 28). Dans la brèche d'Argenteau et dans les carrières de Richelle, il est encore possible d'observer la richellite en pseudomorphoses de cristaux, vraisemblablement de gypse (Planche 29).

Scholzite, $CaZn_2(PO_4)_2.2H_2O$

La scholzite est observée par Fransolet et al. (1974c) dans la carrière N de Richelle, au sein d'une brèche de calcaire gris silicifié, mais également sur des encroûtements bruns de phosphates de fer. Ces auteurs la décrivent soit en touffes radiées atteignant 1,5 mm de diamètre, soit en lamelles groupées en éventails terminés en crête de coq, soit encore en cristaux associés en forme de croix à quatre branches (Planche 30). Les cristaux individuels, de maximum 1 mm de longs sont allongés et terminés en pointe de lance légèrement biconvexe. Le minéral est parfois mais pas toujours associé à la sphalérite. La scholzite est une espèce peu fréquente à Richelle et n'a pas pu être retrouvée au cours de ce travail.

Torbernite, $Cu(UO_2)_2(PO_4)_2.12H_2O$, et métatorbernite, $Cu(UO_2)_2(PO_4)_2.8H_2O$

La torbernite est initialement découverte par J. Jedwab dans la carrière N' de Richelle (Legrand 1958). Cet auteur décrit les cristaux comme formés de petites plaquettes vert émeraude à vert-jaune de maximum 0,5 mm, et indique que la plupart des



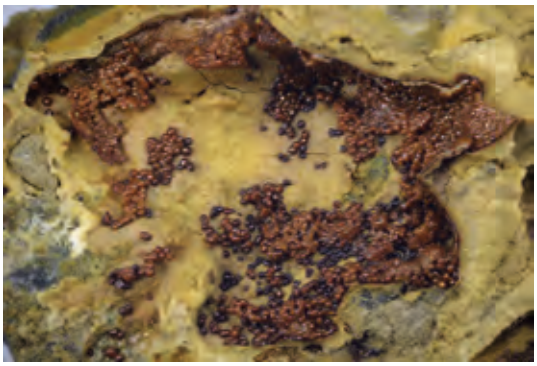




Planche 28 : Richellite en pellicules brunes sur boules de koninckite (28a) aspect caractéristique des petites veinules de koninckite bordée d'un liseré brun de richellite, collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 5,55 mm – (28b) petites boules de koninckite couvertes de richellite, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 10,5 mm – (28c) belles boules de koninckite avec enduit de richellite, collection et photo P. Chollet, largeur de l'image 4,2 mm.

cristaux sont fluorescents. Dans la fraction lourde de la brèche de cette carrière, Van Tassel (1959a) a observé des cristaux de torbernite tabulaires ou en barillets atteignant 1,5 mm. Certains cristaux sont constitués de zonations de torbernite et d'autunite, expliquant ainsi leur fluorescence.

Suite à leur déshydratation, d'autres échantillons se transforment en métatorbernite, également signalée dans la carrière N par Fransolet et al. (1974a). Aujourd'hui, il est encore possible d'observer la torbernite-métatorbernite en cristaux tabulaires millimétriques dans des brèches à ciment argileux gris (Figure 18, Planche 31). De minuscules boules vertes associées à la cacoxénite ont été reconnues comme formées d'un empilement de cristaux de torbernite-métatorbernite ne dépassant pas quelques micromètres. L'analyse chimique qualitative EDS indique bien la présence majoritaire des éléments O, U, P et Cu, ce qui confirme l'espèce.

Vivianite, $Fe_3(PO_4)_2.8H_2O$

La vivianite a été observée sur un seul échantillon collecté dans la carrière N' de Richelle. Elle forme des petites croûtes bleues ou de petites étoiles millimétriques bleues s'altérant en un minéral blanchâtre comme cela est également observé à Blaton, notamment. Le minéral est confirmé par son diffractogramme de poudres de rayons X, ainsi que par des analyses chimiques qualitatives EDS qui mettent en évidence les seuls éléments O, Fe et P. L'imagerie en microscopie électronique à balayage montre des cristaux d'apparence prismatique pouvant atteindre 150 μm de longueur (Planche 32). La vivianite n'était pas encore signalée à Richelle ni ailleurs dans la commune de Visé. Cependant, Cesàro & Despret (1883) indiquent avoir observé dans la poche à richellite d'Argenteau un phosphate verdâtre contenant du fer à l'état ferreux, mais dont l'identité n'est pas précisée. Il pourrait s'agir de vivianite.



Planche 29 : Richellite en pseudomorphoses de cristaux de gypse de Richelle – (29a) échantillon de la collection M. Blondieau photo P. Chollet, largeur de l'image 2,95 mm – (29b) pseudomorphose d'un cristal, collection M. Blondieau photo P. Chollet, largeur de l'image 2,25 mm – (29c) belles pseudomorphoses sur quartz, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 3,8 mm.

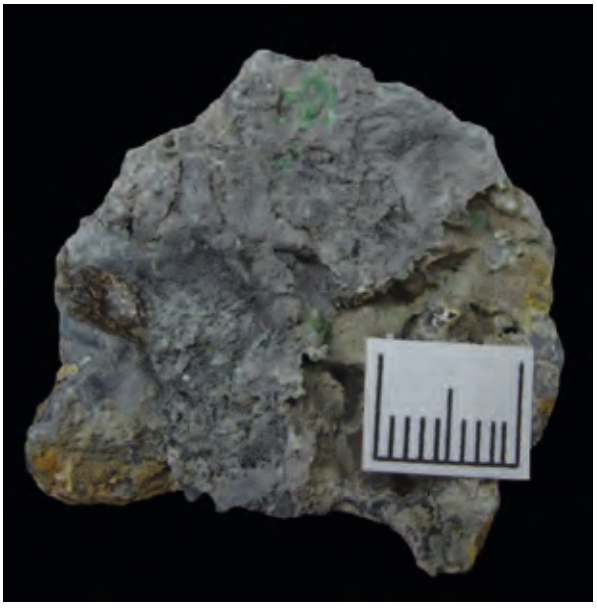


Fig. 18 : Echantillon de brèche silicifiée avec cristaux de torbernite sur enduit blanc d'apparence argileuse, carrière N de Richelle. Collection et photo M. Blondieau, largeur de l'image 4cm.

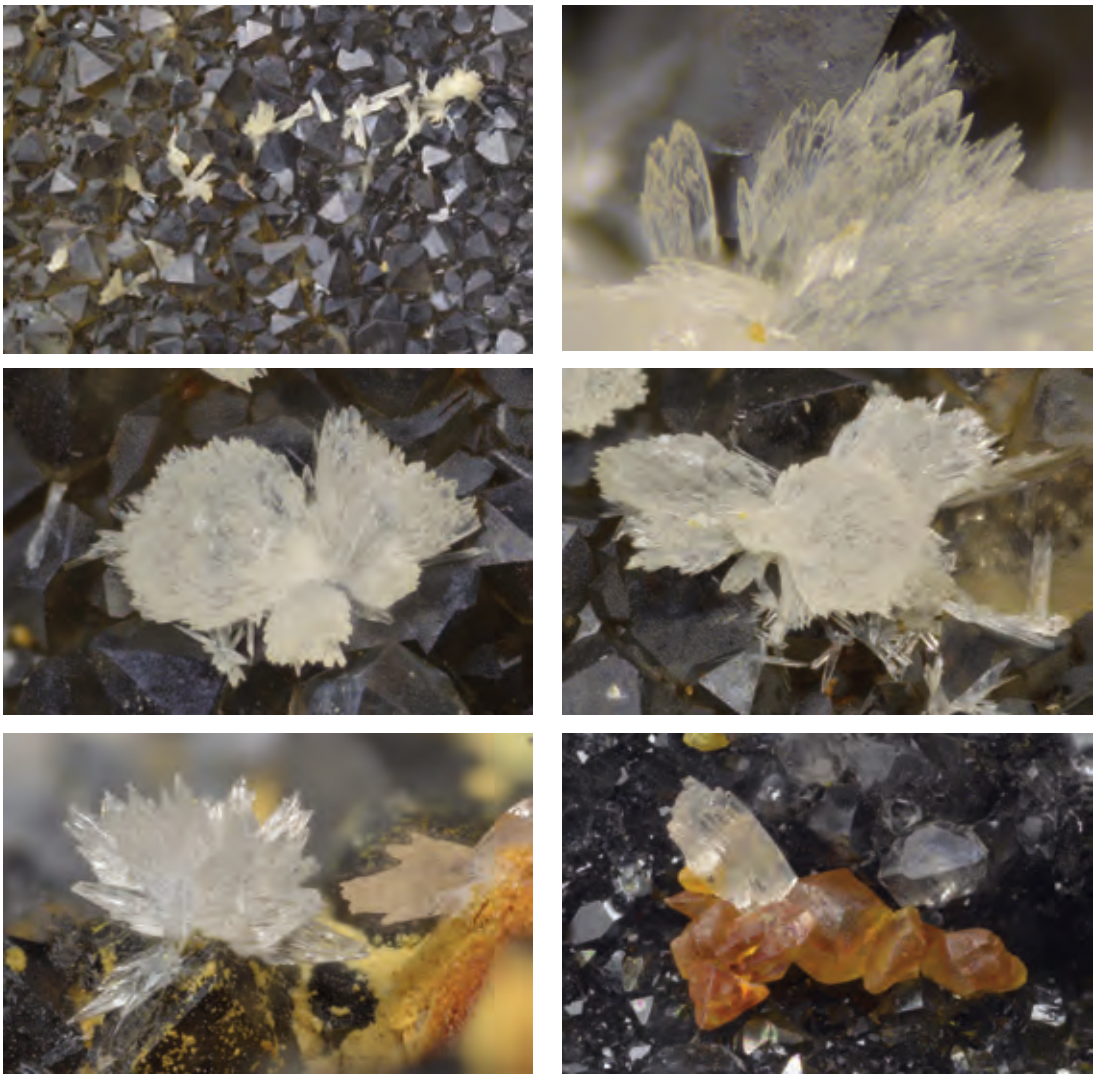


Planche 30 : Scholzite de Richelle – (30a) petites gerbes de cristaux sur quartz, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 7,05 mm – (30b) aspect lancéolé classique des cristaux, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 0,65 mm – (30c) belles gerbes de cristaux, sur quartz, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,50 mm – (30d) idem, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,70 mm – (30e) idem, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,65 mm – (30f) ensemble de cristaux incolores sur sphalérite, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 2,20 mm.

Wavellite, $Al_3(PO_4)_2(OH,F)_3 \cdot 5H_2O$

La wavellite n'avait pas encore été décrite dans la région. On l'a observée dans la carrière N de Richelle, sous l'aspect d'un enduit blanchâtre vu sous la loupe binoculaire comme une croûte soyeuse constituée de globules inférieurs à 0,5 mm, dans lesquels se distinguent des assemblages de cristaux fibreux. Le minéral est confirmé par diffraction des rayons X, et l'analyse chimique qualitative EDS indique bien la seule présence des éléments O, P et Al, confirmant ainsi l'espèce. Les photos de ces cristaux en microscopie électronique les montrent cependant

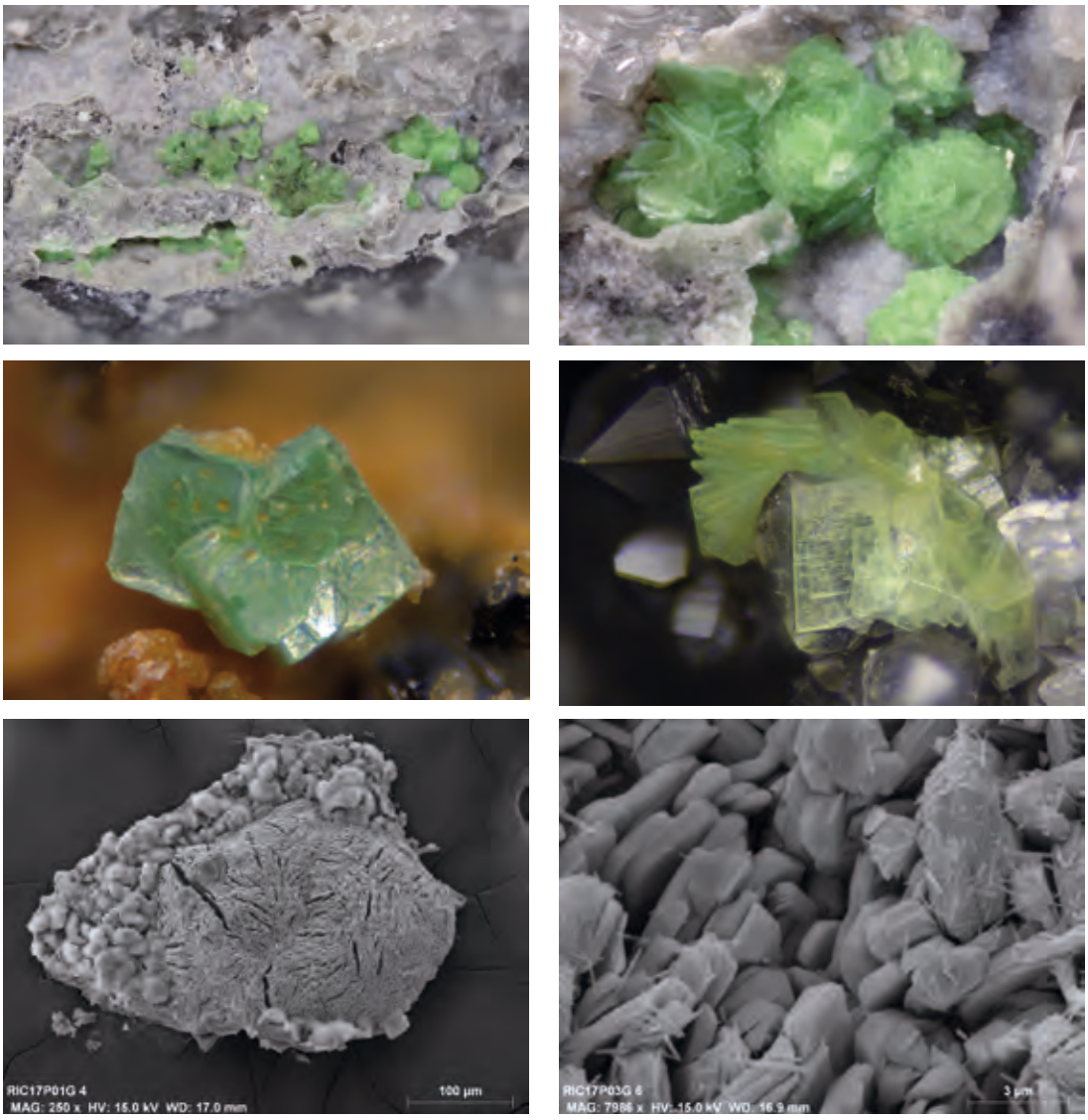
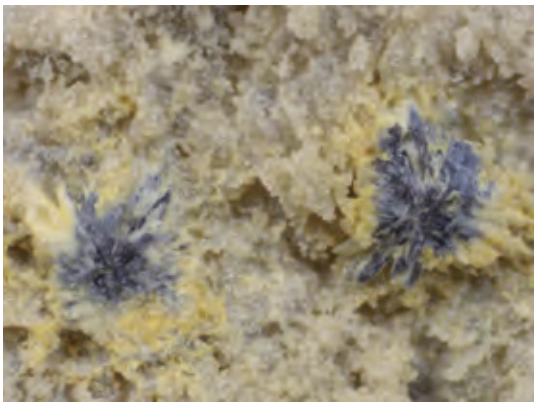


Planche 31 : Torbernite de Richelle (31a) nombreux petits cristaux, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 5,15 mm – (31b) torbernite en assemblages globulaires collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,30 mm – (31c) collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 0,55 mm – (31d) collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 0,55 mm – (31e) boule verte de torbernite et cacoxénite sur la gauche, Richelle, image MEB de l'échantillon RIC17 – (31f) gros plan sur la boule de torbernite et observation d'un empilement de nombreux petits cristaux, image MEB du même échantillon RIC17.

fort corrodés, et parfois réduits à une simple enveloppe (Planche 33). Ils sont localement recouverts de croûtes cristallines pour lesquelles l'analyse chimique qualitative EDS indique la présence des éléments O, P ainsi que Al et Fe en quantités comparables. Il s'agit vraisemblablement de phosphosidérite incrustant des cristaux de wavellite. La wavellite est une espèce peu fréquente à Richelle où elle semble d'ailleurs peu stable.



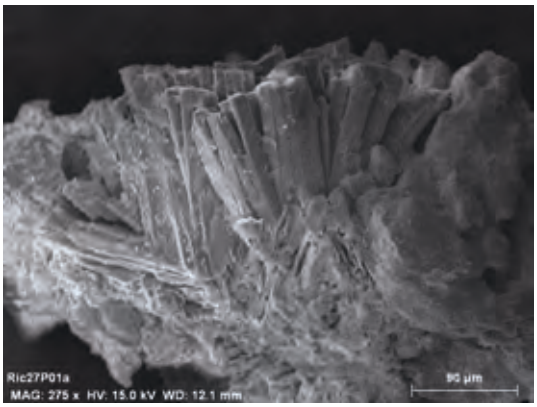
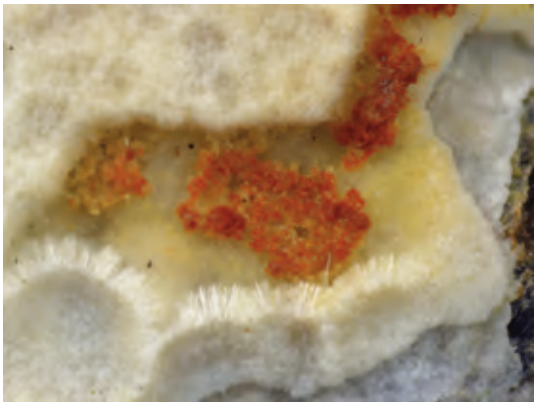


Planche 32 : Vivianite de Richelle (32a) petites étoiles de vivianite, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,55 mm - (32b) cristaux de vivianite, image MEB de l'échantillon RIC27.



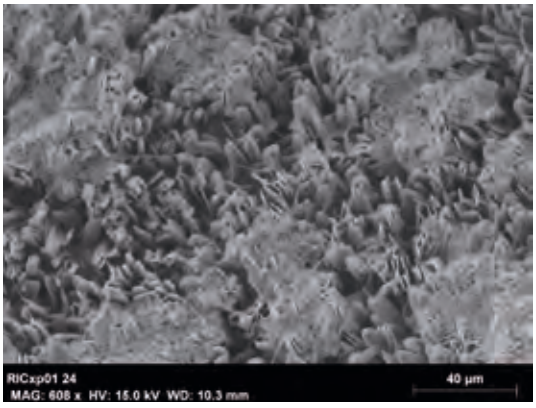


Planche 33 : Wavellite de Richelle (33a) échantillon de la collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,65 mm – (33b) observation des cristaux sous fort grossissement, image MEB de l'échantillon RIC 21.

Autres espèces minérales

Akaganéite, ß-FeO(OH)

Van Tassel (1959b) indique la présence d'un minéral de même formule chimique que la goethite mais de structure différente, dans la carrière N' de Richelle. A cette époque, le composé de formule β-FeO(OH) n'était pas encore connu en tant qu'espèce minérale naturelle, et ce n'est que plus tard, en 1961, qu'elle fut décrite et nommée «Akaganéite» d'après la localité-type au Japon (Hatert et al. 2002). Le minéral de Richelle est décrit dans un matériel mamelonné en couches très fines de l'ordre de 0,1 mm, sur la brèche brune, et d'abord assimilé à la delvauxite (Van Tassel 1959a). Dans un second article, Van Tassel (1959b), précise que cette phase mamelonnée est constituée non seulement de delvauxite amorphe, mais aussi de goethite et d'akaganéite.

Anglésite, $PbSO_4$

Dans la carrière N de Richelle, l'anglésite est observée par Fransolet et al. (1977) sur des «phtanites», en association avec la galène très altérée, la cérusite, la pyromorphite et la corkite. L'anglésite est décrite comme une poudre microcristalline blanc gris comblant les cavités de dissolution de la galène, ou formant des cristaux millimétriques incolores mais aussi des cristaux blancs parfois mal individualisés pouvant dépasser 5 mm de longueur (Planche 34).

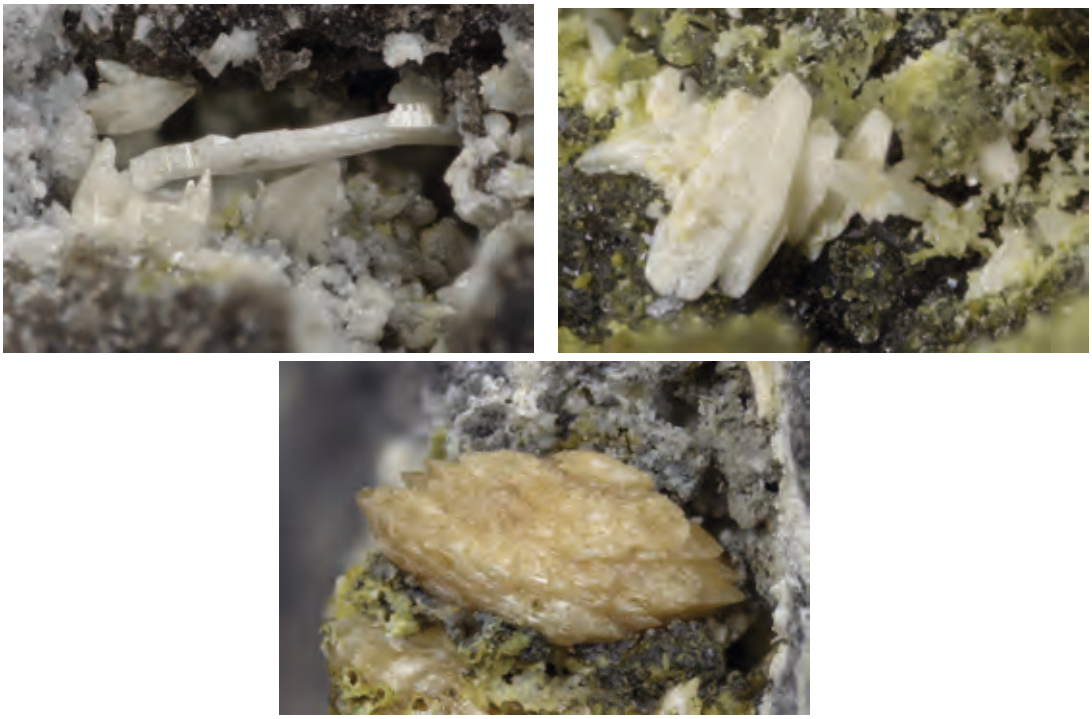


Planche 34 : Anglésite de Richelle (34a) grand cristal allongé, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,85 mm – (34b) agrégat de cristaux blancs, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,60 mm – (34c) gros cristal isolé, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 4,20 mm.

Brianyoungite, $Zn_3(CO_3)(OH)_4$

Sur un seul échantillon provenant d'une ancienne collection, nous avons observé des petites fibres blanc nacré en étoiles sur des cristaux de sphalérite (Planche 35). L'identification du minéral est effectuée par diffraction des rayons X, avec le diffractomètre à quatre cercles. Les raies de diffraction sont en très bon accord avec celles de la brianyoungite d'Angleterre (Tableau 2). Les analyses chimique qualitatives par EDS mettent bien en évidence les élément Zn, C , S et O, confirmant ainsi l'identité du minéral.

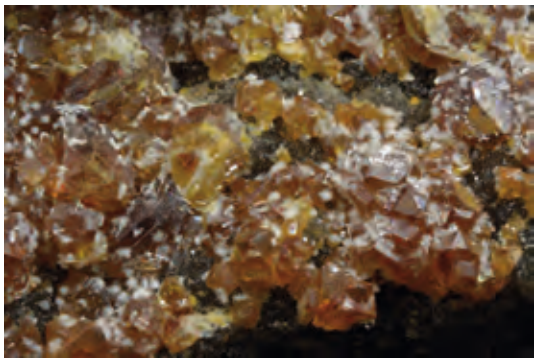
La brianyoungite est une espèce minérale déjà signalée en Belgique dans le gisement de la vieille Montagne à Hollogne-aux-Pierres (Livingstone & Champness, 1993).

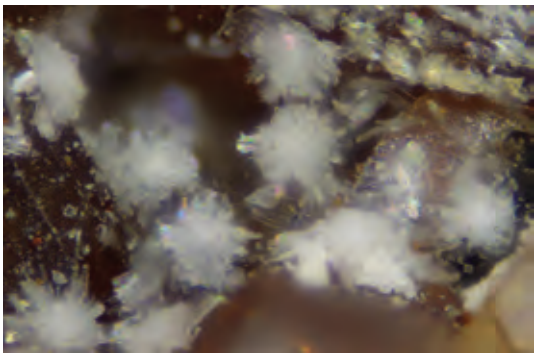
Brochantite, $Cu_4(SO_4)(OH)_6$

De minuscules groupes de cristaux verts ont été observés sur un seul échantillon de brèche plombifère de Richelle, et sont visuellement identifiés comme brochantite (Figure 19). L'identification est confirmée par un diffractogramme de poudres de rayons X et par des analyses chimiques qualitatives EDS qui indiquent la présence des éléments majoritaires O, Cu et S. Une présence très minime de Si et Fe est également constatée. La brochantite n'était pas encore recensée dans la région.

Cérusite, $PbCO_3$

Dans la carrière N de Richelle, la cérusite est observée par Fransolet et al. (1977) sur des «phtanites», en association avec la galène très altérée, l'anglésite, la pyromorphite, la corkite et la wulfénite. La cérusite forme des encroûtements minces de couleur blanche aisément identifiables par la fluorescence jaune très vive qu'elle manifeste sous une lampe ultra-violette en ondes longues. Sous ondes courtes, l'émission est moins vive. Les cristaux sont généralement fort petits et ne dépassent pas 0,2 mm de longueur (Figure 20). Les beaux cristaux limpides sont rares à Richelle.





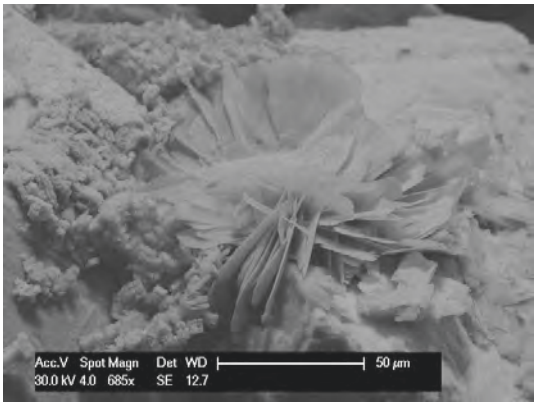


Planche 35 : Brianyoungite de Richelle (35a) petits agrégats sur sphalérite, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image = 4,8 mm – (35b) gros plan sur ces rosettes, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image = 0,62 mm – (35c) image MEB de l'échantillon RIC30.

Chalcopyrite, $CuFeS_2$

La chalcopyrite est signalée avec malachite dans la carrière N par Lohest (1883), et dans la carrière M par Legrand (1958). Les échantillons de la carrière N que nous avons pu observer montrent la chalcopyrite en petites mouchetures dans les roches plombifères ou en inclusions dans la galène. Les cristaux sont peu fréquents et généralement mal formés. Ils sont très souvent recouverts d'un enduit violacé identifié visuellement et par diffraction des rayons X comme étant de la covellite (Figure 21). Au nord de la carrière M, nous avons observé un bloc de calcaire silicifié avec de nombreuses mouchetures de chalcopyrite accompagnées de petites gerbes de malachite dans les cavités.

Covellite, CuS

Des recouvrements bleu violacés métalliques caractéristiques de la covellite sont observés sur des cristaux de chalcopyrite à la carrière N de Richelle (Figure 21). Le radiogramme de poudre réalisé sur ce matériel confirme l'identification visuelle. La covellite n'est pas recensée par Fransolet et al. (1974) mais bien par Hatert et al. (2002). Des cristaux violacés en petites lamelles d'apparence hexagonale sont également observés avec sphalérite dans la carrière N', au sein de la brèche grise de calcaire silicifié. Ils sont identifiés visuellement comme étant de la covellite.

Cryptomélane, $K(Mn^{4+}_7Mn^{3+})O_{16}$

A Richelle, dans la fraction lourde de la brèche de la carrière N', Van Tassel (1959) a observé le cryptomélane enveloppant une partie d'un cristal de torbernite-autunite. Le minéral, identifié par diffraction des rayons X, est décrit comme se présentant sous forme d'écailles crêtées ou de minuscules fragments mamelonnés à texture concentrique. Nous n'avons pas retrouvé ce minéral.

Tableau 2 : Dépouillement du radiogramme de poudres de la brianyoungite de Richelle.

* Brownley Hill Mine, Nenthead, Cumbria, Angleterre d'après Livingstone & Champness (1993).

Intensité des raies : TF = Très fort, F = fort, m = moyen, f = faible.

Angleterre*	Richelle
15,44 (100)	-
7,88 (100)	**7,866 (TF)**
5,25 (20)	5,179 (m)
4,13 (5)	4,065 (m)
-	3,415 (f)
3,944 (5)	-
3,128 (10)	3,137 (m)
2,976 (10)	-
2,907 (10)	-
2,802 (10)	-
2,714 (40)	**2,714 (F)**
2,661 (10)	
2,577 (20)	2,576 (m)
2,478 (5)	-
2,397 (20)	2,398 (f)
2,336 (5)	-
2,253 (10)	2,254 (m)
2,034 (10)	2,049 (m)
-	1,932 (m)
1,748 (15)	1,746 (m)
1,565 (30)	**1,560 (F)**
1,547 (10)	-
1,484 (10)	1,485 (m)
1,351 (10)	1,353 (m)
-	1,189 (m)
1,024 (5)	1,024 (m)

Galène, PbS

Dans la carrière N de Richelle, la galène, généralement très altérée, est observée par Fransolet et al. (1977) sur des «phtanites». Des minéraux secondaires dont la cérusite, l'anglésite et la pyromorphite sont fréquemment présents dans des cavités cubiques résultant de la dissolution de cristaux de galène. Les blocs de cette paragenèse ne sont pas fréquents. La galène non corrodée est peu fréquente mais parfois observée en petits cubes millimétriques (Figure 22).

Gibbsite, $Al(OH)_3$

La gibbsite se présente en petits globules atteignant 1 mm, de couleur beige et disséminés dans une partie argileuse d'une brèche siliceuse grise (Figure 23). En surface, les globules ont une structure grenue mais leur structure interne semble plus homogène et de couleur blanchâtre. Le minéral est confirmé par diffraction des rayons X mais le diffractogramme montre aussi quelques raies non attribuées, suggérant un mélange. L'analyse chimique qualitative EDS de la partie centrale des globules indique la présence importante d'oxygène et d'aluminium, confirmant ainsi la gibbsite. Il y a aussi de manière très minoritaire Si, P, Ca, Fe et F, suggérant la présence minoritaire de quartz et d'un phosphate que nous n'avons pas réussi à identifier. La gibbsite n'était pas encore signalée à Richelle, ni ailleurs dans la commune de Visé.

Gypse, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$

Buttgenbach (1897) signale la présence de cristaux de gypse parfaitement visibles à la loupe, dans un échantillon de richellite. Fransolet et al. (1974a) la signalent le gypse dans la carrière N mais ne le décrivent pas en détail. Aujourd'hui, il est encore possible d'observer ce minéral dans des phtanites, en cristaux incolores pouvant atteindre un centimètre (Figure 24). Le minéral est identifié visuellement.

Hawleyite-greenockite, CdS

Un enduit jaune citron, observé sur un fragment de brèche grise à sphalérite de la carrière N', est visuellement déterminé comme un sulfure de cadmium. L'analyse chimique qualitative EDS montre la présence des éléments majoritaires Cd et S, ainsi que Si et O, attribués au quartz. Du fait du peu de matière disponible, il n'a pas été possible de réaliser une analyse par diffraction des rayons X pour déterminer s'il s'agit de greenockite ou de hawleyite.

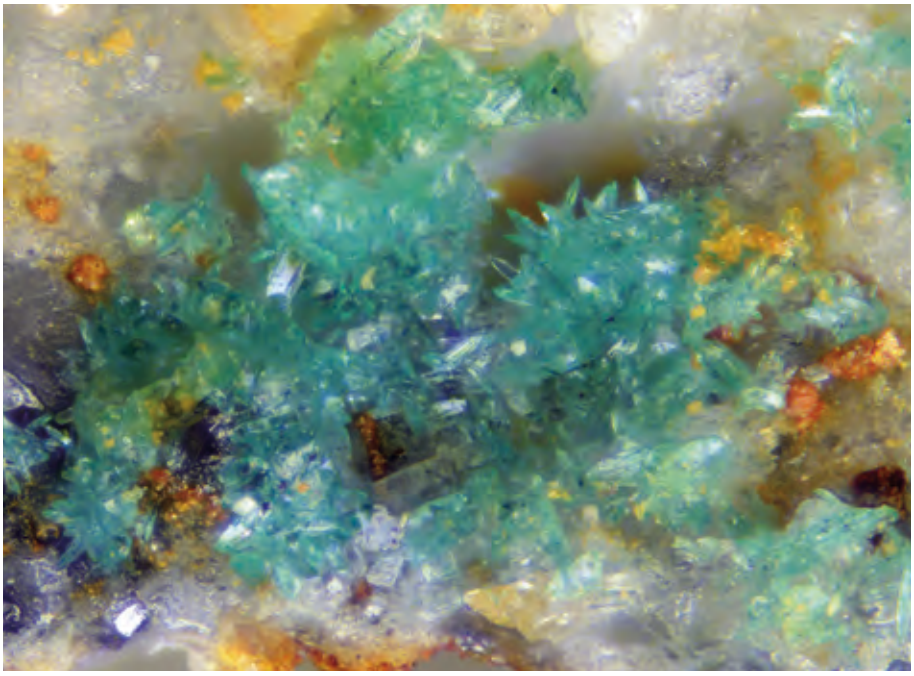


Fig. 19 : Brochantite de Richelle, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 0,60 mm.



Fig. 20 : Cérusite de Richelle, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,55 mm.

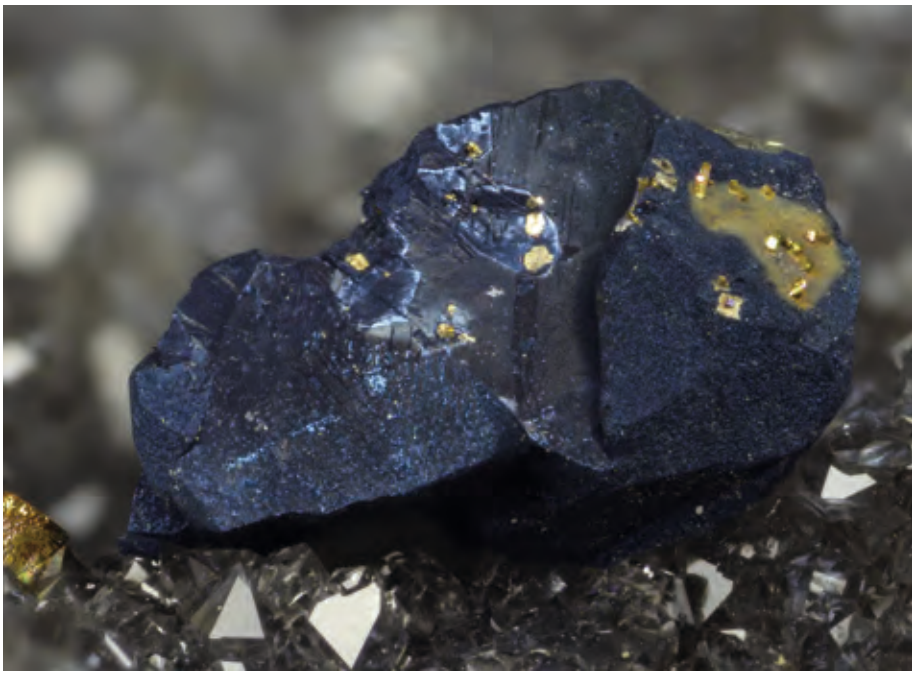


Fig. 21 : Chalcopyrite avec enduit de covellite, Richelle, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 2,35 mm.

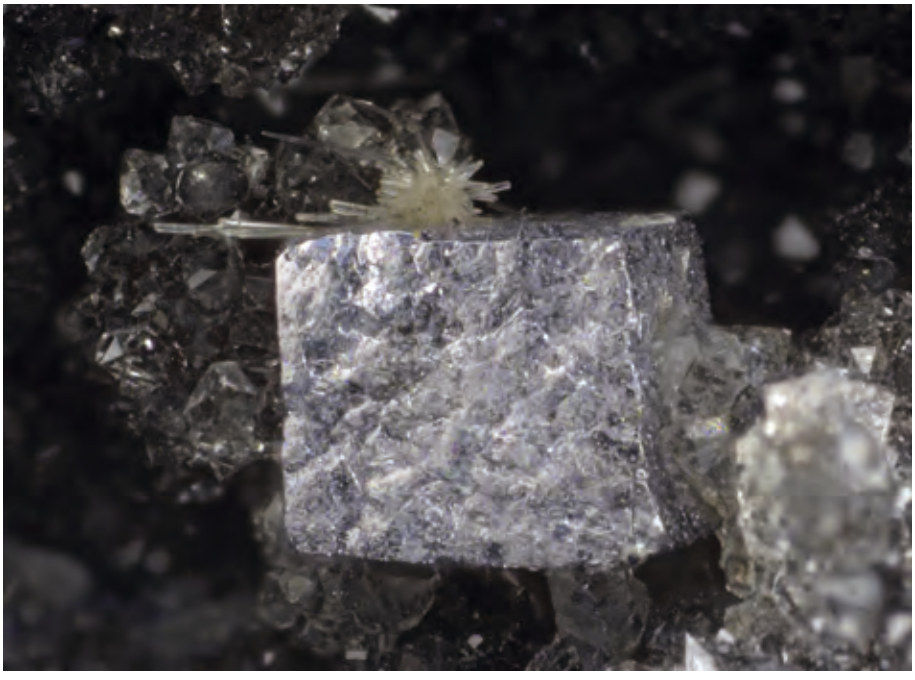


Fig. 22 : Cube de galène surmonté d'une petite gerbe de pyromorphite, Richelle, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,85 mm.



Fig. 23 : Gibbsite de Richelle, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 3,65 mm.



Fig. 24 : Gypse de Richelle, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 5,15 mm.

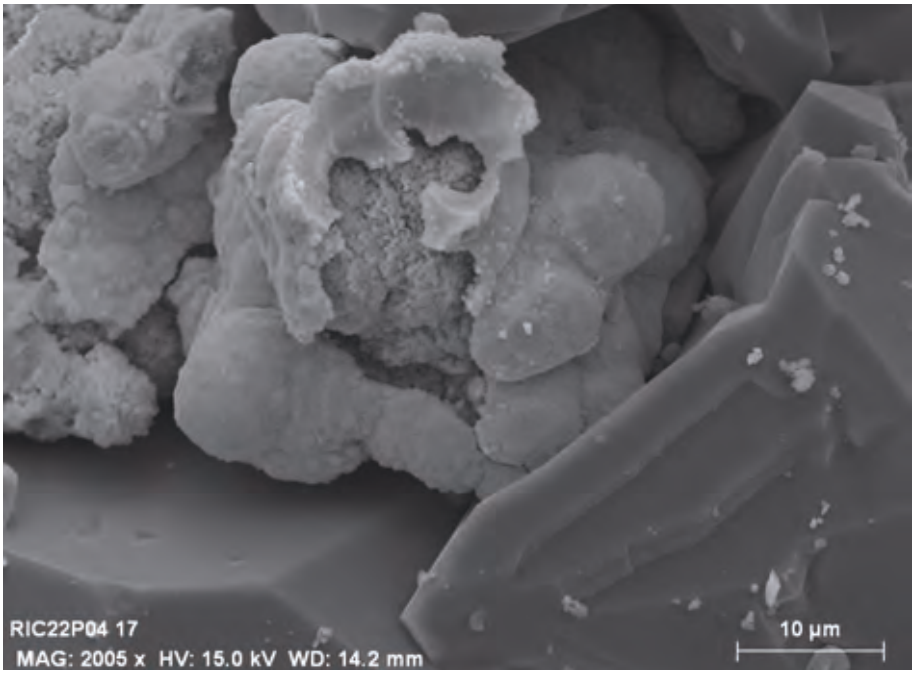


Fig. 25 : Hawleyite de Richelle, image MEB, échantillon RIC-22.

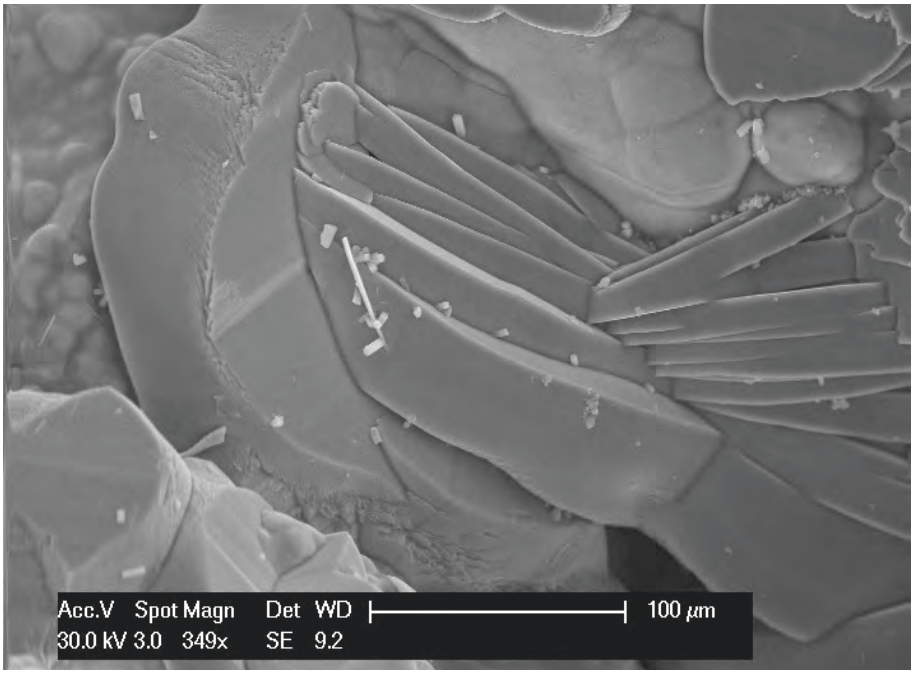
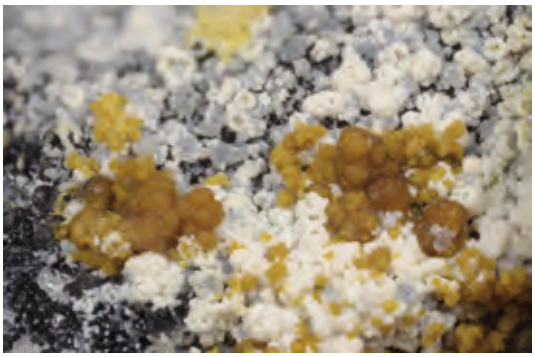


Fig. 26 : Lépidocrocite de Richelle, piquetée de quelques petits cristaux de fluorapatite, échantillon RIC5, image MEB.



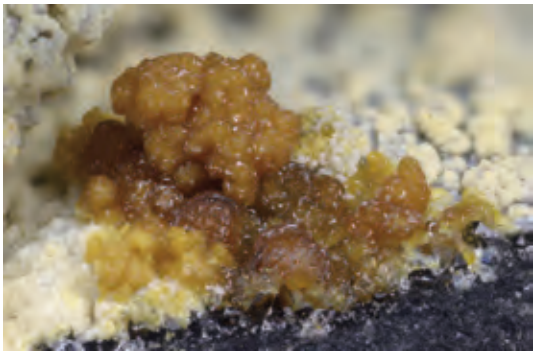


Planche 36 : Jarosite et koninckite en boules creuses de Richelle (36a) boules brun-orange de jarosite, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 3,10 mm – (36b) concrétion brun-orange de jarosite, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,85 mm.





Planche 37 : Malachite de Richelle (37a) association de cristaux, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,80 mm – (37b) belle grande gerbe de cristaux, collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 2,45 mm.

Les images obtenues en microscopie électronique à balayage montrent toutefois le minéral sous la forme de petites concrétions d'une dizaine de micromètres d'une forme apparemment cubique (Figure 25). Il pourrait alors s'agir de hawleyite, une espèce cubique déjà identifiée à Engis (Hatert et al. 2002) et à Rabotrath (Blondieau et al. 2016). La greenockite, son dimorphe hexagonal, ne semble pas avoir déjà été identifié en Belgique.

Jarosite, $KFe^{3+}(SO_4)_2(OH)_6$

La jarosite est signalée dans la carrière N par Fransolet et al. (1974a). On l'observe fréquemment en petites boules de couleur brun-orange très peu spectaculaires (Planche 36).

Lepidocrocite, $Fe^{3+}O(OH)$, et goethite, α-FeO(OH)

Dans la carrière N' de Richelle, nous avons observé un bloc ressemblant à une limonite scoriacée dans lequel se trouvaient des bouquets millimétriques blancs constitués de cristaux prismatiques. L'examen de ce bloc sous la loupe binoculaire a également montré des boules brunes identifiées visuellement comme étant de la goethite et des plages rouges cristallisées qui nous ont fait soupçonner la lépidocrocite. Une analyse par diffraction des rayons X de ce matériel a mis en évidence la présence d'un mélange de lépidocrocite et de goethite. L'analyse chimique qualitative EDS montre bien la présence des seuls éléments Fe et O, à la fois sur les boules mais aussi sur les cristaux. Les boules sont donc bien constituées de goethite alors que les cristaux rougeâtres correspondent à la lépidocrocite.

Les images en microscopie électronique à balayage montrent la lépidocrocite en cristaux aplatis assemblés en agrégats ou rosettes, pouvant atteindre 300 μm de longueur (Figure 26). Elle est intimement associée à la goethite en boules atteignant 30 μm de diamètre, ainsi qu'à l'apatite en bouquets de cristaux prismatiques hexagonaux ayant une longueur maximale de 100 μm. Les photos en microscopie électronique à balayage sont spectaculaires (Planche 18c). La lépidocrocite est une espèce nouvelle pour la localité. Cette carrière N' renferme donc les trois polymorphes de FeO(OH) : la goethite, l'akaganéite et la lépidocrocite.

Hormis dans la carrière N', la goethite n'est pas vraiment fréquente à Richelle. On l'a cependant identifiée visuellement en petites croûtes et boules fibroradiées noires, avec la jarosite de la carrière N.

Malachite, $Cu_2(CO_3)(OH)_2$

Au nord de la carrière M de Richelle, la malachite est identifiée visuellement en petites gerbes sur des échantillons de calcaire silicifié contenant de nombreuses mouchetures de chalcopyrite (Planche 37). L'espèce n'est pas recensée par Fransolet et al. (1974) mais bien par Hatert et al. (2002).

Marcasite et pyrite, FeS_2

La marcasite est observée en petits cristaux prismatiques, parfois maclés, d'un demi-millimètre environ (Planche 38). Ils sont associés à des cristaux de pyrite et sont posés sur un liseré de cristaux de quartz, dans la brèche siliceuse noire à grain très fin et à cassures coupantes. La marcasite, mais aussi la pyrite, sont identifiées par diffraction des rayons X et par des analyses chimiques qualitatives EDS qui mettent en évidence une même composition chimique pour les deux espèces. On y observe les éléments Fe et S majoritaires, mais également O trahissant un certain degré d'altération de surface de ces deux sulfures. Dans les deux espèces, on note également la présence minoritaire des éléments Al, Si, Pb, Ca et Cu cités par abondance décroissante.

La marcasite n'était pas encore signalée à Richelle ni ailleurs dans la commune de Visé. Par contre, Fransolet et al. (1974a) ont signalé la pyrite dans la carrière N, mais ils ne la décrivent pas en détail. Aujourd'hui, il est encore possible d'observer ce minéral sur quartz enfumé, souvent en essaim de minuscules cubes simples sans troncature, ou parfois avec des petites faces {111}.

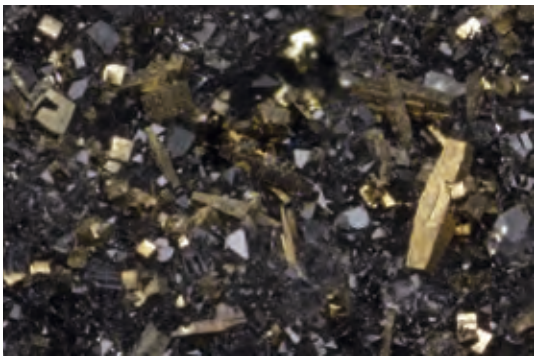
Quartz et calcédoine, SiO_2

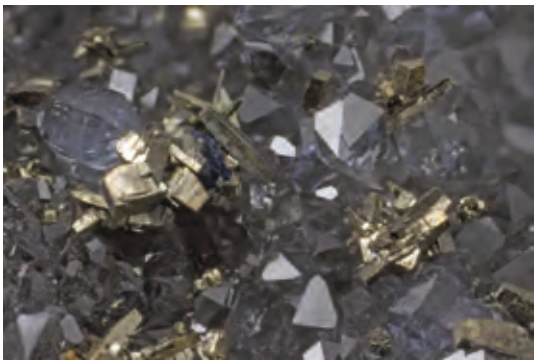
A propos de la carrière N déjà abandonnée à cette époque, Lohest (1883) écrit : « Elle est connue de nos étudiants sous le nom de « carrière au quartz » à cause des cristaux de quartz, quelquefois enfumés, que l'on trouve en abondance sur et dans de gros blocs de phtanite houiller, massif ou caverneux, épars sur le sol. » Les pièces garnies de cristaux de «quartz fumé» et de «quartz noir» très brillant de Richelle sont bien connues des collectionneurs de minéraux belges (Figure 27). L'aspect «enfumé» ou «noir» de ces quartz est sans doute dû à la radioactivité de ces brèches de dissolution. Les cristaux, au plus centimétriques, montrent un prisme court et des faces pyramidales très visibles et de grand éclat (Van der Meersche, 1989). Les cristaux de quartz sont souvent recouverts d'enduits blanchâtres constitués de l'association phosphosidérite-strengite qu'il faut éliminer par voie chimique (Figure 28).

Dans la carrière M de Richelle, on peut observer des éléments d'une brèche brune à richellite se présentant en fragments siliceux blanc bleutés et rubanés pouvant aller jusqu'à quelques centimètres. Ce matériel est identifié visuellement comme étant de la calcédoine, cette dernière étant déjà recensée à Richelle par Hatert et al. (2002).

Sidérite, $FeCO_3$

A l'intérieur d'une petite géode de brèche grise silicifiée contenant de la sphalérite, une minuscule croûte brun clair est identifiée visuellement comme étant de la sidérite (Figure 29). Quelques pseudomorphoses de cristaux apparemment rhomboédriques sont également présentes sur l'échantillon et sont de couleur brune. L'espèce est confirmée par diffraction des rayons X et par analyse chimique qualitative EDS qui indique la présence majoritaire des éléments O, Fe et C. On remarque toutefois la présence très minoritaire des éléments Al, Zn, Mn et Ca. La sidérite n'était pas encore signalée à Richelle.





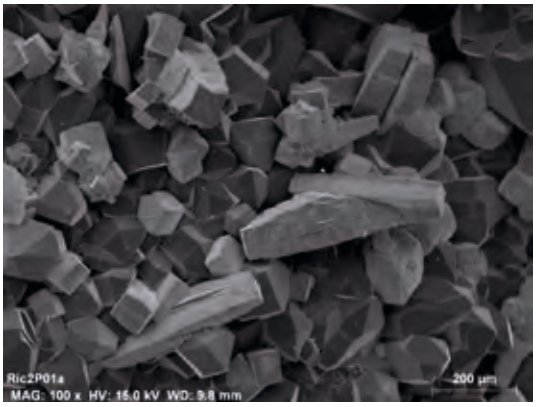


Planche 38 : Marcasite et pyrite sur liseré de quartz de Richelle (38a) cristaux allongés de Marcasite et petits cubes de pyrite, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,50 mm – (38b) idem, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,90mm – (38c) image MEB de l'échantillon RIC2.



Fig. 27 : Quartz noir de Richelle. Collection S. Puccio.

Smithsonite, $ZnCO_3$

La smithsonite est fort discrète à Richelle où elle se présente le plus souvent en globules millimétriques gris en forme de «grains de riz» et plus rarement en petits cristaux, notamment sur sphalérite. Le minéral est confirmé par diffraction des rayons X, et l'analyse chimique qualitative EDS indique la présence majoritaire des éléments O, Zn et C, ainsi que du calcium fort minoritaire. La smithsonite n'était pas encore signalée à Richelle. La présence de ce carbonate de zinc n'a cependant rien de surprenant dans ces anciennes carrières de calcaire là où trois autres espèces contenant du zinc sont déjà signalées (hopéite, scholzite et sphalérite).

Soufre, S

Dans des cavités de la brèche siliceuse grise de la carrière N', la présence de globules jaunes est souvent observée au voisinage de plages de sphalérite. L'analyse par diffraction des rayons X de ce matériel indique qu'il s'agit bien de soufre. Dans la carrière N de Richelle, le soufre est observé par Fransolet et al. (1977) sur de la galène très altérée des phtanites avec cérusite, anglésite et pyromorphite.

Sphalérite, ZnS

Dans la carrière N de Richelle, la sphalérite jaune miel accompagne parfois la scholzite (Fransolet et al., 1974b). Dans des cavités de la brèche siliceuse grise de la carrière N', des plages souvent jaune orange assez claires sont visuellement identifiées comme de la sphalérite (Planche 39), ce que confirme l'analyse par diffraction des rayons X.

Wulfénite, $PbMoO_4$

Dans la carrière N de Richelle, la wulfénite est observée par Fransolet et al. (1977) sur des blocs noirs à galène. Elle se présente en cristaux jusqu'à 1 mm de longueur, constitués de petits prismes tétragonaux allongés surmontés d'un quadroctaèdre très aigu. Les minéraux associés sont la pyromorphite, la cérusite, l'anglésite, la corkite et la richellite. La wulfénite en petits cristaux n'est pas vraiment rare dans la brèche plombifère. On peut l'observer sous différents habitus : cristaux fins et très allongés ou plus trapus. La couleur des cristaux varie du gris au brun miel (Planche 40).

Relations génétiques entre quelques espèces de phosphates

Les carrières de Richelle sont un véritable «chaudron» dans lequel quelques éléments chimiques seulement ont pu s'associer pour former un grand nombre d'espèces minérales. Parmi les éléments principaux, il faut citer le fer, le calcium, l'aluminium et le phosphore. Les mécanismes qui ont été à la base de ces genèses sont complexes mais nous pouvons néanmoins émettre quelques remarques concernant certaines espèces de la classe des phosphates.

Les rognons de destinézite et de delvauxite

La delvauxite et la destinézite sont des espèces chimiquement proches mais la delvauxite renferme du calcium tandis que la destinézite n'en contient pas. Par ailleurs, la destinézite est bien cristalline alors que la delvauxite est amorphe.

Destinézite $Fe^{3+}_2(PO_4)(SO_4)(OH).\ 6H_2O$
Delvauxite $CaFe^{3+}_4(PO_4,SO_4)_2(OH)_8.4\text{-}6H_2O$

Forir (1881) écrit : «La diadochite [en fait, la destinézite] se rencontre dans les phtanites peu altérés, et qui ne sont exposés au contact de l'air et à l'infiltration des eaux pluviales que depuis un temps relativement court, tandis que la delvauxite git, en général, dans des phtanites fort altérés, et est d'autant plus brune que les phtanites sont entrés plus largement dans la voie de la décomposition.» Plus loin, il ajoute : «Ces diverses considérations me portèrent à rechercher si, en reproduisant artificiellement les causes naturelles d'altération, je ne parviendrais pas à obtenir, avec la diadochite [destinézite] blanche, de la delvauxite brune.»

Les essais qu'il a réalisés lui ont permis de constater effectivement le changement de couleur supposé mais de manière erronée, il en a déduit que la destinézite et la delvauxite étaient

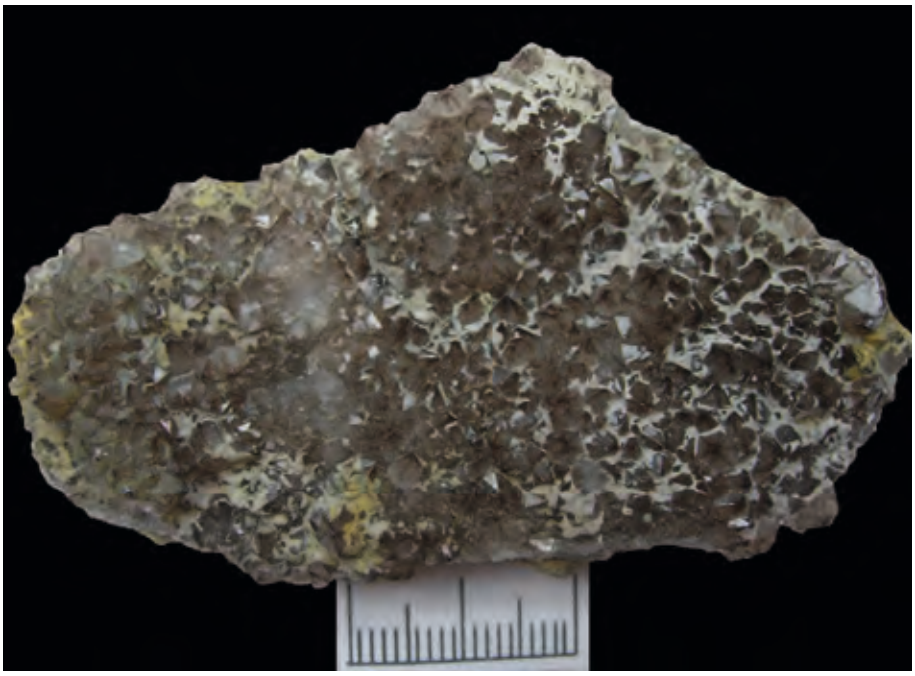


Fig. 28 : Quartz enfumé de Richelle avec enduit blanchâtre constitué de l'association phospho-sidérite-strengite. Collection et photo M. Blondieau, largeur de l'image 10 cm.

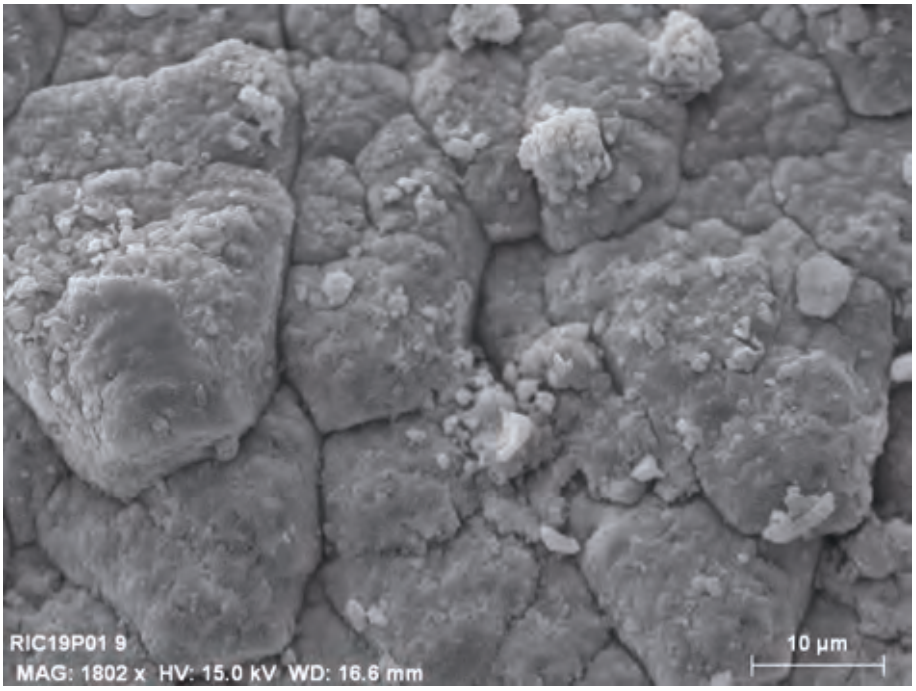


Fig. 29 : Cristaux mal formés de sidérite zincifère de Richelle. Image MEB de l'échantillon RIC 19.

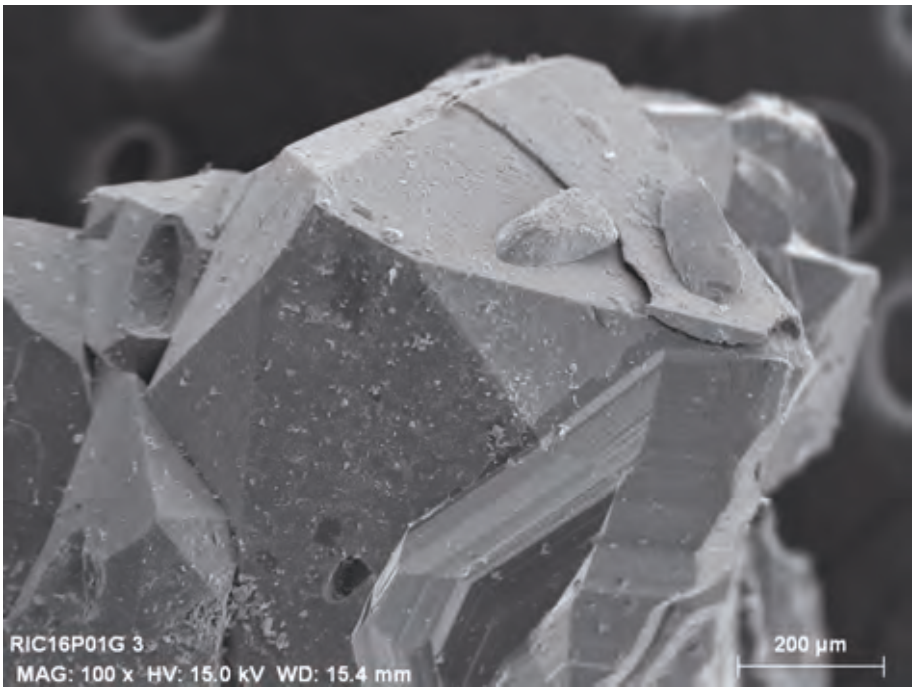


Fig. 30 : Smithsonite de Richelle en «grain de riz» sur quartz. Image MEB de l'échantillon RIC 16.



Fig. 31 : Soufre de Richelle. Collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,25 mm.

deux variétés d'une même espèce minérale. Plus tard, Cesàro (1897) confirme la transformation de destinézite en delvauxite. Il écrit : «La destinézite est remarquable par le fait qu'elle se laisse enlever de l'acide sulfurique par l'eau [].. contenant une trace de carbonate alcalin. La chaleur en expulse l'acide sulfurique et donne comme résidu un phosphate basique». Ce phosphate basique cité par Cesàro (1897) n'est sans doute rien d'autre que de la delvauxite.

Par ailleurs, la partie interne brun jaunâtre d'un nodule de delvauxite de Berneau, analysée par diffraction des rayons X, indique qu'elle est constituée de destinézite. La croûte brun marron de delvauxite est donc bien une auréole de réaction formée aux dépens de la destinézite.

Dans le même article, Cesàro (1897) signale également la transformation possible de la delvauxite en destinézite : «Lorsqu'on dissout dans l'acide sulfurique un phosphate ferrique basique ayant la composition de la delvauxite, ou de la delvauxite naturelle, puis qu'on additionne le liquide d'eau distillée froide, après quelques minutes le liquide se trouble et l'on obtient un dépôt blanchâtre, qui est un phosphate ferrique analogue à la destinézite. Cette expérience indique le mode de formation probable de l'espèce»..

La destinézite et la delvauxite sont donc deux espèces pouvant se transformer l'une en l'autre selon les conditions physico-chimiques du milieu. Ainsi, au contact du calcaire (source du calcium), des réactions chimiques modifient la structure de la destinézite et la transforment en delvauxite, ce que nous avons d'ailleurs pu constater dans la tranchée au sud de la carrière N en 1995. Cette observation de delvauxite au contact du calcaire

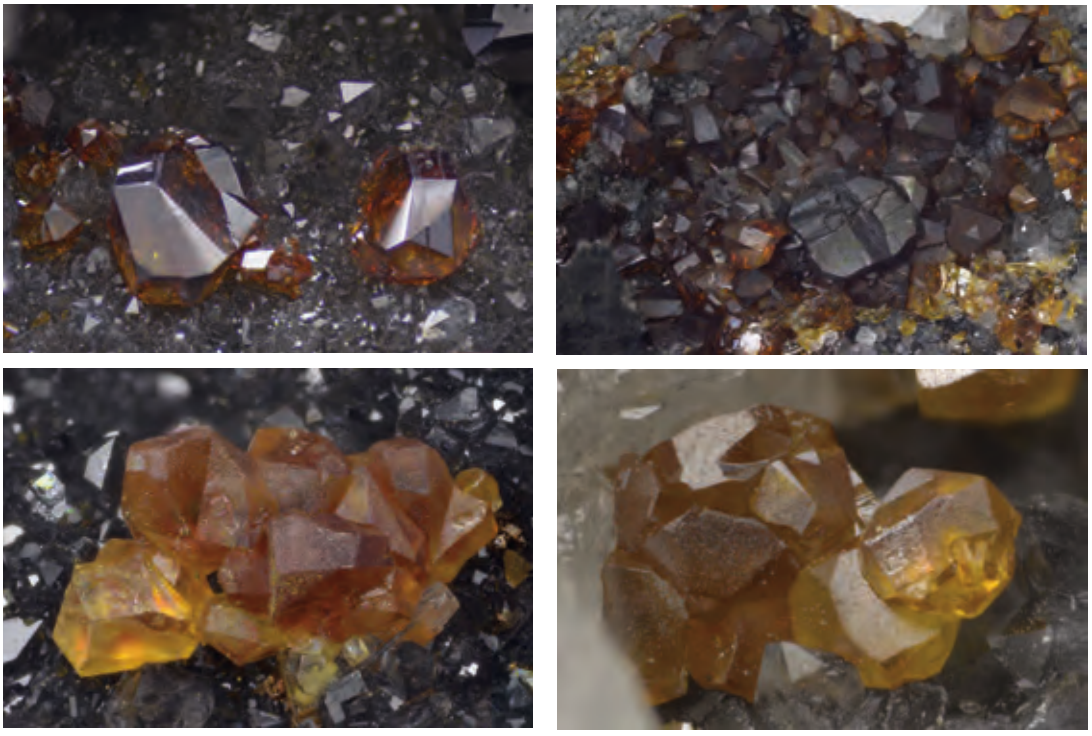


Planche 39 : Sphalérite de Richelle (39a) beaux petits cristaux très lumineux, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 3,75 mm – (39b) association de cristaux de sphalérite de couleur foncée, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 8,50 mm – (39c) cristaux de belle couleur mais peu étincelants, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,80 mm – (39d) belle association de cristaux, collection et photo P. Chollet, largeur de l'image 1,45 mm.

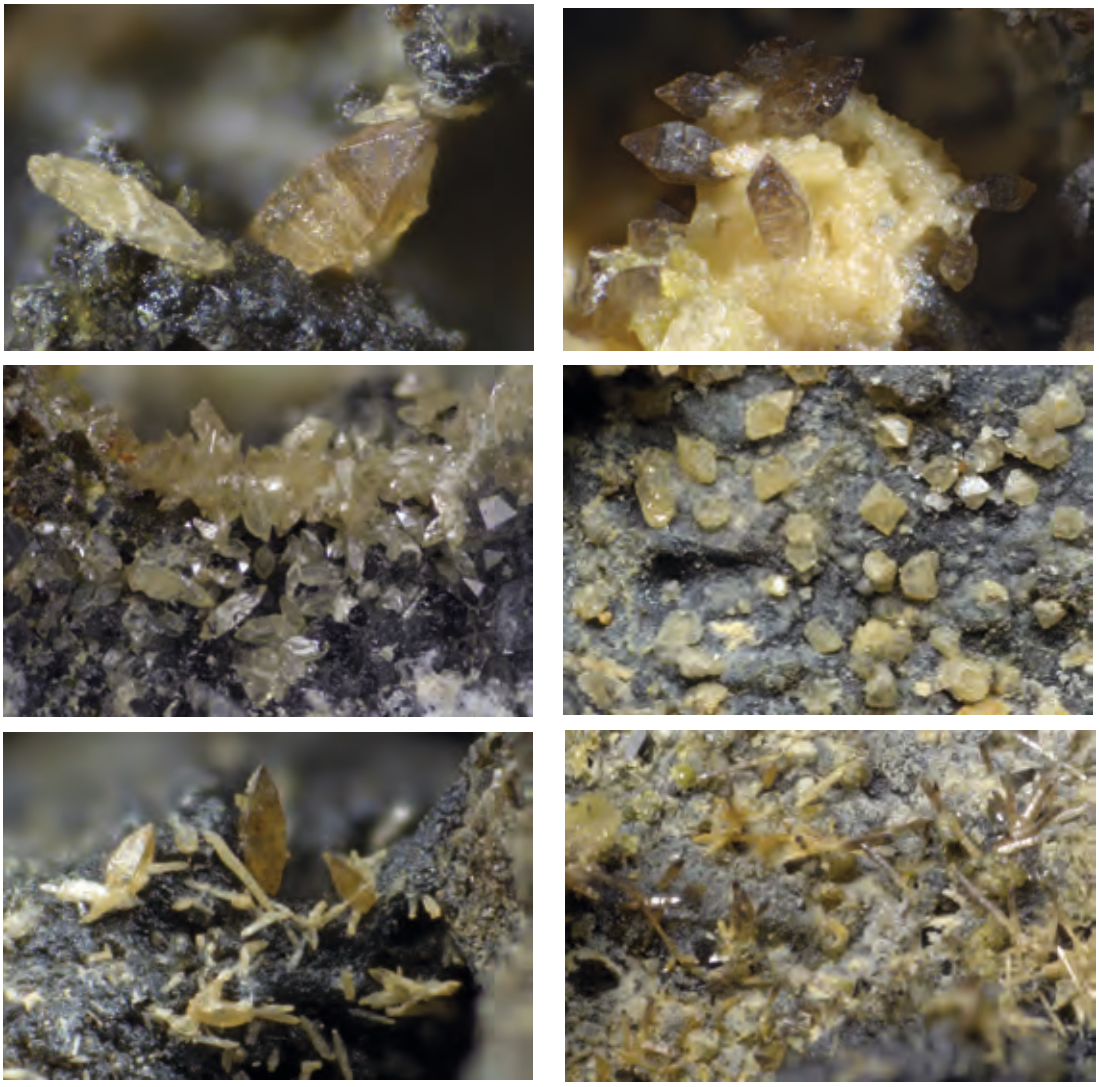


Planche 40 : Wulfénite de Richelle (40a) beaux cristaux, collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 0,44 mm – (40b) idem, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,0 mm – (40c) association de nombreux cristaux, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,85 mm – (40d) cristaux assez trapus, collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 2,30 mm – (40e) beaux cristaux, collection S. Puccio, photo P. Chollet, largeur de l'image 0,90 mm – (40f) nombreux cristaux très fins et très allongés, collection M. Blondieau, photo P. Chollet, largeur de l'image 1,45 mm.

avait déjà été signalée par Lohest (1883) dans la coupe-type de la destinézite à Argenteau

On a pu y observer des rognons bruns de delvauxite (minéral amorphe aux rayons X) au contact du calcaire et, quelques dizaines de centimètres plus haut, des rognons de même formes et tailles mais constitués de destinézite, un minéral microcristallin de couleur blanc jaunâtre (Planche 41). Ces échantillons ont été étudiés par diffraction des rayons X, par analyse chimique qualitative EDS et par fluorescence X. Cette dernière nous a fourni la composition chimique semi-quantitative des deux variétés de nodules. Les teneurs mesurées des éléments majoritaires Fe, P, S et Ca sont en bon accord avec celles indiquées dans les

Tab 3 : Eléments majoritaires mesurés par fluorescence X dans les nodules blanc-jaunâtres de destinézite et les nodules rouges de delvauxite de la tranchée d'Argenteau. Une différence marquée existe pour le soufre et le calcium dans ces deux types de nodules.

Nodule	Fe (%)	P (%)	S (%)	Ca (%)	Si (%)	Al (%)	K (%)
Blanc-jaunâtre	27,5 ± 0,3	8,06 ±0,08	7,73 ±0,08	0,64 ±0,06	3,75 ±0,08	1,68 ±0,14	0,51 ±0,05
Brun-rouge	32,2 ± 0,4	9,55 ±0,11	0,22 ±0,01	5,97 ±0,2	0,59 ±0,06	0,28 ±0,13	0,1 ±0,03
Clarke	4,1	0,1	0,03	4,1	27,7	8,2	2,1

formules chimiques théoriques de ces deux espèces minérales (Tableau 3). On observe notamment une plus grande abondance de soufre dans la destinézite tandis que le calcium est nettement plus abondant dans la delvauxite.

La richellite et les phosphates néoformés

Nous avons procédé à des analyses par diffraction des rayons X sur des fragments sélectionnés de deux échantillons historiques de richellite de la localité-type et récoltés par G. Cesàro (Planche 9d). Il s'agit des échantillons N°1243 et N°9362 conservés au Laboratoire de Minéralogie de l'Université de Liège. Les diffractogrammes obtenus sont naturellement ceux d'un matériel amorphe montrant la présence de deux pics larges fusionnés en plateau entre 2,9 Å et 3,0 Å, ainsi qu'un semblant de pic large fort peu intense, parfois à peine marqué, autour de 5,6 Å (Figure 32a).

Dans les carrières de Richelle, on observe encore aujourd'hui de nombreux blocs bréchiques couverts d'enduits ou de croûtes jaune brun visuellement constitués d'une matière semblable à la richellite et nous avons diffracté de nombreux échantillons de ce type, provenant, pour la plupart, de nos recherches sur le terrain à Richelle. Les diffractogrammes obtenus, bien que généralement moins beaux, sont souvent proches de ceux obtenus sur les échantillons historiques mais peuvent aussi présenter des petits pics d'intensités modestes attribuables à la crandallite, un phosphate de calcium et d'aluminium qui se caractérise par deux pics principaux à 2,94 et 2,98 Å.

Dans la Figure 32, nous superposons quatre diffractogrammes de poudres qui permettent de comparer la richellite de la localité-type (richellite N°1243, Figure 32a), une phase résineuse translucide brun ambre de la carrière M (Figure 32b), une autre formant un enduit épais de couleur beige et identifiée visuellement comme richellite de la carrière M (Figure 32c), et enfin, pour comparaison, une crandallite bien cristallisée de Blaton qui montre des pics très élancés et très intenses (Figure 32d).

Le troisième échantillon (Figure 32c), visuellement identifié comme richellite, montre les pics de la crandallite que l'on peut comparer avec le diffractogramme de crandallite de Blaton (Figure 32d). En comparant tous ces diffractogrammes, il est bien tentant de rapprocher la richellite de la crandallite, mais ces deux espèces sont cependant différentes d'un point de vue chimique. Pour rappel, la richellite est un phosphate de fer et de calcium alors que la crandallite est un phosphate d'aluminium et de calcium. Toutefois, Mélon et al. (1976) ont publié une analyse chimique réalisée sur la richellite N°1243 que nous avons pu à nouveau étudier ; nous la reproduisons ci-dessous :

P_2O_5	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	F
30,65%	32,06%	3,16%	7,66%	0,34%
MgO	Na_2O	K_2O	H_2O	Total
0,15%	0,14%	0,16%	25,80%	100,12%

Si la formule idéalisée retenue est bien celle d'un phosphate de calcium et de fer, cette dernière a été déduite d'une formule plus complexe dans laquelle se retrouve aussi de l'aluminium et qui avait été formulée comme suit : $(Ca_{0,95}Mg_{0,05})(Fe_{0,87}Al_{0,13})_3(PO_4)_3(OH_{0,88}F_{0,12})_2.9\,H_2O$. Il y a donc bien de

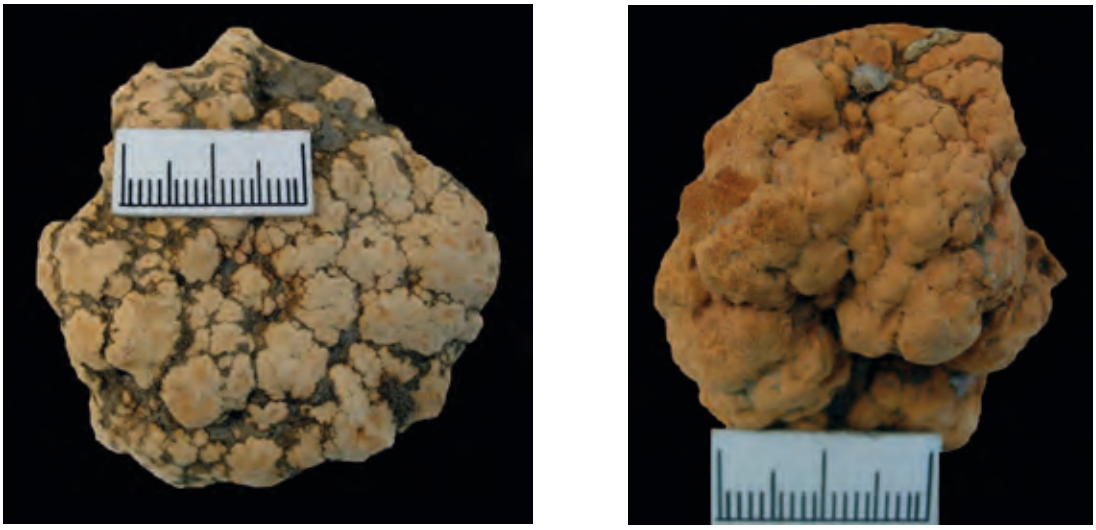


Planche 41 : Nodule blanc-jaunâtre de destinézite (a) et nodule brun-rouge de delvauxite (b) de la tranchée d'Argenteau.

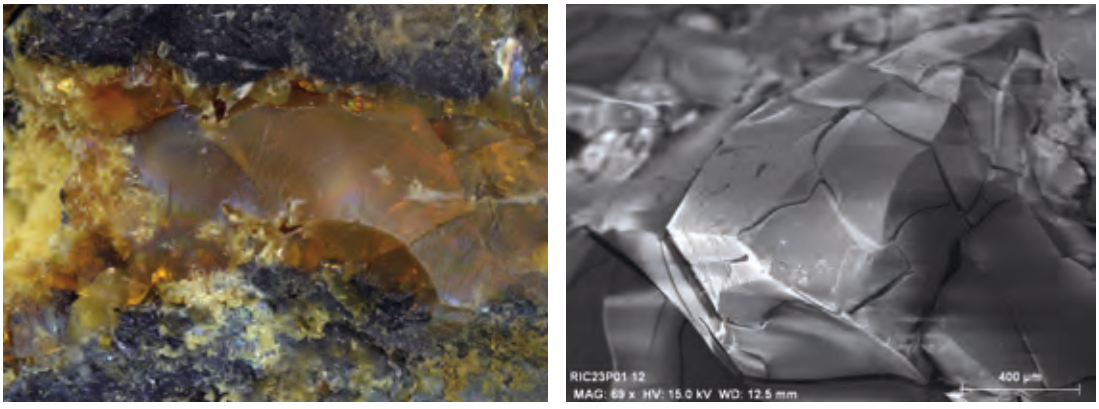


Planche 42 : Richellite d'aspect ambré de Richelle, parties homogènes craquelées (42a) échantillon de la collection M. Blondieau, photo P.Chollet, largeur de l'image 4,35 mm – (42b) vue de l'aspect craquelé du minéral, image MEB de l'échantillon RIC 23.

l'aluminium dans la richellite et il se retrouve dans des proportions non négligeables d'un atome pour huit de fer.

L'observatin de pics larges aux alentours de ceux de la crandallite dans des phases visuellement déterminées comme richellite pourrait suggérer l'existence d'un début d'organisation cristalline dans la matière amorphe constituant la richellite de ces échantillons.

Généralement, on considère que la richellite de la localité-type d'Argenteau s'est formée à partir d'une sorte de gel enrichi en phosphate de fer qui s'est accumulé au fond de la fameuse poche de dissolution décrite plus haut. On peut admettre qu'avant sa solidification, un début de cristallisation a pu produire ci et là dans la masse de la richellite des domaines plus cristallins mais néanmoins encore souvent très mal organisés. L'aluminium aurait ainsi formé des îlots un peu organisés sous la forme de crandallite et le fer (beaucoup plus abondant que l'aluminium) aurait tenté de s'organiser dans des phases cristallisées de phosphate de fer et en particulier de koninckite,

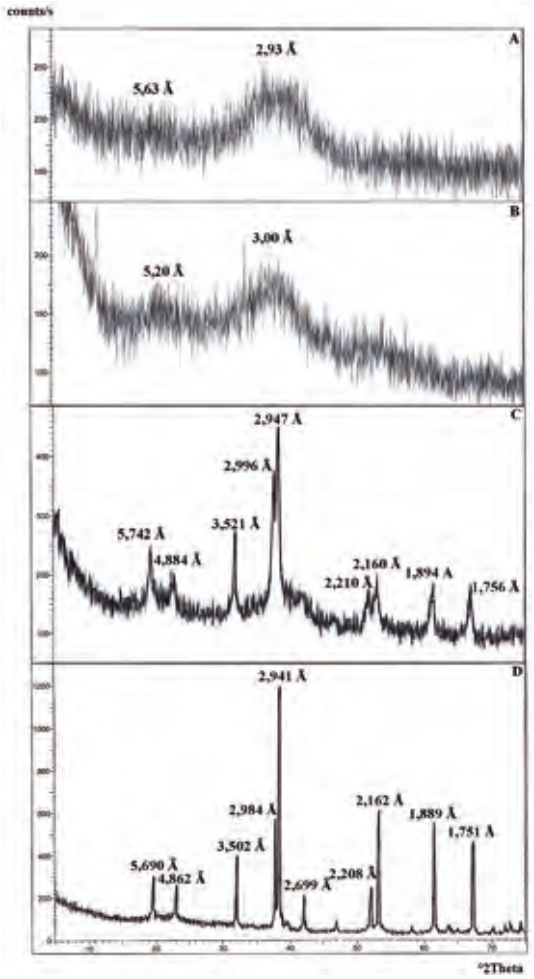


Fig. 32 : Superposition de quatre spectres de diffraction (32a) richellite N°1243 d'Argenteau – (32b) phase résineuse translucide de Richelle (carrière M) – (32c) richellite avec phase mal cristallisée de crandallite (carrière M) – (32d) crandallite bien cristallisée de Blaton.

une espèce d'ailleurs décrite à Argenteau en association avec la richellite.

L'importance des domaines en voie d'organisation peut être variable d'un échantillon à l'autre, ce que semblent indiquer les diffractogrammes de poudres obtenus après l'analyse de nombreux échantillons qui doivent être considérés comme majoritairement constitués d'un matériel amorphe avec aussi des domaines limités de crandallite dont la cristallinité est fort variable d'un échantillon à l'autre; ce que l'on conçoit bien en comparant les trois premiers diffractogrammes de la Figure 32.

La phase résineuse translucide brune, un peu ambrée, de la carrière M (Figure 32b) fournit un diffractogramme très comparable à celui de la richellite historique de la localité-type (Figure 32a), ce qui indique une très faible organisation cristalline.

En microscopie électronique à balayage, on observe majoritairement des parties craquelées d'aspect homogène (Planche 42) pour lesquelles l'analyse chimique qualitative par EDS indique l'absence de silicium et met en évidence la présence des éléments O, P, Fe, Al et Ca. Visuellement, on aurait pu identifier ce minéral comme une allophane mais il s'agit bien d'une phase proche de la richellite, ce que confirment à la fois le diffractogramme de poudres et l'analyse chimique qualitative. Toutefois, on peut également observer des îlots moins homogènes qui, à fort grossissement, semblent développer des petites structures globulaires (Planche 43).

L'analyse chimique qualitative par EDS sur ces îlots moins homogènes semble indiquer une composition chimique différente de celle des parties plus homogènes. Les quantités de phosphore, de calcium et d'oxygène sont comparables. Par contre, les îlots sont nettement enrichis en fer mais appauvris en aluminium. Ces résultats sont surprenants (l'inverse aurait été plus compréhensible) mais cette technique d'analyse chimique EDS est qualitative et ne permet pas de quantification. Toujours est-il que ces structures globulaires peuvent bien être interprétées comme une sorte d'ébauche de structuration cristalline au sein de la matière amorphe constituée de richellite.

La delvauxite et les phosphates néoformés

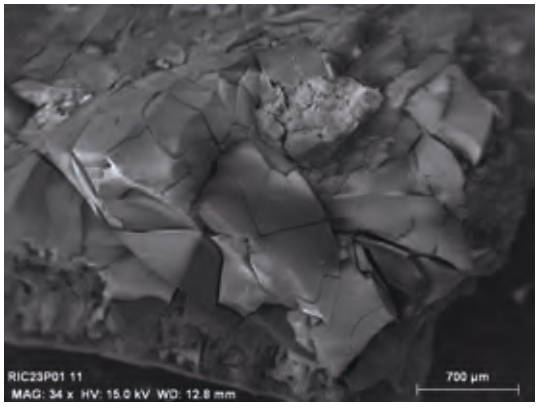
La delvauxite est surtout connue sous forme de rognons comme dans sa localité-type à Berneau ainsi qu'à Visé et Beez, mais la delvauxite peut également se présenter en couches de quelques centimètres d'épaisseur au contact des calcaires comme à Argenteau mais aussi à Beez (Blondieau et al., 2012). On l'a aussi observée en enduits millimétriques craquelés dans les carrières de Richelle (Figure 33) ou avec richellite et ferristrunzite dans les brèches de la carrière K de Visé, notamment (Figure 13). Des analyses par diffraction des rayons X ont été réalisées sur de nombreux échantillons montrant ces différents aspects.

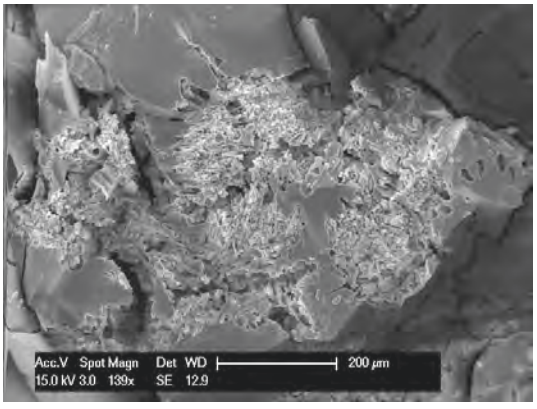
Par ailleurs, nous avons observé une veinule beige d'épaisseur millimétrique d'une matière d'aspect fibreux traversant la masse d'un rognon de delvauxite de Visé. L'examen du diffractogramme de cette veinule (Figure 34c) met en évidence la présence majoritaire de phosphosidérite bien cristallisée (pics intenses très effilés) ainsi que d'un peu de strengite fort minoritaire et mal cristallisée (pics large d'intensité très faible).

Un constat similaire a été fait sur des rognons de delvauxite de Beez dans lesquels un examen attentif nous a permis d'observer la présence de nodules blanchâtres millimétriques à centimétriques. Les analyses par diffraction des rayons X de ces nodules ont indiqué qu'il s'agissait d'un mélange en proportions plus ou moins équivalente de strengite et de phosphosidérite.

La delvauxite de ces deux localités contient donc des phases cristallines de ces deux phosphates de fer polymorphes de la koninckite. Les analyses par diffraction des rayons X de la delvauxite de Beez avaient déjà amené Bruyère (2004) à écrire : «Ainsi la delvauxite de Beez, phosphate de fer probablement amorphe, pourrait présenter des domaines montrant un début d'organisation cristalline en strengite, »..

Sur la Figure 34, nous superposons trois diffractogrammes de poudres de rayons X. En haut, il s'agit d'une delvauxite en rognon de la localité-type Berneau. En-dessous, il s'agit d'une delvauxite en enduit qui a été observée dans une brèche à ciment phosphaté rougeâtre de la carrière K de Visé. C'est une delvauxite de formation secondaire. Le dernier diffractogramme est celui de la veinule traversant le rognon de delvauxite de Visé.





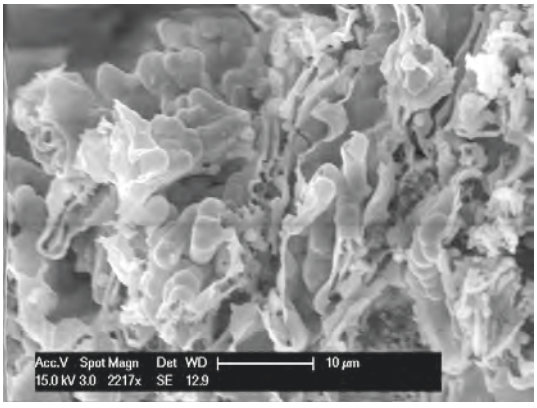


Planche 43 : Richellite d'aspect ambré de Richelle, îlots globulaires apparemment plus cristallins, images MEB de l'échantillon RIC 23 (43a) vue totale de l'échantillon avec l'îlot plus cristallin dans la partie supérieure de l'image – (43b) aspect d'ensemble de l'îlot plus cristallin – (43c) gros plan sur une partie de l'îlot plus cristallin montrant une structure en boules.

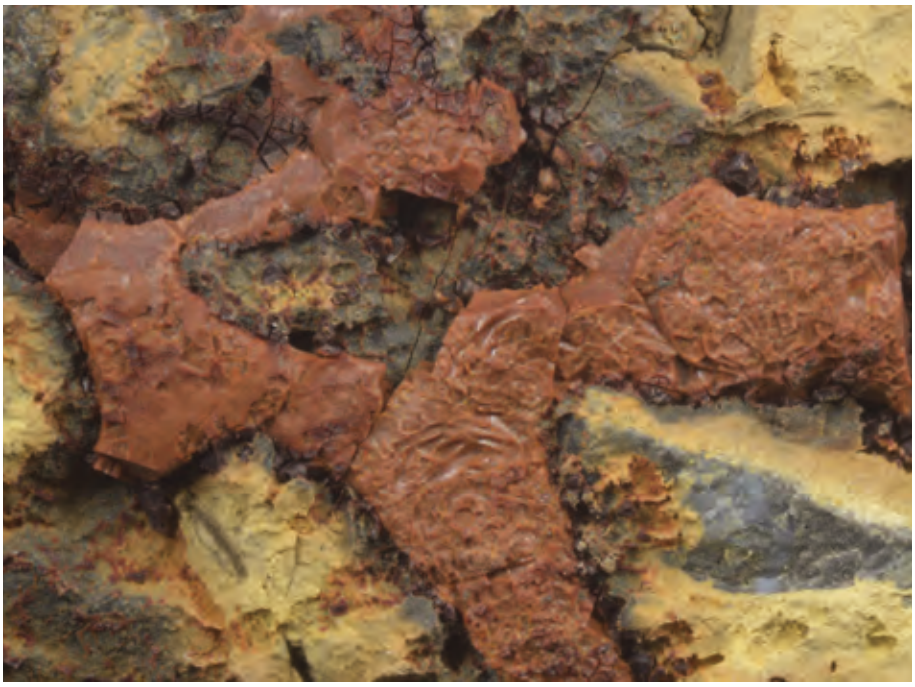


Fig. 33 : Delvauxite en petite croûte de Richelle, collection et photo P. Chollet, largeur de l'image 7,95 mm.

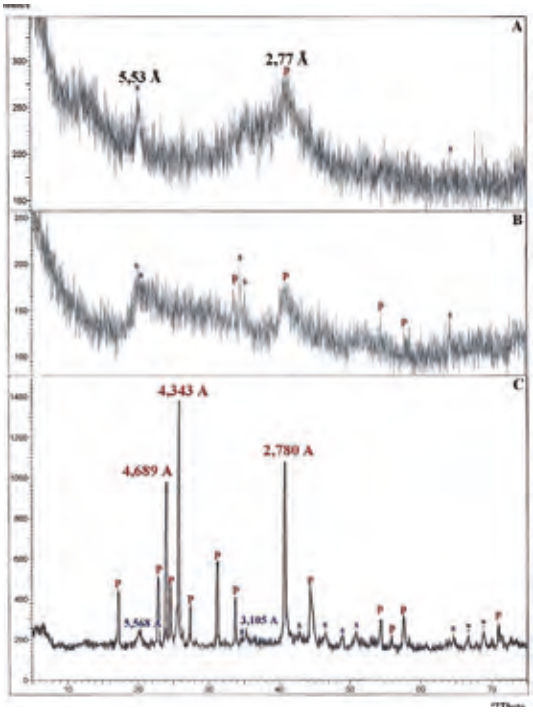


Fig. 34 : Superposition de trois diffractogrammes (34a) delvauxite de Berneau – (34b) delvauxite de Visé (carrière K) – (34c) veinule observée au travers d'un rognon de delvauxite de Visé. Cette dernière est constituée majoritairement de phosphosidérite ainsi que d'un peu de strengite. Les pics attribuables à la phosphosidérite sont mis en rouge et ceux de la strengite en bleu. Les valeurs des pics principaux mesurés et attribuables à la phosphosidérite et à la strengite sont indiquées sur la figure.



Fig. 35 : Structure vert olive à kaki observée dans les nodules de delvauxite de Beez et constituée d'une association mitridatite-strengite. Image MEB de l'échantillon BEE-1.

Les diffractogrammes obtenus sur les échantillons historiques de Berneau et de Visé montrent un pic très large centré sur 2,7 Å, ainsi qu'un autre de moindre intensité autour de 5,5 Å. Nous avons reproduit en haut de la Figure 34 celui de la delvauxite de Berneau. Le pic large autour de 2,7 Å pourrait correspondre à un des pics principaux de la phosphosidérite situé à 2,787 Å, et celui autour de 5,5 Å pourrait bien correspondre à un des pics principaux de la strengite situé à 5,509 Å. Le diffractogramme de l'enduit de delvauxite de la carrière K (Figure 34b) montre un profil assez comparable à celui du nodule de delvauxite de Berneau, avec quelques pics de faible intensité attribuables à la phosphosidérite et à la strengite; cette dernière semblant d'ailleurs bien représentée dans les échantillons «amorphes» de delvauxite comme l'avait d'ailleurs déjà remarqué Bruyère (2004).

Par ailleurs, dans des petites cavités de la delvauxite de Beez, on observe également des minuscules plages d'un matériel vert olive à kaki. L'analyse chimique qualitative de ce matériel faite par EDS indique la présence majoritaire des éléments O, Fe, Ca et P, ce qui est identique à la composition de la delvauxite. Observées en microscopie électronique, ces plages montrent des structures cristallines (Figure 35). Ce matériel a été également analysé par diffraction des rayons X : il s'agit d'un mélange de mitridatite et de strengite.

Conclusions

Les analyses réalisées sur les minéraux de Visé nous permettent d'ajouter une grosse dizaine d'espèces à une liste pourtant déjà bien longue : brianyoungite, brochantite, ferristrunzite, gibbsite, hawleyite, lépidocrocite, marcasite, mitryaevaite, sidérite, smithsonite, todorokite, vivianite et wavellite. Excepté la très rare mitryaevaite pour laquelle Richelle semble être la deuxième occurrence mondiale, toutes ces autres espèces étaient déjà recensées en Belgique.

Dans la commune du grand Visé, en comptant les 14 espèces supplémentaires que nous signalons dans cet article, on recense aujourd'hui 69 espèces minérales reconnues par l'I.M.A. On peut également ajouter l'anthraxolite et la calcédoine

Tableau 4 : Espèces minérales recensées dans la commune de Visé (Argenteau, Richelle et Visé), classées par classe chimique et par occurrences.

(*) : Les espèces mises en gras sont nouvelles pour la localité.
(**): Minéraux néoformés dans les poches de dissolution des calcaires
(T.L.) : « Type-locality»; espèces dont la localité-type se trouve dans le massif de Visé

Classe	Espèce minérale (*)	Calcaire (encaissant)	Shale/grès namurien	Argilites (**)	Poches à delvauxite	Brèche de dissolution
Eléments et Sulfures	Cuivre			+		
	Soufre					+
	Bornite	+				
	Chalcopyrite	+				+
	Cinabre					+
	Covellite					+
	Galène	+				+
	Hawleyite/Greenockite					+
	Marcasite					+
	Pyrite	+				+
	Sphalerite	+				+
Oxydes et Hydroxydes	Akaganeite					+
	Cryptomelane					+
	Cuprite			+		
	Gibbsite			+		+
	Goethite			+		+
	Lepidocrocite					+
	Todorokite		+			
Halogénures	Fluorite	+				
Carbonates	Alumohydrocalcite			+		
	Azurite			+		
	Brianyoungite					+
	Calcite	+		+		
	Cérusite	+				+
	Dolomite	+				
	Malachite	+		+		+
	Sidérite	+				+
	Smithsonite					+
Sulfates	Anglésite					+
	Brochantite					+
	Gypse					+
	Halotrichite		+			
	Jarosite		+			+
	Natrojarosite		+			
	Autunite					+
	Méta-autunite					
	Beraunite					+
	Cacoxenite					+
	Corkite/Hinsdalite					+
	Crandallite					+
	Delvauxite		+		+	+
	Destinézite **(T.L.).**		+			

Classe	Espèce minérale (*)	Calcaire (encaissant)	Shale/grès namurien	Argilites (**)	Poches à delvauxite	Brèche de dissolution
	Drugmanite **(T.L.).**					+
	Evansite					+
	Ferristrunzite				+	
	Fluellite					+
Phosphates	Fluorapatite				+	+
	Hopéite					+
	Koninckite **(T.L.)**			+		+
	Minyulite					+
	Mitryaevaite					+
	Phosphosiderite		+		+	+
	Pyromorphite					+
	Richellite **(T.L.)**			+	+	+
	Scholzite					+
	Strengite				+	+
	Torbernite					+
	Méta-torbernite					
	Viséite **(T.L.)**				+	
	Vivianite					+
	Wavellite					+
Molybdates	Wulfenite					+
	Allophane			+		
	Halloysite			+		
Silicates	Illite					+
	Nontronite					+
	Quartz et calcédoine	+			+	+
Organiques	Anthraxolite	+				

qui ne sont toutefois pas des espèces minérales reconnues. Pour être complet pour la commune de Visé, il faudrait sans doute également ajouter quelques autres espèces comme notamment l'aragonite de Cheratte.

Parmi toutes ces espèces, la classe des phosphates est fort bien représentée puisqu'on ne dénombre pas moins de 28 minéraux appartenant à cette classe. L'origine du phosphore qui a produit les nombreuses espèces de phosphates secondaires se trouve dans les couches du namurien (premières couches du houiller) qui sont connues pour renfermer des niveaux riches en rognons phosphatés. D'autres localités belges riches en minéraux phosphatés se trouvent dans un contexte géologique comparable. Citons notamment Blaton (province de Hainaut), Haut-Le-Wastia et Beez (province de Namur).

Le tableau 4 reprend toutes les espèces recensées dans la commune de Visé qui ont été classées selon leur type d'occurrence : encaissant calcaire, argilites, shales et grès namurien et brèche de dissolution. Ces dernières renferment le plus grand nombre d'espèces parmi lesquelles se trouvent des minéraux néoformés mais également des espèces primaires des calcaires qui ont été silicifiés.

De nouvelles observations ont également été réalisées sur la richellite et la delvauxite, deux espèces minérales amorphes semblant montrer des débuts d'organisation cristalline se traduisant par l'apparition de domaines cristallins pouvant dans certains cas évoluer jusqu'à l'apparition de cristaux microscopiques. Ces minéraux néoformés peuvent être des phosphates de fer, comme la koninckite qui est fréquemment associée à la richellite, ou la phosphosidérite et la strengite

qui semblent former des domaines encore mal organisés dans la delvauxite. On observe aussi des phosphates de calcium et d'aluminium néoformés, avec la crandalllite mais peut-être aussi la viséite, un minéral mal cristallisé et encore mal défini. La crandallite semble former des domaines mal organisés dans la richellite.

Il est vraisemblable que ces phases ont pu évoluer au cours de remobilisations et précipitations successives. La delvauxite par exemple se présente initialement en rognons dans les couches du namurien. On l'observe également en couches au contact des calcaires comme à Argenteau mais aussi à Beez et puis sous l'aspect d'enduits craquelés parfois en pseudomorphoses de gypse dans les brèches de Richelle et de Visé. Ces différentes remobilisations sont propices à l'apparition de phases cristallines mieux (ou parfois bien) organisées.

Remerciements

Nous souhaitons remercier Pascal Chollet (03-Les Emerins, France) pour les magnifiques photos qui illustrent cet article ainsi que l'équipe du Ferrantia pour l'aide apportée pour la mise en page.

Nous remercions Philippe Compère (ULg) qui nous a accompagnés lors des longues séances de microscopie électronique. Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidées de près ou de loin pour cerner la minéralogie et l'historique de la région de Visé. Nous pensons particulièrement à Yves Jockin mais aussi à Philippe Mathieu et René Pironet. M.Bl souhaite également remercier son ami Eddy Van der Meersche ainsi qu'Herman Goethals qui ont étudié quelques échantillons de koninckite en microscopie électronique et qui ont ainsi ouvert la voie aux recherches que nous avons menées. Nous remercions également Sébastien Rahir pour nous avoir montré la radioactivité de la brèche d'Argenteau ainsi que la détection par fluorescence de la méta-autunite in situ. Enfin, nous souhaitons remercier le personnel du garage «Visé-Pneus» pour le très bon accueil et les autorisations de visites de l'ancienne carrière qui se trouve à l'arrière du garage.

Bibliographie

Ankinovich E., Bekenova G.-K., Shabanova T.-A., Zazubina I. & Sandomirskaya S.-M. 1997 – Mitryaevaite, $Al_{10}[(PO_4)_{8,7}(SO_3OH)_{1,3}]_{\Sigma 10}AlF_3.30H_2O$, a new mineral species from a Cambrian carbonaceous chert formation, Karatau Range and Zhabagly Mountains, southern Kazakhstan. Canadian Mineralogist 35: 1415-1419.

Antenucci D. & Bourguignon P. 1986. – Données nouvelles sur l'Anthraxolite de Visé. Annales de la Société géologique de Belgique 109 : 629-634.

Barchy L. & Marion J.-M. 2000. - Carte géologique de Wallonie 1:25000, planchette 42/3-4 Dalhem-Herve.

Blondieau M., Hatert F. & Defoy M. 2012. - Minéralogie de la carrière de Beez, Province de Namur, Belgique. Le Règne Minéral 104 : 5-26.

Blondieau M., Puccio S., Compère P. & Hatert F. 2016. - Minéralogie de l'ancienne mine plomb-zinc de Rabotrath (Lontzen, Belgique). Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège 85 : 30 -55.

Bruyère D. 2004. – Néogenèses silico-alumineuses en contexte cryptokarstique : l'halloysite de Beez (Namur, Belgique), et de Aïn Khamouda (Kasserine, Tunisie). Thèse de doctorat, Université Paris XI Orsay, 231 p. (http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/04/69/34/PDF/tel-00006417.pdf)

Buttgenbach H. 1897. – Gypse dans la richellite. Annales de la Société géologique de Belgique 24 : 78-79.

Buttgenbach H. 1898. – La chalcopyrite de Visé. Annales de la Société géologique de Belgique 24 : 104-105.

Buttgenbach H. 1947. – Les minéraux de Belgique et du Congo belge. Dunod, Paris : 573 p.

Cesàro G. & Despret G. 1883. - La Richellite, nouvelle espèce minérale des environs de Visé. Annales de la Société géologique de Belgique 10 : 36-44.

Cesàro G. 1884. - Mémoire traitant de la koninckite, nouveau minéral ferrique hydraté. Annales de la Société géologique de Belgique 11 : 247-257.

Cesàro G. 1897. – Description des minéraux phosphatés, carbonatés et sulfatés du sol belge. Mémoires de l'Académie royale de Belgique, in 4°, 53 :136 p.

Di Renzo F. & Gabelica Z. 1995. – New data on the structure and composition of the silicoaluminophosphate Viséïte and a discreditation of its status as zeolite. In Natural Zeolites '93: Occurrence, properties, use. International Committee on Natural Zeolites, Brockport, New York : 173 p.

Dumont A. 1832. – Mémoire sur la constitution géologique de la province de Liège. Hayez, Bruxelles, 374 pages.

Dumont A. 1838. - Notice sur une nouvelle espèce de phosphate ferrique. Bulletin de l'Académie Royale de Belgique 5 : 296.

Forir H. 1880. – Sur quelques minéraux et fossiles trouvés dans une excursion à Argenteau. Annales de la Société géologique de Belgique 7 : 115-118.

Forir H. 1881. - Note sur la diadochite (destinézite) et la delvauxite. Annales de la Société géologique de Belgique 8 : 151.

Fransolet A.-M., Jedwab J. & Van Tassel R. 1974a. - Inventaire minéralogique de Richelle, Belgique. Annales de la Société géologique de Belgique 97 : 23-26.

Fransolet A.-M., Jedwab J. & Van Tassel R. 1974b. - La fluellite de Richelle, près de Visé. Annales de la Société géologique de Belgique 97 : 27-38.

Fransolet A.-M., Jedwab J. & Van Tassel R. 1974c. - La scholzite de Richelle, minéral nouveau pour la Belgique. Annales de la Société géologique de Belgique 97 : 321-330.

Fransolet A.-M., Jedwab J. & Van Tassel R. 1974d. - La minyulite de Richelle, près de Visé. Annales de la Société géologique de Belgique 97 : 331-340.

Fransolet A.-M. & Mélon J. 1975. – Données nouvelles sur des minéraux de Belgique. Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège 44 : 157.

Fransolet A.-M., Jedwab J. & Van Tassel R. 1977. – Minéraux secondaires plombifères (cérusite, anglésite, pyromorphite, corkite et wulfénite) de Richelle. Annales de la Société géologique de Belgique 100 : 1-7.

Hatert F., Deliens M., Fransolet A.-M. & Van Der Meersche E. 2002. - Les minéraux de Belgique, 2ième édition. Museum des Sciences naturelles, Bruxelles, 304 pages.

Jedwab J. 1958. – Présence de torbernite à Richelle. Bulletin de la Société belge de Géologie 67 : 300-303.

Herbosch A., De Witte S.-M. & Préat A. 1979. – Recherche sur les indices de minéralisations uranifères dans la région de Visé. Professional Paper, Ministère des affaires économique 162.

Legrand R. 1957. – Brèches radioactives aux environs de Visé. Bulletin de la Société Belge de Géologie 56 : 211-217.

Legrand R. 1958. – Compte rendu de l'exécution du 26/06/1958 dans la région de Visé. Bulletin de la Société Belge de Géologie 57 : 290-295.

Lespineux G. 1903. – Quelques minéraux intéressants de Visé et leur mode de gisement. Annales de la Société géologique de Belgique 30 : B85-92.

Livingstone A. & Champness P. E. 1993 – Brianyoungite, a new mineral related to hydrozincite, from the north of England orefield. Mineralogical magazine 57 : 665-670.

Lohest M. 1883. – Compte rendu de la session extraordinaire de la société tenue à Liège les 26, 27, 28 août 1883. Annales de la Société géologique de Belgique 10 : 159-191.

Lohest M. 1884. - De la structure hélicoïdale de certaines anthracites de Visé. Annales de la Société géologique de Belgique 12 : 242-256.

Mc Connell D. 1952. - A zéolite with the analcime structure and containing SiO_4, PO_4 and H_2O_4 groups. American Mineralogist 37 : 609.

Mélon J. 1942. - La viséite, nouvelle espèce. Annales de la Société géologique de Belgique 66 : 53-56.

Mélon J., Bourguignon P. & Fransolet A.-M. 1976. – Les minéraux de Belgique. Editions G. Lelotte, Dison (Belgique) : 283 pages.

Ostwald J. 1986. – Some observations on the chemical composition of todorokite. Mineralogical Magazine 50: 336-340.

Pirlet H. 1966. – Nouvelle interprétation des carrières de Richelle – Le Viséen de Visé.

Annales de la Société géologique de Belgique 90(4) : B299-328.

Plášil J., Majzlan J, Wierzbicka-Wieczorek M. & Kiefer B. 2015. – Crystal structure, thermal behaviour and parageneses of koninckite, $FePO_4.2.75H_2O$. Mineralogical Magazine 79: 1159-1173.

Polrot F. 2002. – Inventaire des traces liées à d'anciennes industries extractives sur les carbonates du paléozoïque de l'Est de la Belgique. Geological Survey of Belgium, Professional Paper 296_: 339 p.

Stainier X. 1908. – Un gisement de delvauxine et de manganèse à Couthuin. Annales de la Société géologique de Belgique 36 : M3-M11.

Tonnellier M. 1807. – Sur le gisement de l'anthracite nouvellement découvert par M. Omalius de Halloy J.-J. dans le département de l'Ourthe. Journal des mines 125 : 405-408.

Van der Meersche E. 1989. – Quartz, Visé. Mineralcolor 1989 : 9-10.

Van Tassel R. 1956. – Notes sur la jarosite et la destinezite d'Argenteau. Association pour l'étude Paléontologique et Stratigraphique houillères 25 : 95-98.

Van Tassel R. 1959a. – Autunite, apatite, delvauxite, evansite et fluellite de la région de Visé. Bulletin de la Société belge de Géologie 68 : 226-250.

Van Tassel R. 1959b. – Strengite, phosphosiderite, cacoxenite et apatite fibroradiée de Richelle. Bulletin de la Société belge de Géologie 68 : 360-371.

Van Tassel R. 1968. – Données cristallographiques sur la koninckite. Bulletin de la Société française de minéralogie et cristallographie 91 : 487-489.

Van Tassel R., Fransolet A.-M. & Abraham K. 1979. – Drugmanite, a new mineral from Richelle, Belgium. Mineralogical Magazine 43 : 463.

INSTRUCTIONS TO AUTHORS

Please check our internet site http://www.mnhn.lu for the latest version of these instructions!

Scope

FERRANTIA is a series of monographic works (20-250 pages in final layout) dealing with life and earth sciences, preferably related in some way or other to the Grand-Duchy of Luxembourg.

It publishes original results of botanical, zoological, ecological, geological, mineralogical, paleontological, geophysical and astrophysical research and related fields.

A complete issue of FERRANTIA may be devoted to several papers on a single topic as the responsibility of an invited editor.

Copyright

By submitting their manuscript, authors accept that it will be published under the Creative Commons licence CC BY-NC-ND 3.0 LU (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/lu/). After being published, all volumes are freely available as pdf at the site https://www.mnhn.lu/ferrantia/.

The submission of a manuscript to FERRANTIA implies that the paper must not have been accepted for publication or be under consideration elsewhere.

Reviewing

Articles submitted for publication are reviewed by the editorial board and by one or two referees. The final decision on acceptance or rejection of the manuscript is taken by the editorial board. Manuscripts not prepared according to the following instructions to authors will be returned for correction prior to review.

Nomenclature

Papers with a systematic content should strictly follow the International Codes of Nomenclature.

Specimens

We recommend that the authors should deposit at least a part of the type material in the MNHN collections.

Publication dates

FERRANTIA pays special attention to publication dates, which are always specified to the day of publication.

Manuscripts

Manuscripts, without limitation of the number of pages, must conform strictly to the instructions to authors, and should be sent to the Editor:

Redaction FERRANTIA
25, rue Munster
L-2160 Luxembourg

Format

The main text is submitted as unformatted text document in A4 format with a font size of 10-12 pts, preferably double-spaced, with margins of at least 3 cm and all pages numbered. Tables and figures (300 dpi in the page size of the journal) are submitted as separate files (see Tables and figures). The captions and legends can be included at the end of the main text.

Structure

Papers are to be written in simple, correct and concise French, German or English. They should be organized as follows:

- a brief title (should not include the name of new taxa);
- a suggested running head (no more than 50 characters);
- name(s) and first name(s) of author(s), followed by their full address(es) and, if possible, e-mail or fax number;
- abstracts in English, French and German, each 200-800 words long; new taxa names should be included in the abstract; the abstract should be precise and descriptive, in order to be reproduced as such in data bases; avoid vague sentences such as "three new species are described" or "species are compared to species already known"; include precise differential characters;
- text of the article, in the following order: Introduction, Abbreviations used, Material and methods, Results and/or Observations, Discussion, Acknowledgements, References. The arrangement of the parts "Results/ Observations" and "Discussion" may be modulated according to the length and subject of the article; very long papers may include a table of contents;
- for systematic descriptions, each description should follow the order: name of taxon with author and date, synonymy, type material, etymology, material examined, distribution, diagnosis and/or description, remarks.
- description of geological features should include type level, type horizon, type locality. This order may be adapted according to the concerned groups: consult a recent issue of FERRANTIA;

- taxon names must be stated with author (and publication date, separated by a comma, where appropriate) at least once at the first mention. At subsequent mentions of the same taxon, or other taxa of the same genus, the genus name may be abbreviated (*Rosa canina* L. to *R. canina*).
- use n. sp., n. gen., n. fam., etc. for new taxa;
- use italicized words only for taxa of generic and subgeneric ranks;
- use lowercase characters for authority names
- references to illustrations and tables should be indicated as follows: (Fig. 1), (Fig. a, d), (Fig. 2a-d), (Figs 3; 6), (Figs 3-5; Tab. 2); (Tab. 1); for German texts use Abb. instead of Fig.
- footnotes should not be used.

Tables and figures

Copies of all figures and tables should be included with the manuscript. They can be either included in the text at the correct locations with their legends or referenced in the text and included as annexes.

For printing all figures must be provided as separate image files in a convenient format and resolution (TIF or JPEG for photographs, GIF, PNG or TIF for graphs and figures).

The editorial board will pay special attention to the quality and relevance of illustrations. Colored illustrations are accepted where appropriate and necessary.

Line drawings must be in Indian ink or high quality laser printouts; high contrast Fotographs are required,

Illustrations can be grouped into composite plates the elements of which are identified by letters (a, b, c...). Plates are not placed at the end of the article: they will be considered as figures and numbered as such. Arrange figures to fit in one (70 x 200 mm) or two columns (144 x 200 mm) or one half page (144 x 100 mm). Letters, numbers, etc., for each figure, are to be indicated on an accompanying overlay, not on the original figure. They will be inserted by the printer. A scale bar is required for each figure, when appropriate. No diagram or table is to exceed one page; longer tables should be divided.

References

In main text, references to authors, in lower case, should be presented without comma before year, as follows: Smith (2001), Smith (2001, 2002), (Smith 2001), Smith et al. (2003), (Smith 2001; Jones 2002), (Smith & Jones 2003, 2005), (Smith, Jones & Johnson 2003), (Smith et al. 2003), Smith (2001: 1; 2003: 5), Smith (2001: fig. 2).

References should be presented as follows, in alphabetical order. Do not abbreviate journal names:

Høeg J. T. & Lützen J. 1985. - Comparative morphology and phylogeny of the family Thompsoniidae (Cirripedia: Rhizocephala: Akentrogonida) with description of three new genera and seven new species. Zoologica Scripta 22: 363-386.

Marshall C. R. 1987. - Lungfish: phylogeny and parsimony, in Bernis W. E., Burggren W. W. & Kemp N. E. (eds), The Biology and Evolution of Lungfishes, Journal of Morphology 1: 151-152.

Röckel D., Korn W. & Kohn A. J. 1995. - Manual of the Living Conidae. Volume 1: Indo-Pacific Region. Christa Hemmen, Wiesbaden, 517 p.

Schwaner T. D. 1985. - Population structure of black tiger snakes, *Notechis ater niger*, on off-shore islands of South Australia: 35-46, in Grigg G., Shine R. & Ehmann H. (eds), Biology of Australasian Frogs and Reptiles. Surrey Beatty and Sons, Sydney.

Gerecke R., Stoch F., Meisch C. & Schrankel I. 2005. - Die Fauna der Quellen und des hyporheischen Interstitials in Luxemburg unter besonderer Berücksichtigung der Milben (Acari), Muschelkrebse (Ostracoda) und Ruderfusskrebse (Copepoda). Ferrantia 41, Musée national d'histoire naturelle, Luxembourg, 140 p.

Proofs and reprints

Proofs will be sent to the author (or the first author) for correction and must be returned within two weeks by priority air mail. Authors will receive twenty-five reprints free of charge; further reprints can be ordered at a charge indicated on a form supplied with the proofs.

Page layout of final publication

paper size	170 x 240 mm
page size	144 x 200 mm
nomber of columns	2
column width	70 mm
space between columns	4 mm
top margin	22 mm
bottom margin	18 mm
inside margin	15 mm
outside margin	11 mm

Fonts

Body text: Palatino linotype (serif), 9pt

Titles, legends, headers, footers: Trebuchet (sans-serif)

Les volumes de la série FERRANTIA paraissent à intervalles non réguliers. Ils peuvent être consultés en ligne à l'adresse suivante:

http://www.mnhn.lu/ferrantia/

Adresse de courriel pour les commandes:

diffusion@mnhn.lu

LISTE DES NUMÉROS PARUS À CETTE DATE

Travaux scientifiques du Musée national d'histoire naturelle (1981-1999)

I Atlas provisoire des Insectes du Grand-Duché de Luxembourg. Lepidoptera. 1ère partie (Rhopalocera, Hesperiidae). Marc Meyer et Alphonse Pelles, 1981.

II Nouvelles études paléontologiques et biostratigraphiques sur les Ammonites du Grand-Duché de Luxembourg, de la Province du Luxembourg et de la région Lorraine attenante. Pierre L. Maubeuge, 1984.

III Revision of the recent Western Europe species of genus *Potamocypris* (Crustacea, Ostracoda). Part 1: Species with short swimming setae on the second antennae. Claude Meisch, 1984.

IV-1 Hétéroptères du Grand-Duché de Luxembourg: *Psallus (Hylopsallus) pseudoplatani* n. sp. (Miridae, Phylinae) et espèces apparentées. Léopold Reichling, 1984.

IV-2 Hétéroptères du Grand-Duché de Luxembourg: Quelques espèces peu connues, rares ou inattendues. Léopold Reichling, 1985.

V La bryoflore du Grand-Duché de Luxembourg: taxons nouveaux, rares ou méconnus. Ph. De Zuttere, J. Werner et R. Schumacker, 1985.

VI Revision of the recent Western Europe species of genus *Potamocypris* (Crustacea, Ostracoda). Part 2: Species with long swimming setae on the second antennae. Claude Meisch, 1985.

VII Les Bryozoaires du Grand-Duché de Luxembourg et des régions limitrophes. Gaby Geimer et Jos. Massard, 1986.

VIII Répartition et écologie des macrolichens épiphytiques dans le Grand-Duché de Luxembourg. Elisabeth Wagner-Schaber, 1987.

IX La limite nord-orientale de l'aire de *Conopodium majus* (Gouan) Loret en Europe occidentale. Régine Fabri, 1987.

X Epifaune et endofaune de *Liogryphaea arcuata* (Lamarck). Contribution à l'écologie des populations de *Liogryphaea arcuata* (Lamarck) dans le Sinémurien au NE du Bassin de Paris. Armand Hary, 1987.

XI Liste rouge des Bryophytes du Grand-Duché de Luxembourg. Jean Werner, 1987.

XII Relic stratified scress occurences in the Oesling (Grand-Duchy of Luxembourg), approximate age and some fabric properties. Peter A. Riezebos, 1987.

XIII Die Gastropodenfauna der "angulata-Zone" des Steinbruchs "Reckingerwald" bei Brouch. Hellmut Meier et Kurt Meiers, 1988.

XIV Les lichens épiphytiques et leurs champignons lichénicoles (macrolichens exceptés) du Luxembourg. Paul Diederich, 1989.

XV Liste annotée des Ostracodes actuels non-marins trouvés en France (Crustacea, Ostracoda). Claude Meisch, Karel Wouters et Koen Martens, 1989.

XVI Atlas des lichens épiphytiques et de leurs champignons lichénicoles (macrolichens exceptés) du Luxembourg. Paul Diederich, 1990.

XVII Beitrag zur Faunistik und Ökologie der Schmetterlinge im ehemaligen Erzabbaugebiet "Haardt" bei Düdelingen. Jos. Cungs, 1991.

XVIII Moosflora und -Vegetation der Mesobrometen über Steinmergelkeuper im Luxemburger und im Bitburger Gutland. Jean Werner, 1992.

19 Ostracoda. Nico W. Broodbakker, Koen Martens, Claude Meisch, Trajan K. Petkovski and Karel Wouters, 1993.

20 Les haies au Grand-Duché de Luxembourg. Konjev Desender, Didier Drugmand, Marc Moes, Claudio Walzberg, 1993.

21 Ecology and Vegetation of Mt Trikora, New Guinea (Irian Jaya / Indonesia). Jean-Marie Mangen, 1993.

22 A checklist of the recent non-marine ostracods (Crustacea, Ostracoda) from the inland waters of South America and adjacent islands. Koen Martens & Francis Behen, 1993.

23 Ostracoda. Claude Meisch, Roland Fuhrmann, Karel Wouters, Gabriele Beyer and Trajan Petrovski, 1996.

24 Die Moosflora des Luxemburger Oeslings. Jean Werner, 1996.

25 Atlas des ptéridophytes des régions lorraines et vosgiennes, avec les territoires adjacents, Georges Henri Parent, 1997.

26 Evaluation de la qualité des cours d'eau au Luxembourg en tant qu'habitat pour la loutre. Groupe Loutre Luxembourg, 1997.

27 Notes Paléontologiques et Biostratigraphiques sur le Grand Duché de Luxembourg et les régions voisines. Pierre Louis Maubeuge & Dominique Delsate, 1997.

28 Die Moosflora der Kleinen Luxemburger Schweiz (Müllertal). Florian Hans, 1998.

29 Etude sur les genres *Globorilusopsis* Maubeuge, 1994 et *Simoniceras* n. gen. du Lias Supérieur du Grand-Duché de Luxembourg (Calyptoptomatida). Pierre Louis Maubeuge, 1998.

30 L'Ichthyofaune du Toarcien luxembourgeois. Cadre général et catalogue statistique. Dominique Delsate, 1999.

31 Proceedings of the 3rd European Batdetector Workshop. 16-20 August 1996 Larochette (Lux.). Christine Harbusch & Jacques Pir (eds.), 1999.

32 Les collections paléontologiques du Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg. Fossiles du Trias et du Jurassique. Dominique Delsate, Chris Duffin & Robi Weis, 1999.

FERRANTIA (2002-)

33 Die Fledermäuse Luxemburgs (Mammalia: Chiroptera). Christine Harbusch, Edmée Engel, Jacques Pir, 2002.

34 The Protura of Luxembourg. Andrzej Szeptycki, Norbert Stomp, Wanda M. Weiner, 2003.

35 Liste rouge des bryophytes du Luxembourg. Jean Werner, 2003.

36 Paléontologie au Luxembourg. Simone Guérin-Franiatte (éd.), 2003.

37 Verbreitungsatlas der Amphibien des Großherzogtums Luxemburg. Roland Proess (éd.), 2003.

38 Trois études sur la Zone Rouge de Verdun. I. Herpétofaune. II. La diversité floristique. III. Les sites d'intérêt botanique et zoologique. Georges H. Parent, 2004.

39 Verbreitungsatlas der Heuschrecken des Großherzogtums Luxemburg. Roland Proess, 2004.

40 Les macrolichens de Belgique, du Luxembourg et du nord de la France - Clés de détermination. E. Sérusiaux, P. Diederich & J. Lambinon, 2004.

41 Die Fauna der Quellen und des hyporheischen Interstitials in Luxemburg unter besonderer Berücksichtigung der Milben (Acari), Muschelkrebse (Ostracoda) und Ruderfusskrebse (Copepoda). Reinhard Gerecke, Fabio Stoch, Claude Meisch, Isabel Schrankel, 2005.

42 Red List of the Vascular Plants of Luxembourg. Guy Colling, 2005.

43 Contribution à la climatologie du Luxembourg. Analyses historiques, scénarios futurs. Christian Ries (éd.), 2005.

44 Sandstone Landscapes in Europe - Past, Present and Future. Proceedings of the 2nd International Conference on Sandstone Landscapes. Vianden (Luxembourg) 25-28.05.2005. Christian Ries & Yves Krippel (eds.), 2005.

45 Additions et corrections au catalogue des plantes vasculaires de l'arrondissement de Montmédy. Etude sur l'évolution séculaire de la flore. Georges H. Parent, 2006.

46 Beiträge zur Paläontologie des Unterdevons Luxemburgs (1). Christian Franke (Hrsg.), 2006.

47 Verbreitungsatlas der Libellen des Großherzogtums Luxemburg. Roland Proess, 2006.

48 Les Hêtres tortillards, *Fagus sylvatica* L. var. *tortuosa* Pépin, de Lorraine, dans leur contexte européen. Georges H. Parent, 2006.

49 Inventaire minéralogique du Luxembourg - Stolzembourg, Schimpach, Goesdorf. Simon Philippo (éd.), 2007.

50 Inventaire de la biodiversité dans la forêt "Schnellert" (Commune de Berdorf) - Erfassung der Biodiversität im Waldgebiet "Schnellert" (Gemeinde Berdorf). Marc Meyer & Evelyne Carrières (éds.), 2007.

51 Proceedings of the first international Recorder conference. Luxembourg 2-3 December 2005. Tania Walisch (ed.), 2007.

52 Verbreitungsatlas der Reptilien des Großherzogtums Luxemburg. Roland Proess (éd.), 2007.

53 Les arbres introduits au Luxembourg. Inventaire des essences arborescentes non indigènes de pleineterre présentes sur le territoire du Grand-Duché de Luxembourg. Antoinette Welter, Jean Turk, Joé Trossen, 2008.

54 Fossils as Drugs: pharmaceutical palaeontology. Christopher J. Duffin, 2008.

55 Proceedings of the first conference on faunistics and zoogeography of European Trichoptera. Luxembourg 2nd - 4th September 2005. Marc Meyer & Peter Neu (eds.), 2008.

56 Colonial nesting in the Great Crested Grebe *Podiceps cristatus* (Linné 1758). Research results from a colony on the Dutch IJsselmeer in comparison to other studies on colonial nesting in the species. André Konter, 2008.

57 Die Waldgesellschaften Luxemburgs. Vegetation, Standort, Vorkommen und Gefährdung. Thomas Niemeyer, Christian Ries & Werner Härdtle, 2010.

58 Beiträge zur Paläontologie des Unterdevons Luxemburgs (2). Christian Franke (Hrsg.), 2010.

59 Proceedings of the 3rd international symposium Coleoid Cephalopods Through Time. Luxembourg 8th - 11th October 2008. Dirk Fuchs (editor), 2010.

60 Verbreitungsatlas der Zikaden Luxemburgs - Textband. Rolf Niedringhaus, Robert Biedermann, Herbert Nickel, 2010.

61 Verbreitungsatlas der Zikaden Luxemburgs - Atlasband. Rolf Niedringhaus, Robert Biedermann, Herbert Nickel, 2010.

62 Le Jurassique inférieur et moyen au Luxembourg - Nouvelles données paléontologiques et biostratigraphiques. Robert Weis & Simone Guérin-Franiatte (éds.), 2010

63 La Flore calcicole et basophile du Massif vosgien. Georges H. Parent, 2011.

64 Rearing of unionoid mussels (with special emphasis on the Freshwater Pearl Mussel Margaritifera margaritifera). Frank Thielen (editor), 2011.

65 Les bryophytes du Luxembourg - Liste annotée et atlas. The bryophytes of Luxembourg - Annotated list and atlas. Jean Werner, 2011.

66 Die Graslandgesellschaften Luxemburgs. Simone Schneider, 2011.

67 Comparative studies of behaviour in allopatric subspecies of Grebes, Podicipedidae. Black-necked Grebe *Podiceps nigricollis* (Brehm 1831) and White-tufted Grebe *Rollandia rolland* (Quoy & Gaimard 1824). André Konter, 2012.

68 Beiträge zur Paläontologie des Unterdevons Luxemburgs (3). Christian Franke (Hrsg.), 2012.

69 Die Höhlenfauna Luxemburgs. Dieter Weber (Hrsg.), 2013.

70 Verbreitungsatlas der Weberknechte des Großherzogtums Luxemburg. Christoph Muster & Marc Meyer, 2014.

71 Le Jurassique au Luxembourg (1) - Vertébrés, échinodermes et céphalopodes du Bajocien. Roby Weis & Ben Thuy (éds.), 2015.

72 Aberrant plumages in grebes Podicipedidae - An analysis of albinism, leucism, brown and other aberrations in all grebe species worldwide. André Konter, 2015.

73 Beiträge zur Paläontologie des Unterdevons Luxemburgs (4). Christian Franke (Hrsg.), 2016.

74 Les sources de la région gréseuse du Luxembourg. Sociologie de la bryoflore et conservation. Jean Werner & Alexandra Arendt, 2016.

75 Verbreitungsatlas der Amphibien des Großherzogtums Luxemburg. Roland Proess (Hrsg.), 2016.

76 Die Rüsselkäferfauna (Coleoptera, Curculionoidea) der Silikatmagerrasen im nördlichen Luxemburg. Carlo Braunert, 2017.

77 Inventaire minéralogique du Luxembourg et de la region: Goesdorf et Beauraing. Simon Philippo (éditeur), 2018.

78 Verbreitungsatlas der Reptilien des Großherzogtums Luxemburgs. Roland Proess (Hrsg.), 2018.

79 Atlas of the Insects of the Grand-Duchy of Luxembourg: Coleoptera, Cerambycidae. Francesco Vitali, 2018.

80 Quelques associations de bryophytes sur rochers de grès acides et bois pourrissant au Luxembourg. Jean Werner, 2018.

81 Minéralogie de la commune de Visé (Argenteau, Richelle et Visé), Province de Liège, Belgique. Simon Philippo (éditeur), 2019.