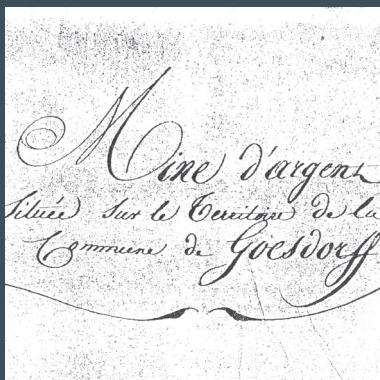




# Inventaire minéralogique du Luxembourg et de la région



Goesdorf et Beauraing

Simon Philippo (éditeur)



77

2018

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 maison, aux TRAVAUX SCIENTIFIQUES DU MUSÉE NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE DE LUXEMBOURG parus entre 1981 et 1999.

*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](mailto:ferrantia@mnhn.lu)

*Échange:*

Exchange MNHN  
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.mnhn.lu/ferrantia/exchange>  
email: [exchange@mnhn.lu](mailto:exchange@mnhn.lu)

*Page de couverture:*

1. Entrée de la galerie d'exhaure de la mine de Goesdorf en 2010.
2. Page de garde du rapport du sous-intendant de Diekirch au gouverneur du Grand-Duché de Luxembourg rédigée en date du 25 février 1819.
3. Cristal de stibine très fortement replié sur lui-même dans une cavité de quartz.  
photo G. Niceus.

*Citation:*

Simon Philippo (éditeur) 2017. - Inventaire minéralogique du Luxembourg et de la région: Goesdorf et Beauraing. Ferrantia 77, Musée national d'histoire naturelle, Luxembourg, 120 p.

*Date de publication:*

2 mars 2018  
(réception du manuscrit: 8 février 2017)

*Impression:*

Imprimerie reca, Ehlerange

---

# Ferrantia

*77*

## Inventaire minéralogique du Luxembourg et de la région: Goesdorf et Beauraing

Simon Filippo (éditeur)

Luxembourg, 2018

---

---

---

## Table des matières

Simon Philipppo, Frédéric Hatert

### La minéralisation en antimoine de Goesdorf (2)

7-58

<b>Introduction</b>	<b>8</b>
<b>Nouvel échantillonnage, nouvelles analyses</b>	<b>9</b>
La galerie d'exhaure	9
Le puits II	9
<b>Méthodologie</b>	<b>12</b>
Microscopie électronique à balayage et analyses EDS	12
Microscopie optique en lumière réfléchie et la microsonde électronique	12
Diffraction des rayons X	13
<b>Descriptions minéralogiques</b>	<b>13</b>
Sulfures	14
Pyrite	14
Marcasite	15
Chalcopyrite	15
Ullmannite	16
Galène	16
Sphalérite	16
Stibine	17
Metastibine	18
Berthiérite	18
Jamesonite	18
Les sulfosels de Pb-Sb	21
Fülöppite	21
Zinkenite	22
Plagionite	22
Robinsonite	23
Géocronite	23
Chalcostibite	24
Kermesite	26
Oxydes	27
Valentinite	27
Sénarmontite	31
Stibiconite	31
Brandholzite	31
Cualstibite	31
Tripuhyite	31
Schafarzikite	36
Bindheimite	36
Cetineite	37
Rutile	37
Quartz	37
Goethite	38
Hématite	38
Todorokite	38
Sulfates	38
Klebelsbergite	38
Coquandite	42

---

Peretaite	42
Anglésite	45
Gypse	45
Eléments	45
Or	45
Antimoine	45
Soufre	45
Phosphates	45
Apatite	45
Pyromorphite	45
Carbonates	47
Calcite	47
Sidérite	47
Dolomite	47
Ankérite	47
Malachite	47
Silicates	47
Zircon	47
Chlorite (clinocllore)	47
Illite	48
Kaolinite	48
Calcédoine	48
Indéterminés	48
<b>Métallogénie</b>	<b>49</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>52</b>
<b>Annexe</b>	<b>54</b>

Steve Bornain	
<b>Prospection électromagnétique sur le site de l'ancienne mine de Goesdorf</b>	<b>59-66</b>
Introduction	61
Localisation du site de prospection	61
Prospection électromagnétique	61
Principe de la méthode	61
Analogie du Circuit RL	61
Résultats	63
Appareillage	63
Implantation	66
Résultats	66
Conclusion	66
Hypothèses et propositions techniques	66
Bibliographie	66

<b>Introduction</b>	<b>68</b>
<b>Localisation</b>	<b>69</b>
<b>Description</b>	<b>71</b>
<b>Historique</b>	<b>73</b>
<b>Géologie</b>	<b>74</b>
La mine dans le cadre géologique régional	74
Données géologiques relatives à la zone de la mine.	76
Le Givétien	76
Les formations du Givétien	78
Formation de Trois-Fontaines (TRF)	78
Formations des Terres d’Haur et du Mont d’Haur (TM)	80
Formation des Terres d’Haur (THR)	80
Formation du Mont d’Haur (MHR)	80
Synthèse géologique	81
<b>Paléontologie</b>	<b>82</b>
Introduction	82
Méthodologie employée pour déterminer les fossiles présentés	83
Fossiles découverts	86
<i>Thamnopora cervicornis</i> (Blainville 1830)	86
<i>Favosites basalticus</i> (Goldfuss 1826)	90
<i>Gyrophyllum</i> sp.	90
<i>Cystiphyllum vesiculosum</i> (Goldfuss 1826)	91
Empreinte de coquille	92
Fragment de tige de crinoïde	92
<i>Spirifer mediotextus</i> (Verneuil 1842)	93
Mais que s’est-il donc passé au Givétien ?	94
<b>Minéralogie</b>	<b>96</b>
Sphalérite	96
Galène	97
Baryte	98
Fluorite	98
Pyrite et Marcassite	98
Calcite	100
Quartz	100
"Sidérite"	103
Smithsonite	103
Hydrocérusite	103
Malachite	105
Hydrozincite	105
<b>Nature du filon et minéralisation</b>	<b>105</b>
Observations (haldes)	106
Observations (filon secondaire)	108
Paragenèse et confirmation de la nature du filon	108
Conclusion	111
<b>Sources</b>	<b>112</b>
<b>Remerciements</b>	<b>113</b>





# La minéralisation en antimoine de Goesdorf (2)

**Simon Filippo**

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

**Frédéric Hatert**

Université de Liège, Laboratoire de Minéralogie  
Allée du six août, 6 - B18  
B-4000 Liège  
fhatert@ulg.ac.be

## Zusammenfassung

Die erste Schätzung des Vorkommens von Goesdorf ist 2007 in Ferrantia veröffentlicht worden. Diese basierte nur auf den Halden geernteten Proben. Seitdem haben Arbeiten des Fremdenverkehrsamtes den Wissenschaftlern des MnhnL ermöglicht Zugang zum Erz zu haben : drei Adern einigen Zentimeter dick sind studiert worden. Diese Studie hat uns ermöglicht die

mineralogische und metallogische (?) Kenntnisse des Vorkommens zu erweitern. Wir haben neuen Sulfide von Pb-Sb (Fülöppit, Plagionit, Robinsonit, Geokronit) und die trägerische Phase des Nickels identifiziert (Ullmannit), sowie zahlreiche sekundäre Phasen des Antimons (Brandholzit, Coquandit, Klebelsbergit und Peretait).

## Abstract

The first evaluation of the Goesdorf deposit was published in 2007 into the Ferrantia number 49. This study was based on samples collected on mine dumps. Recently, we investigated three quartz veins located directly in the mine; these analyses allow to better

understand the mineralogy and genesis of this ore deposit. Mineralogical analyses indicate the presence of Pb-Sb-sulfosalts (fülöppite, plagionite, robinsonite, geocronite), ullmannite, as well as secondary Sb minerals (brandholzite, coquandite, klebelsbergite et peretaite).

## Résumé

Une première évaluation du gisement de Goesdorf a été publiée en 2007 dans le Ferrantia 49. Celle-ci se basait uniquement sur des échantillons récoltés sur les anciennes haldes. Depuis lors, des travaux du syndicat d'initiative ont permis aux scientifiques du MnhnL d'avoir accès au minerai en place : trois filons de quelques centimètres d'épaisseur ont été étudiés. Cette

étude nous a permis de pousser plus en avant la connaissance minéralogique et métallogénique du gisement. Nous avons ainsi mis en évidence de nouveaux sulfures de Pb-Sb (fülöppite, plagionite, robinsonite, géocronite), identifié la phase porteuse du nickel (ullmannite), ainsi que de nombreux phases secondaires d'antimoine (brandholzite, coquandite, klebelsbergite et peretaite).

## Introduction

La minéralisation à antimoine de Goesdorf est apparemment plus connue que nous le pensions précédemment. Dans nos recherches bibliographiques dans le cadre de l'étude de sections polies, nous avons en effet trouvé des photos du minerai de Goesdorf, publiées dans les ouvrages du célèbre métallogéniste Paul Ramdohr (1955, 1980). Ces photos seront présentées dans le chapitre consacré à la stibine.

Depuis la publication relative à la minéralisation à antimoine de Goesdorf, dans le Ferrantia 49 de 2007, il nous a été donné de récolter de nouveaux échantillons, notamment par la réouverture du puits II par une équipe du syndicat d'initiative de Goesdorf en octobre 2007. La figure 1 localise ce puits numéroté II. Elle est reprise de la figure 3 du Ferrantia 49 en page 118. Nous reviendrons en détail sur les travaux de ce puits dans le chapitre suivant.

En 2009, deux publications en collaboration avec Monserrat Filella nous ont permis de mettre en contexte la minéralogie de Goesdorf. Les

données recueillies sont relatives à la dispersion de l'antimoine issu de la mine dans l'environnement proche. Ces données vont plus loin que notre approche classique des phases secondaires ou tertiaires d'un gisement. Il s'agit de voir ici comment se comportent les métaux mis en solution et transportés hors de la mine. Ces deux publications ont un très bel impact de lecture avec 44 citations pour l'une et 18 pour l'autre.

En 2010, Bakker et Kolitsch publient un article sur la minéralogie de la mine et notamment sur la présence de brandholzite à Goesdorf qui est la troisième occurrence mondiale. Cette brandholzite, nous l'avions référencée dans la publication de 2007 comme « indéterminé 2 » et décrite dans la publication (Filella *et al.*, 2009b). Cette publication dans la revue de minéralogie allemande 'Lapis' montre l'intérêt international pour la minéralogie de ce site. De cet article nous noterons aussi la mise en évidence de la métastibine par les deux auteurs. Nous y reviendrons dans la description minéralogique.

Depuis lors, une analyse systématique de tous les échantillons jugés comme intéressants lors de l'étude au binoculaire a été réalisée. Chaque échan-

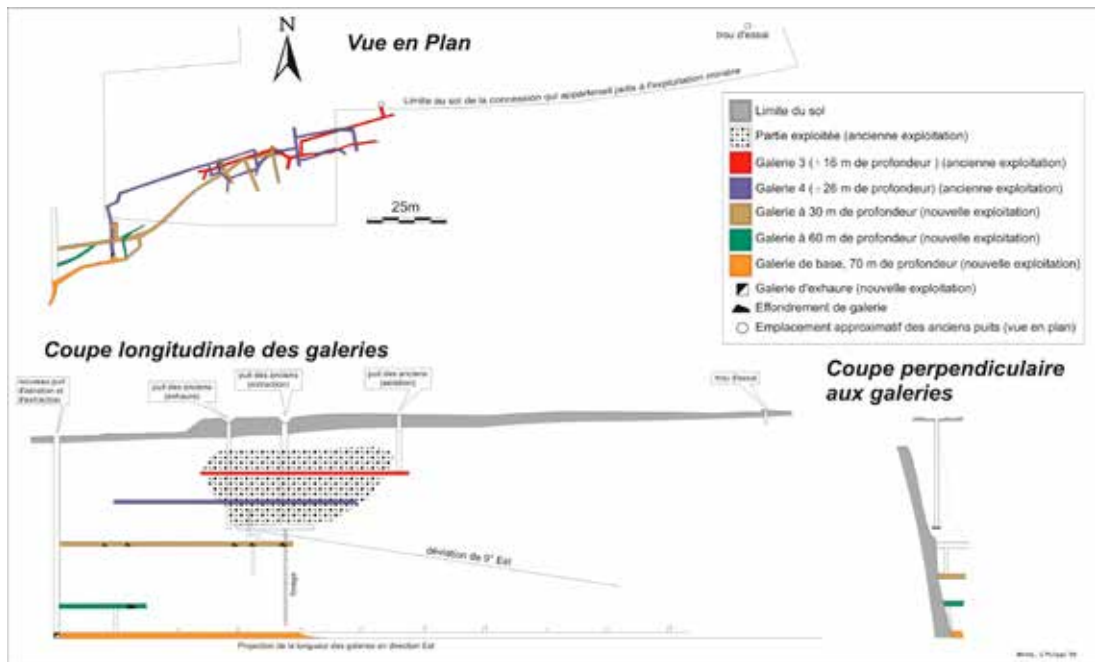


Figure 1: Localisation du puits II sur le site minier de Goesdorf (figure reprise de la page 118 du Ferrantia 49).

tillon a été préparé spécialement pour acquérir les meilleures photos au microscope électronique à balayage, et orienté de manière adéquate pour pouvoir procéder à une analyse chimique qualitative (méthode EDS, « Energy-dispersive X-ray spectrometry »). En cas de doute après cette première analyse, un fragment de ces échantillons a été analysé par diffraction des rayons X sur le diffractomètre à 4 cercles du Laboratoire de Minéralogie de l'université de Liège (soit en monocristaux, soit en poudre). Les échantillons de minerais réagissant à certains tests de microchimie pour mettre en évidence la présence de plomb, ont été préparés en sections polies et étudiés au microscope en lumière réfléchie. Une sélection de ces échantillons a été soumise à l'Université de Bochum pour être étudiés au moyen de la sonde électronique.

Tous ces moyens d'investigation nous ont permis d'obtenir l'inventaire minéralogique que nous allons vous présenter dans ce travail.

Il restait certaines lacunes dans la connaissance de l'extension structurale de la minéralisation à antimoine de Goesdorf. Dès lors, nous avons commandé une nouvelle campagne de prospection géophysique en 2013. Nous vous présenterons dans ce travail les résultats de la prospection électromagnétique réalisée à l'aplomb de la zone minéralisée.

A la vue des lacunes concernant les données P-T-X (pression – température – salinité) qui ont permis la formation des minéralisations luxembourgeoises, nous avons, en collaboration avec l'université de Nancy, réalisé une étude des inclusions fluides des minéraux de la plupart de ces minéralisations. Cette étude globale des paléofluides des minéralisations luxembourgeoises, et notamment Goesdorf, sera bientôt publiée.

Nous ne reviendrons pas sur l'étude historique de 2007. Même si celle-ci nécessite des éclaircissements, personne n'a eu l'occasion de réaliser de nouvelles recherches. Néanmoins nous profitons de l'occasion pour demander au lecteur si par hasard, il aurait connaissance de l'existence d'un document original que nous recherchons. Ce document est relaté par Lucius (1948) mais nous aimerions consulter le document d'origine. Il s'agit de la note rédigée en 1854 par Weyer (livre d'exploitation de la mine de 1847 à 1854 par la société Hartmann & Co.).

## Nouvel échantillonnage, nouvelles analyses

### La galerie d'exhaure

Lors de nos premières visites du site en 1997, on pouvait distinguer, grâce à la présence d'un vallon étroit, l'emplacement de l'ancienne galerie d'exhaure de la mine de Goesdorf.

Dès 2005, des travaux d'aménagement réalisés sous la supervision du syndicat d'initiative nous ont permis l'accès à celle-ci et donc à un échantillonnage systématique en lien avec la cartographie de la galerie. Ce travail de cartographie a été présenté à la figure 13 du Ferrantia 49 en page 128 (Filippo et Hanson, 2007).

En 2010, l'entrée de la galerie a été entièrement sécurisée. La compilation des photos de la galerie prises en 1997, 2005 et 2010 est présentée en figure 2.

### Le puits II

Suite aux travaux de réouverture du puits II par le syndicat d'initiative de Goesdorf, nous avons eu l'occasion de réaliser une première cartographie et une première série de prélèvements le 10 octobre 2007. Après approfondissement du puits, nous sommes repassés compléter notre plan et nos prélèvements le 19 août 2009.

Nous avons pu mettre en évidence, cartographier et prélever 5 filons. Nous les avons numérotés de f1 à f5. Ceux-ci sont repris sur la figure 3 qui compile les données recueillies en 2007 et 2009. Nous avons également pu réaliser des croquis (vue en coupe) des filons f2 et f4.

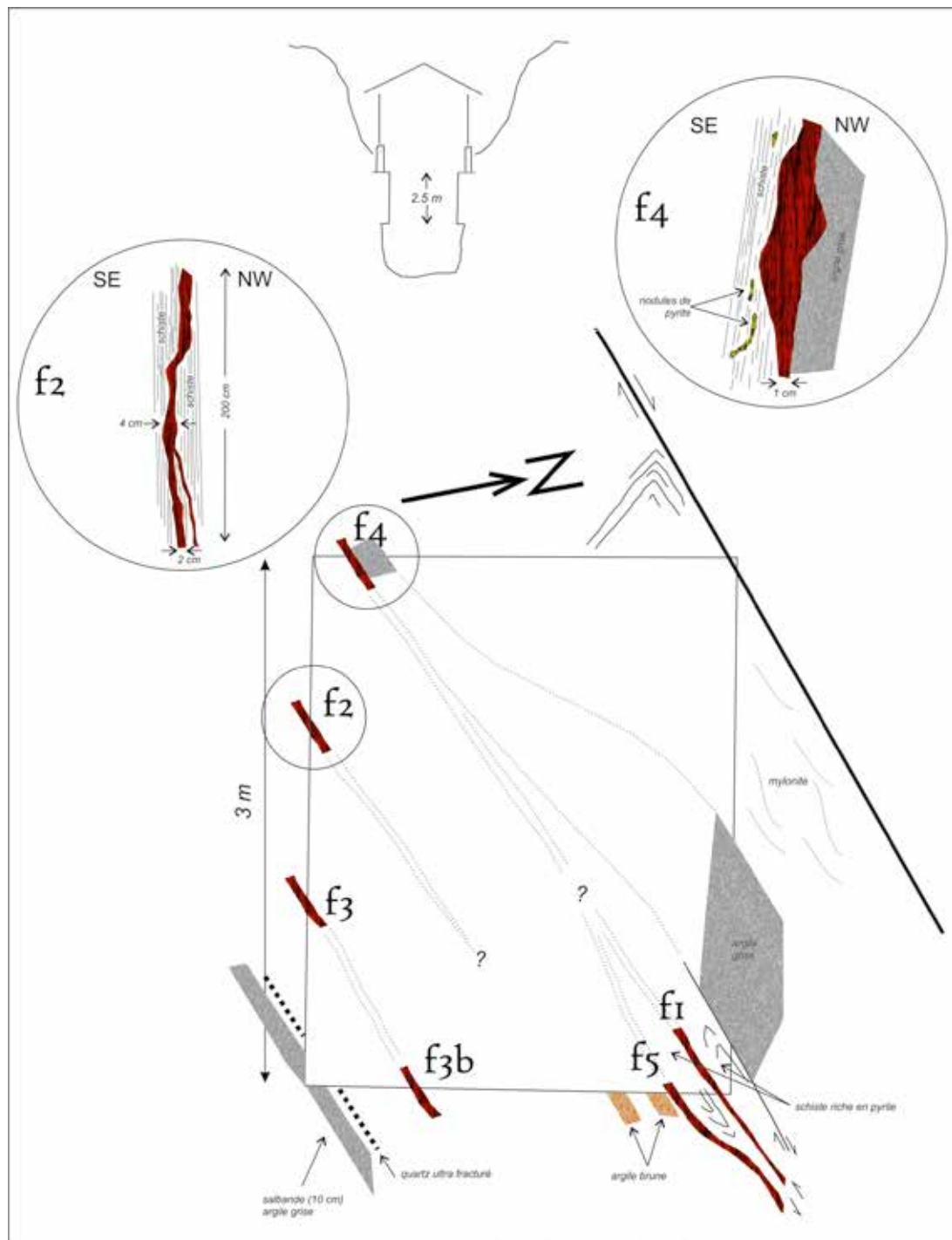
Le puits est rectangulaire (3,0 m x 1,9 m). La zone d'observation se situe entre 3 et 5 m de profondeur. L'un des côtés est bordé par une faille, de direction 70°N, marquée par une zone fortement mylonitisée et limitée par une salbande composée d'argile grise et variant en épaisseur de 10 à 50 cm. L'autre côté est quant à lui limité par une salbande d'argile grise de 10 cm d'épaisseur et un filonnet de quartz stérile ultra fracturé. Le filon f1 se subdivise en deux. Il est parallèle à la zone de faille. Le filon f1a est en contact avec l'éponte de schiste ; il est composé de stibine avec de la pyrite visible aux



Goesdorf



Figure 2 : Photos de l'entrée de la galerie d'exhaure prises en 1997, en 2005 et en 2010.



**Figure 3:** Schéma du puits II avec représentation des différents filons étudiés, failles et salbandes ; ainsi que croquis des filons f2 et f4.

épointes. Le filon f1b est un filonnet de quartz de 3 cm d'épaisseur contenant de la pyrite cristallisée. Le filon f2 de direction N240°E, mesure entre 2 et 4 cm avec une éponte de schiste de chaque côté. Il est composé majoritairement de quartz avec des pointements de stibine. Vers le bas ce filon se sépare en deux. Le croquis de ce filon f2 est repris sur la figure 3. Le filon f3 est un filon de 3 à 5 cm d'épaisseur composé massivement de stibine entre deux épontes de schiste. Sa direction est N235°E. Le filon f4 est un filon de quartz en lentille variant en épaisseur de 1 à 5 cm. Il est assez peu minéralisé en antimoine. L'une des épontes est un schiste fortement pyriteux (présence de nodules de pyrite allant jusqu'à 2 cm de diamètre). L'autre éponte est composée d'argile grise. Le croquis de ce filon f4 est repris sur la figure 3. Le filon f5 est composé d'antimoine massif avec du quartz entre deux épontes de schiste. Son épaisseur est de 2 à 3 cm. Nos observations nous amènent à nous demander si les filons f1 et f5 n'auraient pas tendance à fusionner. A proximité du filon f5, nous avons pu également observer deux salbandes d'argile brune parallèles et faisant chacune quelques centimètres d'épaisseur.

L'étude de la roche encaissante et des joints argileux, autrement appelés salbandes, a été publiée dans la revue *Applied Geochemistry* (Filella et al, 2009a). La description qui y est faite est la suivante :

The main rock in Goesdorf is slate with graded bedding. It is a siltstone with angular, moderately sorted grains composed of quartz, clay and mica. The quartz-sandstone intercalations are mature sandstones, classed as arenite, mainly composed of well sorted and angular quartz grains, with some mica, zircon and feldspar.

The argillaceous joints are between 5 and 10 cm thick. They are mainly formed of kaolinite, clinocllore and illite. The main trace elements present are (all values in wt %): Ti (1.010), Ba (0.040), Zr (0.030), Cr (0.015), Rb (0.015), Sr (0.015), Ni (0.007) and rare earth elements, i.e. La (0.015) and Ce (0.020). The presence of these trace elements can be explained by some minor minerals found in the argillaceous joints such as zircon ( $ZrSiO_4$  containing some rare earth elements), rutile ( $TiO_2$  with some Cr), chromite ( $FeCr_2O_4$ ) and pyrite ( $FeS_2$  with some Ni).

## Méthodologie

### Microscopie électronique à balayage et analyses EDS

Plusieurs appareils ont été utilisés successivement pour l'acquisition des images et des analyses en microscopie électronique :

Le Leica du CRP-LAM (2009 à 2012) au Luxembourg. Les images et les analyses eds acquises entre 2009 et 2012 l'ont été avec le microscope électronique à balayage (MEB) Leica Stereoscan 430i du CRP Lippmann, Luxembourg. Celui-ci était équipé avec des détecteurs SE (Secondary Electrons), BSE (Back Scattered Electrons) et EDS (Energy-dispersive X-ray spectroscopy).

Le Hitachi du CRP-LAM (2013), maintenant LIST (MRT) au Luxembourg. Le MEB Hitachi SU-70 a été utilisé pour acquérir des images en microscopie électronique. Pour les analyses EDS, l'appareillage est couplé au système Oxford Inca X-Max.

Le Jeol 6000 du MnhnL depuis 2015. Les images et les analyses eds acquises en 2015 et 2016 l'ont été avec le microscope électronique à balayage (MEB) Jeol JCM-6000 du MnhnL. Celui-ci est équipé avec des détecteurs SE (Secondary Electrons), BSE (Back Scattered Electrons) et EDS (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) de type dry SD detector.

### Microscopie optique en lumière réfléchie et la microsonde électronique

Les lames minces polies ont été examinées en lumière transmise et réfléchie au moyen du microscope Leica DME POL du MnhnL.

Les minéraux des lames minces polies sélectionnées ont été observées et analysées au moyen de la microsonde Cameca SX50 de la Ruhr Universität de Bochum en Allemagne (annexe). Les mesures ont été faite en utilisant un voltage d'accélération de 20.0 kV et un courant de sonde de 20.0 nA. Nous avons utilisé les cristaux et standards suivants pour quantifier les différents éléments: As sur la raie  $L\alpha$  avec le cristal TAP et un standard d'arsenopyrite; Ni sur la raie  $K\alpha$  avec

le cristal LIF et un standard de NiO; Zn sur la raie  $K\alpha$  avec le LIF et un standard de ZnS; Fe sur la raie  $K\alpha$  avec le LIF et un standard d'arsenopyrite; Co sur la raie  $K\alpha$  avec le LIF et un standard de Co métal; Cu sur la raie  $K\alpha$  avec le LIF et un standard de covellite; Sb sur la raie  $L\alpha$  avec le cristal PET et un standard de  $Sb_2S_3$ ; Pb sur la raie  $M\alpha$  avec le PET et un standard de PbS; et S sur la raie  $K\alpha$  avec le PET et un standard de PbS. Tous les bruits de fond ont été corrigés avec les données suivantes: +800/0 excepté pour Sb (+800/-800) et Pb (+1750/-800).

## Diffraction des rayons X

Les identifications par diffraction des rayons X ont été réalisées à l'aide du diffractomètre à 4 cercles Rigaku Xcalibur du Laboratoire de Minéralogie de l'Université de Liège, équipé d'un détecteur EOS et utilisant la radiation  $MoK\alpha$  ( $\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$ ). De faibles quantités de matière ont été broyées, et ensuite collées sur un capillaire en verre à l'aide de vaseline. Le capillaire a ensuite été fixé sur une tête goniométrique, et montée sur le diffractomètre. La mesure a été effectuée en mode Debye-Scherrer, grâce à un balayage de 40 minutes.

## Descriptions minéralogiques

L'utilisation de ces différentes méthodes analytiques nous a permis d'identifier jusqu'ici 51 espèces minérales pour le gisement, contre 34 en 2007. Nous avons de plus réalisé de nombreuses photos au microscope électronique à balayage et, grâce à la collaboration de Gerhard Niceus, pu obtenir de superbes photos de nos échantillons. Les sulfures ont été essentiellement étudiés en sections polies et analysés à la microsonde électronique (annexe). L'approche pour les phases secondaires a été essentiellement une analyse EDS suivie d'une confirmation par diffraction des rayons X. Entre la publication de 2007 et celle-ci, une partie des données recueillies a été publiée dans la revue *Science of the Total Environment*. Le titre de l'article est le suivant : Natural attenuation processes applying to antimony: A study in the abandoned antimony mine in Goesdorf, Luxembourg. Il est repris sous la référence bibliographique Filella et al. (2009b). Il s'agit d'un travail sur les processus d'atténuation naturelle de la teneur en antimoine dans la nature; l'ancienne

mine de Goesdorf ayant servi de site d'observation. Comme l'utilisation des données minéralogiques dans cet article est différente, nous avons repris ci-dessous un extrait de celui-ci.

### Minerals present in the supergene zone

#### Antimony primary minerals

An initial study by Philippo and Hanson (2007) on the Sb primary minerals present in the Goesdorf mine has been extended here. The composition of the ore body in the Sb mineralization varies from the wall to the centre. The wall is composed of quartz, carbonates (calcite, dolomite and siderite, with siderite as the major element), clinocllore, minor amounts of apatite and an abundance of large fragments of pyrite rich in As (0.2–4%), Cu, Ni and Co (up to 8%). The centre of the mineralization is composed of Sb ore where stibine ( $Sb_2S_3$ ) is the major component (approximately 80%). Various Pb, Fe and Cu sulphosalts (5%), pyrite and sphalerite ( $ZnS$ ) (for the last 15%) are also present. Close to the pyrite, some amounts of chalcopyrite and ullmannite ( $NiSbS$ ) have also been observed. The Fe and Cu sulphosalts found were berthierite ( $FeSb_2S_4$ ) and chalcostibite ( $CuSbS_2$ ). Pb–Sb sulphosalts detected were, in increasing order according to Pb content, jamesonite ( $Pb_4FeSb_6S_{14}$ ), fülöppite ( $Pb_3Sb_8S_{15}$ ), zinkenite ( $Pb_9Sb_{22}S_{42}$ ), plagionite ( $Pb_5Sb_8S_{17}$ ), robinsonite ( $Pb_4Sb_6S_{13}$ ) and geocronite ( $Pb_{14}(Sb,As)_6S_{23}$ ), with a very low As content (ratio Sb:As, 4:1).

#### Antimony secondary minerals

When exposed to flowing water, the Sb primary minerals are oxidized, forming oxides, hydroxides and sulphates. The Sb secondary minerals associated with the Goesdorf Sb ore are listed in Table 2. This table also shows representative pictures of specimens of the different minerals collected in this mine. Observation of a large number of samples has made it possible to estimate the relative proportion of the main secondary minerals present in the supergene environment at roughly the following: valentinite, 70%; senarmonite, 15%; the various sulphates (coquandite, klebelbergite, peretaite), 12%, and the rest, 3%. Other non-containing Sb secondary minerals found are hematite and sulphates such as gypsum ( $CaSO_4 \cdot nH_2O$ ) and anglesite ( $PbSO_4$ ).

It is interesting to note that As is present in the senarmontite at concentrations of 3–4% and that the chalcostibite is altered into malachite. Until now, no secondary Ni- and Co-containing minerals have been found. The presence of small elemental sulphur crystals associated with valentinite and senarmontite has been observed repeatedly. The presence of sulphur is usually considered as characteristic of the rapid oxidation of sulphide under acidic conditions (Williams, 1990). The observed sulphur crystals in Goesdorf samples also suggest a fast kinetic formation process with preferential growth of the edges forming a negative depression into the faces. On the other hand, when Sb sulphides, oxides and sulphates are observed together in the cracks and voids, the oxides predominate over the sulphates and no elemental sulphur is present. Fig. 2 shows a representative example of such a case. The association of coquandite, klebelsbergite and peretaite with valentinite, senarmontite, stibiconite, gypsum, and native sulphur has been reported in a few other mines (Cipriani et al., 1980a,b; Sarp et al., 1983; Orlandi, 1984; Sabelli et al., 1992) but Sb-containing sulphate minerals have been found only rarely up to now and the conditions of formation are unknown. In order to stabilise 'simple' sulphates, such as coquandite, klebelsbergite, or peretaite, the appropriate redox regime needs to hold for Sb to remain in the form of Sb(III) rather than being transformed into Sb(V), which could lead to the pyrochlore series, and protons must be present to allow the sulphate to react with the oxides. However, at present the stability

constant values needed to properly evaluate the conditions for reactions are lacking.

Although minor minerals are not expected to buffer Sb concentrations in water, their presence can be interesting from a mineralogical point of view. Among them, it is worthwhile mentioning the presence in Goesdorf of brandholzite, which is a relatively rare mineral (Friedrich et al., 2000; Sejkora et al., 2007).

Vous trouverez ci-dessous la description complète de toutes les espèces minérales décrites jusqu'à aujourd'hui à Goesdorf. Elles sont présentées par classement systématique. Cette présentation nous a paru la plus logique car, hormis le quartz, la majorité des silicates et des carbonates, la plupart des minéraux primaires sont des sulfures.

## Sulfures

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

Déjà décrite en 2007 comme minéral présent tant dans le minerai que dans l'encaissant, la pyrite se présente sous différentes formes : framboïdale, réniforme, en cubes, en dodécaèdres pentagonaux, avec une taille de cristaux variant entre 1 et 4 mm. Les deux photos présentées à la figure 4 montrent l'aspect caractéristique de ce minéral.

La pyrite a également été observée au MEB en cristaux cubiques tronqués associés à la zinkenite (figure 5), ou en cristaux aux formes plus complexes (figure 6). Nous avons observé des filons de pyrite

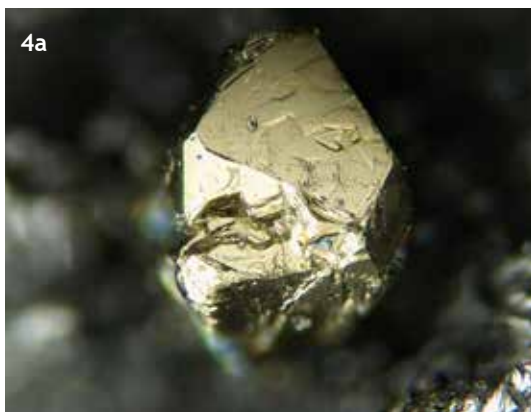
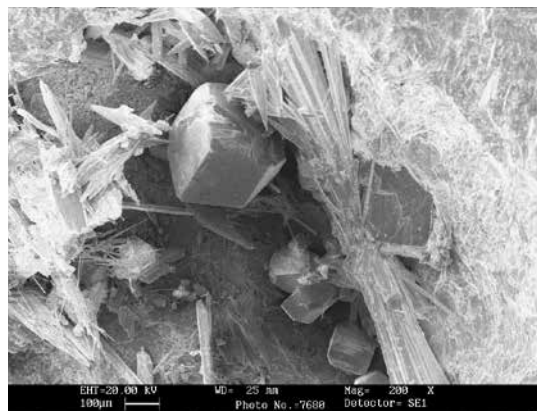
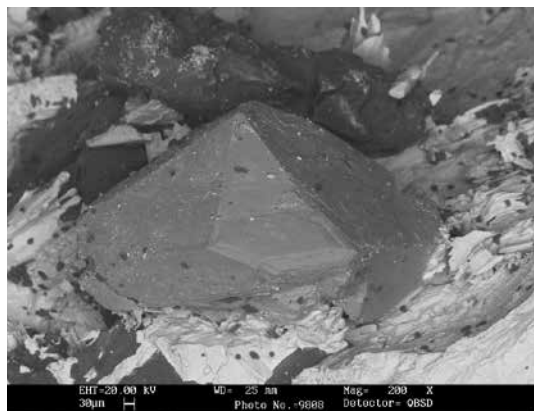


Figure 4: Pyrite (4a) photo G. Niceus, largeur de l'image 2,1 mm - (4b) photo G. Niceus, largeur de l'image 3,1 mm.





**Figure 5:** Pyrite et zinkenite : photo 7680 de l'échantillon 2009-sem04 - SE, 200x, 20kv, 200pa.



**Figure 6:** Pyrite et stibine : photo 9808 de l'échantillon 2009-sem62 - BSE, 200x, 20kv, 450pa.

fracturés et ayant permis la mise en place d'un filon de quartz et stibine. Une première génération de pyrite s'est formée dans la roche encaissante. La seconde génération devait former les filons d'origine, qui sont actuellement fracturés.

Des analyses à la microsonde électronique des pyrites nous apportent les informations suivantes : on note au moins deux générations de pyrite. L'une en cristaux bien formés et souvent riche en As (jusqu'à 4% pds) et une autre (en remplissage de vides) très pauvre en As (0,2 % pds). Nous avons également mesuré une pyrite avec une teneur exceptionnelle en Ni de 7,8 % pds.

Concernant les variations de teneurs en As et en autres éléments, nous avons réalisé un échantillonnage de différentes provenances de pyrite : trois pyrites associées au minerai que nous appellerons pyrite du filon ; trois pyrites associées aux quartz et chlorite des épontes ; deux pyrites dans l'encaissant proche du filon ; et trois pyrites dans la roche environnante (grès et schiste). Tous ces échantillons ont été triés pour être les plus purs possible et envoyés au service central d'analyse du CNRS à Vernaison (France) pour analyse ICP-MS des éléments en trace suivants : As, Ni, Co, Cu, Ag, Au, Zn, Tl, Se, V. Les résultats sont extrêmement intéressants. Les pyrites de Goesdorf montrent des teneurs significatives en As, Ni, Co, Cu et Zn. Les autres éléments montrant des teneurs proches de la limite de détection. L'ensemble de ces données est résumé sur la figure 7. La teneur en As est basse dans le filon ( $< 450$  ppm) et augmente de manière brusque dans l'éponte et l'encaissant (max 18800 ppm) pour rechuter brutalement dans la roche ( $< 450$  ppm)

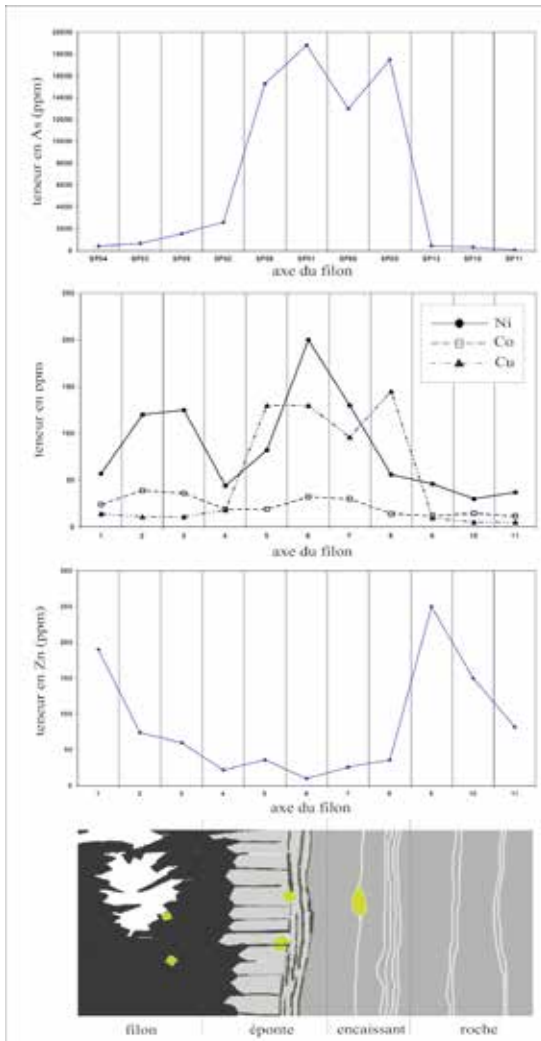
(figure 7a). La teneur en Cu est assez faible dans le filon ( $< 20$  ppm), augmente fort aux épontes et dans l'encaissant (max à 145 ppm) pour rechuter dans les roches ( $< 10$  ppm). Cette teneur en Cu semble avoir la même distribution que As (figure 7b). Une analyse des coefficients de corrélation montre une corrélation positive proche de 1 ( $R^2=0,9832$ ) entre As et Cu. La teneur en Ni présente deux pics, l'un associé au filon et l'autre aux épontes (figure 7b). La teneur en Co est quasi constante ( $< 40$  ppm) quel que soit l'endroit d'échantillonnage (figure 7b). La teneur en Zn présente certains pics dans le filon ou dans la roche sans lien apparent avec l'échantillonnage (figure 7c)

### Marcasite, $\text{FeS}_2$

La marcasite a été identifiée en 2007 par diffraction des rayons X.

### Chalcopyrite, $\text{CuFeS}_2$

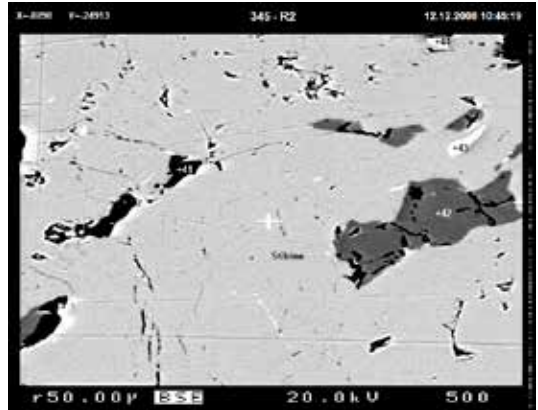
En 2007, nous signalions que la chalcopyrite était essentiellement observée dans les filons de quartz riches en carbonates ; comme à l'époque, nous n'avions que des échantillons prélevés sur les haldes, elle était généralement partiellement altérée en malachite. Lors de nos études à la microsonde électronique nous avons pu confirmer directement sa présence par analyse. La plupart du temps, elle forme de microcristaux associés à la berthierite et aux sulfosels de Pb-Sb (figure 8). On trouve de la chalcopyrite dans les filons f2, f4 et f5.



**Figure 7:** Projection graphique des teneurs en éléments en traces As, Ni, Co, Cu, Zn en fonction de leur position dans la minéralisation. (7a) teneur en As (7b) teneurs en Cu, Co, Ni (7c) teneur en Zn (7d) schématisation de l'emplacement de l'échantillon dans la minéralisation.

### Ullmannite, NiFeS

L'ullmannite a été observée pour la première fois sur l'échantillon LM2007-16 (G194) lors des analyses à la microsonde électronique. Elle se présente sous forme cubique et ressemble fort à une pyrite (figures 9 et 10). Les analyses montrent qu'elle peut contenir entre 2 et 4 % d'As, ce qui est commun dans les analyses d'ullmannite. Elle a été observée en association avec la berthierite ou en inclusions de 5  $\mu\text{m}$  dans la plagionite. On trouve de l'ullmannite uniquement dans le filon f2.



**Figure 8:** Chalcopyrite (point analyse 41), berthierite (pt 42) et jamesonite (pts 43 et 44) dans plage de stibine : photo 345-R2 de l'échantillon LMG345 - BSE, 20kv, 500pa, échelle de 50  $\mu\text{m}$  s.

### Galène, PbS

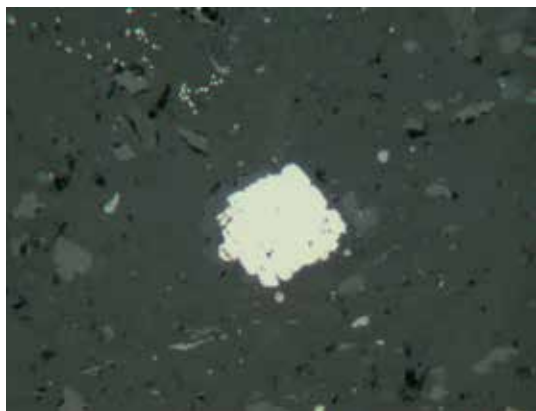
Nous n'avons rencontré la galène qu'une seule fois sur un point d'analyse à la microsonde électronique, en association avec la stibine, le quartz et la sidérite (échantillon LM2007-14).

### Sphalérite, ZnS

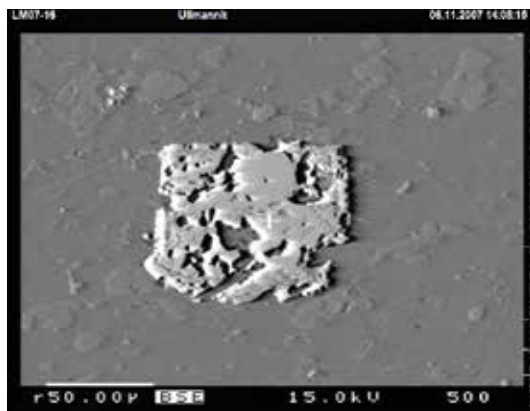
La sphalérite se présente sous forme de tétraèdres simples, translucides et de couleur ambrée (figure 11). Les cristaux font en moyen 0,5mm de diamètre et présentent parfois de légères tronçatures d'arête.

Lors de nos observations au microscope électronique à balayage, nous avons trouvé des fins cristaux de stibine parfaitement formés et terminés par des 'pompons' de sphalérite (figure 12 a et b). Les deux espèces ont été discriminées par EDS.

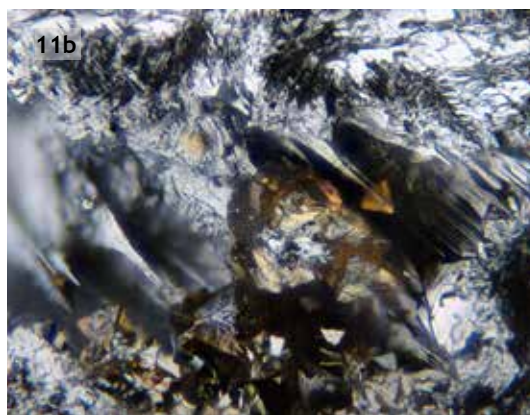
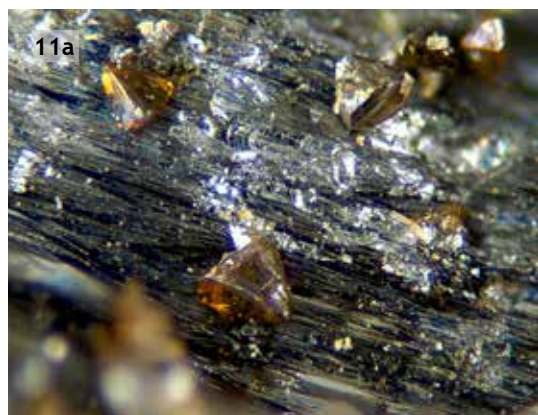
Nous nous sommes rendu compte que la sphalérite est beaucoup plus courante que lors de notre inventaire de 2007. Elle se trouve en fines lamelles en inter-croissance avec les sulfures de Sb. Les analyses montrent qu'elle a une très faible teneur en fer (< 1,2 % pds) mais qu'elle contient aussi du Sb en substitution (environ à 1% pds). Ce type de substitution est noté dans la littérature. On trouve de la sphalérite dans les filons f2, f3 et f5. Dans les filons f2 et f3, c'est l'un des composants majeurs de certaines zones.



**Figure 9:** Ullmannite dans une masse de stibine : photo en lumière réfléchie sur l'échantillon LM2007-16 - taille du cristal : 100 µm.



**Figure 10:** Ullmannite, cristal zoné contenant des inclusions dans plage de stibine : photo LM07-16 de l'échantillon LM2007-16 - BSE, 15kv, 500pa, échelle de 50 µm.



**Figure 11:** Sphalérite (11a) photo G. Niceus, largeur de l'image 0,7 mm - (11b) photo G. Niceus, largeur de l'image 0,85 mm.

### Stibine, $Sb_2S_3$

La stibine est de loin le composant majeur de la minéralisation de Goesdorf. Elle se présente la plupart du temps en minerai compact. Néanmoins, les géodes laissées dans le minerai ou dans la matrice de quartz réservent de très belles surprises. On y trouve des cristaux biterminés en croissances parallèles, des cristaux courbés ou complètement déformés, des cristallisations en gerbe, ... (planche 1 et 2). Nous avons pu mettre en évidence au moins deux générations de stibine ; la seconde génération se présentant sous la forme de boules fibroradiées (planche 2f). La taille des cristaux varie entre 0,2 et 4mm avec un seul échantillon connu montrant un cristal de 28mm.

La stibine de Goesdorf semble être connue des plus grands métallogénistes. En effet, des photos de la

stibine de Goesdorf illustrent l'ouvrage de référence rédigé par Paul Ramdohr en 1955 en allemand et en 1980 en anglais. On peut y voir un premier cliché présentant selon sa description une stibine, fortement stressée et déformée montrant des lamelles de corrugation et une extinction ondulante ; et un second cliché présentant une stibine, orienté de manière distincte, dont la brillance et l'orientation des grains varient considérablement dans la section. Ces illustrations sont visibles sur la figure 13.

Nos études à la microsonde électronique ont montré que la stibine de Goesdorf contient en moyenne 2,2 % pds d'As. Un tel pourcentage de substitution est connu dans les stibines roumaines (Buzatu *et al.*, 2015). On trouve de la stibine dans les filons f1a, f2, f3, f3b, f4 et f5 du puits II.

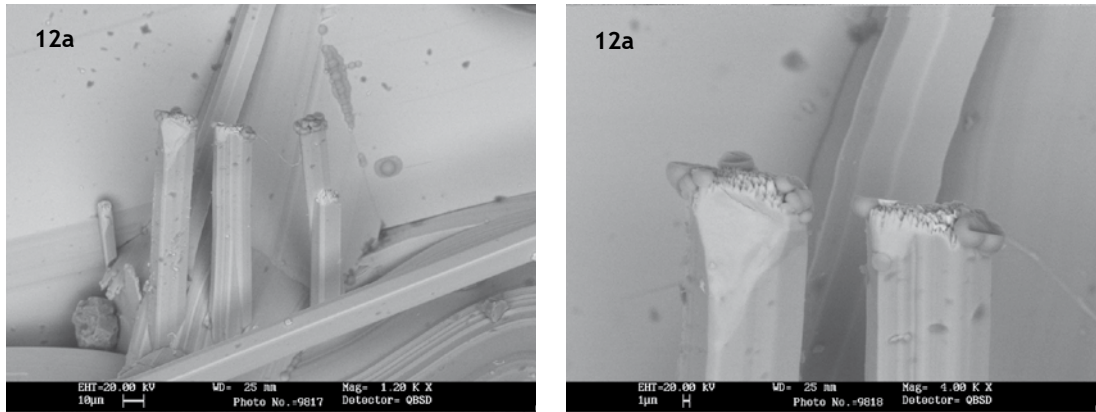


Figure 12: (12a) Stibine avec terminaison de sphalérite : photo 9817 de l'échantillon 2009-sem63 - BSE, 1200x, 20kv, 450pa - (12b) grossissement à 4000x (photo 9818).

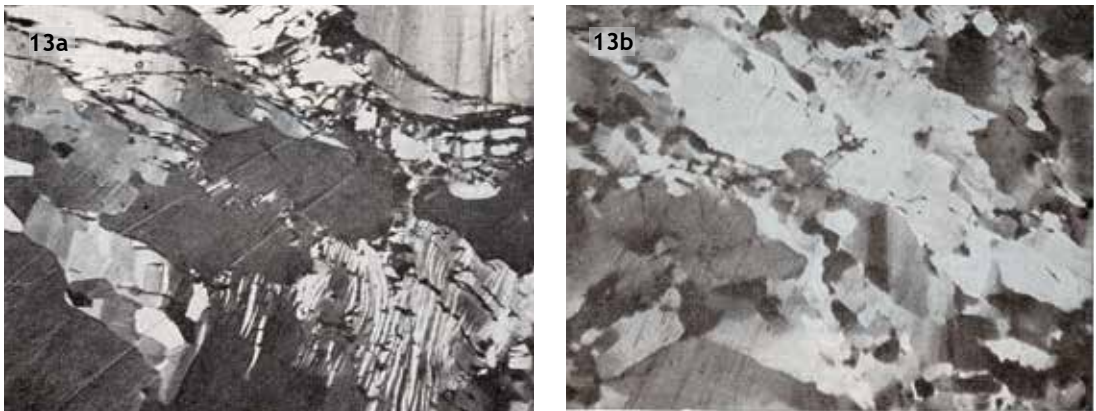


Figure 13: (13a) Stibine, Old antimony mine near Gösdorf, Luxemburg - fig. 464a (p 707) de Ramdohr, 1980 - grossissement 110x - (13b) stibine, Gösdorf, Luxemburg - fig. 464b (p 708) de Ramdohr, 1980 - grossissement 80x.

### Metastibine, $Sb_2S_3$

Cette espèce de couleur rouge a été identifiée par Bakker et Kolitsch dans leur publication de 2010. Ils la décrivent comme une phase rouge foncé en croûte épaisse qui périmorphise des formes creuses dans les cavités de stibine massive. Elle a été identifiée par ces deux auteurs par EDS et XRD. D'après ce que nous avons pu lire, cette espèce serait apparemment une 'stibine' supergène ou une phase d'altération... La littérature reste très vague sur les conditions de formation.

### Berthiérîte, $FeSb_2S_4$

La berthiérîte est observée dans la stibine massive associée à la chalcopirite, la sphalérite et des micros

quartz. Elle se présente en assemblage de fins cristaux allongés souvent de couleur jaune orangé métallique (figure 14). Elle est très rare et il est extrêmement difficile de la distinguer des autres sulfosels sous le binoculaire. Une identification par EDS ou à la microsonde électronique est absolument nécessaire. En section polie, elle est reconnaissable par sa couleur rosée. Elle est souvent associée à la chalcopirite, la jamesonite et la stibine (figure 8 et 15).

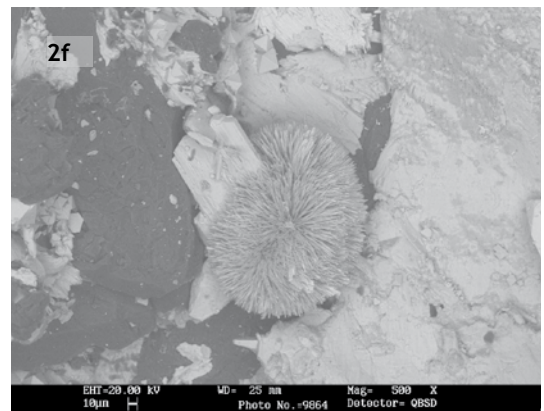
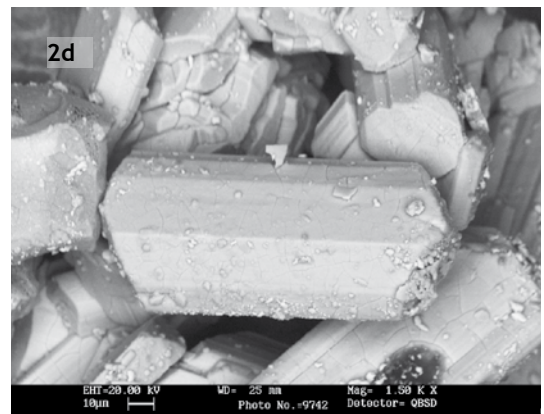
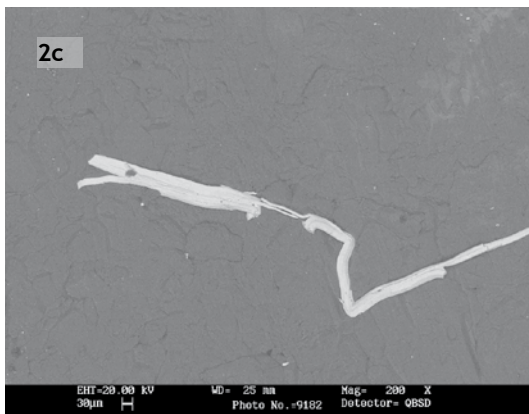
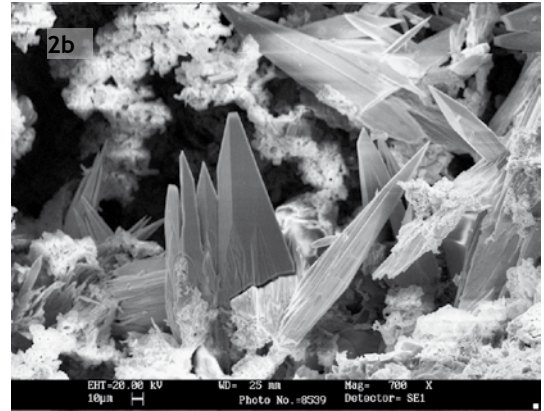
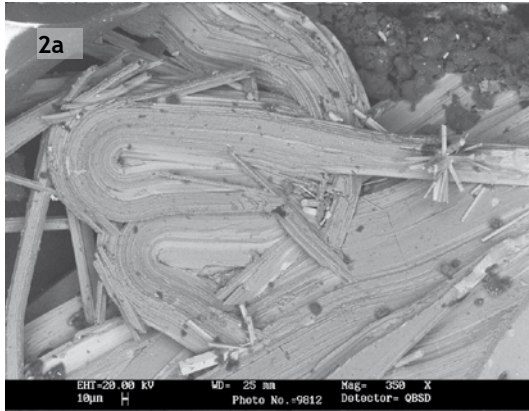
Nous avons identifié la berthiérîte dans les filons f1a, f2 et f5.

### Jamesonite, $Pb_4FeSb_6S_{14}$

La jamesonite se présente en assemblages de cristaux aciculaires avec un éclat métallique



**Planche 1:** (1a) Cristaux de stibine courbes partiellement recouverts de stibiconite, photo G. Niceus, largeur de l'image 4,5 mm - (1b) cristal de stibine parfaitement terminé dans une cavité de quartz, photo G. Niceus, largeur de l'image 3,3 mm - (1c) cristaux de stibine biterminés en croissance parallèles, photo G. Niceus, largeur de l'image 3,0 mm - (1d) cristal de stibine très fortement replié sur lui-même dans une cavité de quartz, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,00 mm - (1e) cristaux de stibine en croissance parallèle et terminés, recouverts de gypse, photo G. Niceus, largeur de l'image 3,24 mm - (1f) cristaux de stibine associés avec de la pyrite dans des cavités de quartz, photo G. Niceus, largeur de l'image 3,35 mm.



**Planche 2:** (2a) Stibine fortement replié sur elle-même : photo 9812 de l'échantillon 2009-sem63 (même échantillon que photo de la planche 1d) - *BSE*, 350x, 20kv, 450pa - (2b) cristaux de stibine biterminés en croissance parallèle : photo 8539 de l'échantillon 2009-sem20 (G68) - *BSE*, 700x, 20kv, 150pa - (2c) cristal de stibine fortement courbé dans une matrice de quartz : photo 9182 de l'échantillon 2009-sem42 - *BSE*, 200x, 20kv, 150pa - (2d) cristal de stibine biterminé, trapus et court : photo 9742 de l'échantillon 2009-sem51 - *BSE*, 1500x, 20kv, 150pa - (2e) gerbes de cristaux de stibine parfaitement terminés : photo 9823 de l'échantillon 2009-sem64 - *BSE*, 1000x, 20kv, 450pa - (2f) deux générations de stibine : première génération en cristaux droits bien formés et seconde génération en boule fibroradiée : photo 9864 de l'échantillon 2009-sem84 - *BSE*, 500x, 20kv, 450pa.

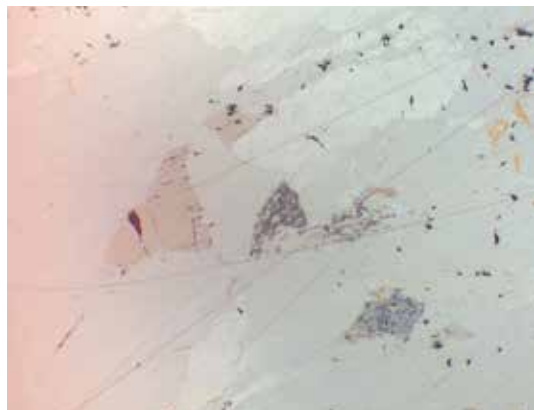


**Figure 14:** Ensemble de cristaux enchevêtrés de berthiërite de couleur jaune orangés dans une matrice de stibine, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,41 mm.

marqué dans les bleus jaunâtres (figure 16). Elle est toujours associée à la stibine et peut être facilement confondue avec la berthiërite et les sulfosels de Pb-Sb. Une analyse EDS est au minimum nécessaire pour l'identifier formellement. Sous le microscope électronique à balayage, la jamesonite se présente également en cristaux aciculaire (figure 17). Des analyses chimiques à la microsonde électronique ont été réalisées sur des très petites inclusions dans la stibine. Les points d'analyses sont numérotés 43 et 44 sur la figure 8. La jamesonite a un rapport Sb/Pb variant entre 0,9 et 1,0 ; cette phase a été identifiée uniquement dans le filon f2.

### Les sulfosels de Pb-Sb

Il existe une grande famille de sulfosels d'antimoine contenant divers éléments métalliques comme le plomb, l'argent, le zinc, le cuivre, le fer, etc. C'est le plomb qui est le plus fréquemment représenté et pour lequel la diversité d'espèces est la plus grande. Ces différentes espèces sont impossibles à distinguer à la loupe et au microscope électronique à balayage : puisque l'analyse EDS n'est pas quantitative, les rapports Pb/Sb ne sont pas mesurables. Dans la publication de 2007, nous parlions uniquement de zinkenite car nous n'avions pas eu l'occasion d'étudier le minerai à la microsonde électronique. Nous allons donc vous présenter ici les photos prises optiquement et au microscope électronique à balayage sous l'intitulé sulfosels de Pb-Sb (planche 3 et 4). Nous détaillerons les différentes espèces uniquement sur base

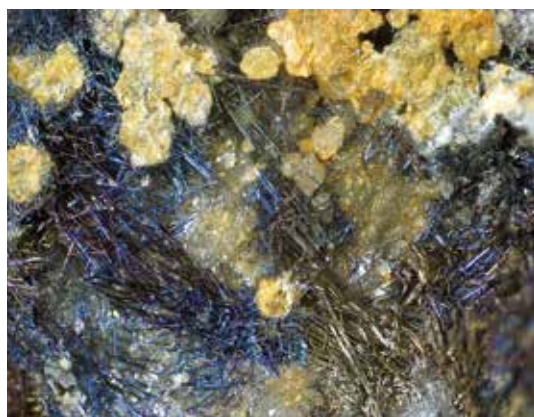


**Figure 15:** Vue d'une portion de la section polie LMG345 en lumière naturelle : la berthiërite (3) est la phase en rose, la stibine (1) est bleutée, la jamesonite (2) est plus blanche et la chalcopyrite (4) est jaune - grossissement 40 x.

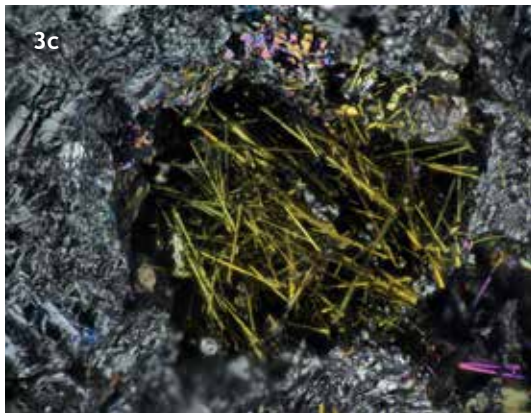
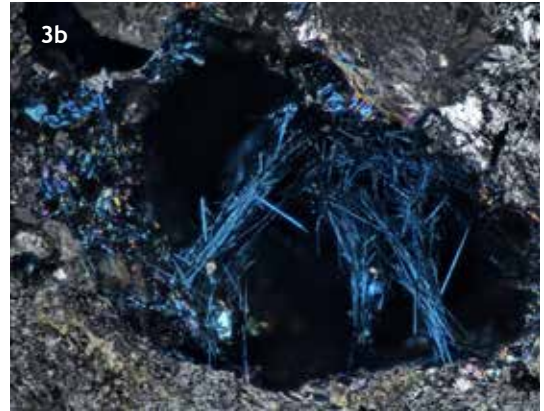
de nos photos et analyses chimiques (annexe). Il faut tout de même préciser que les deux sulfosels de Pb-Sb les plus courants sont la fülöppite et la zinkenite ; les autres étant plus accessoires.

### Fülöppite, $Pb_3Sb_8S_{15}$

La fülöppite cristallise en longues aiguilles relativement fines (600  $\mu\text{m}$  de long pour 10  $\mu\text{m}$  d'épaisseur). Elle a été identifiée dans la lame LMG 351. Cette lame composée essentiellement de stibine est traversée par une fissure remplie par de la sphalérite et de la fülöppite (figure 18). Elle a également été observée dans la lame LMG345 en



**Figure 16:** Ensemble de cristaux enchevêtrés d'aiguilles de jamesonite bleu jaunâtres sur quartz, photo G. Niceus, largeur de l'image 3,2 mm.



**Planche 3:** (3a) Cristal formé de nombreuses aiguilles parallèles de sulfosel de Pb-Sb dans une matrice de quartz, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,4 mm - (3b) ensemble d'aiguilles bleues enchevêtrées de sulfosel de Pb-Sb dans la stibine, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,0 mm - (3c) ensemble d'aiguilles jaunâtres enchevêtrées de sulfosel de Pb-Sb dans la stibine, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,0 mm - (3d) ensemble d'aiguilles bleues, vertes, rouges et jaunes enchevêtrées de sulfosel de Pb-Sb dans la stibine, photo G. Niceus, largeur de l'image 4,0 mm.

association avec la stibine et l'ullmannite (figure 19). Nous pouvons déduire de la figure 18 qu'à Goesdorf, les cristaux de fülöppite sont aciculaires à section hexagonale. La fülöppite a un rapport Sb/Pb variant entre 1,4 et 1,8. Cette phase a été identifiée uniquement dans les filons f2 et f3.

### Zinkenite, $Pb_9Sb_{22}S_{42}$

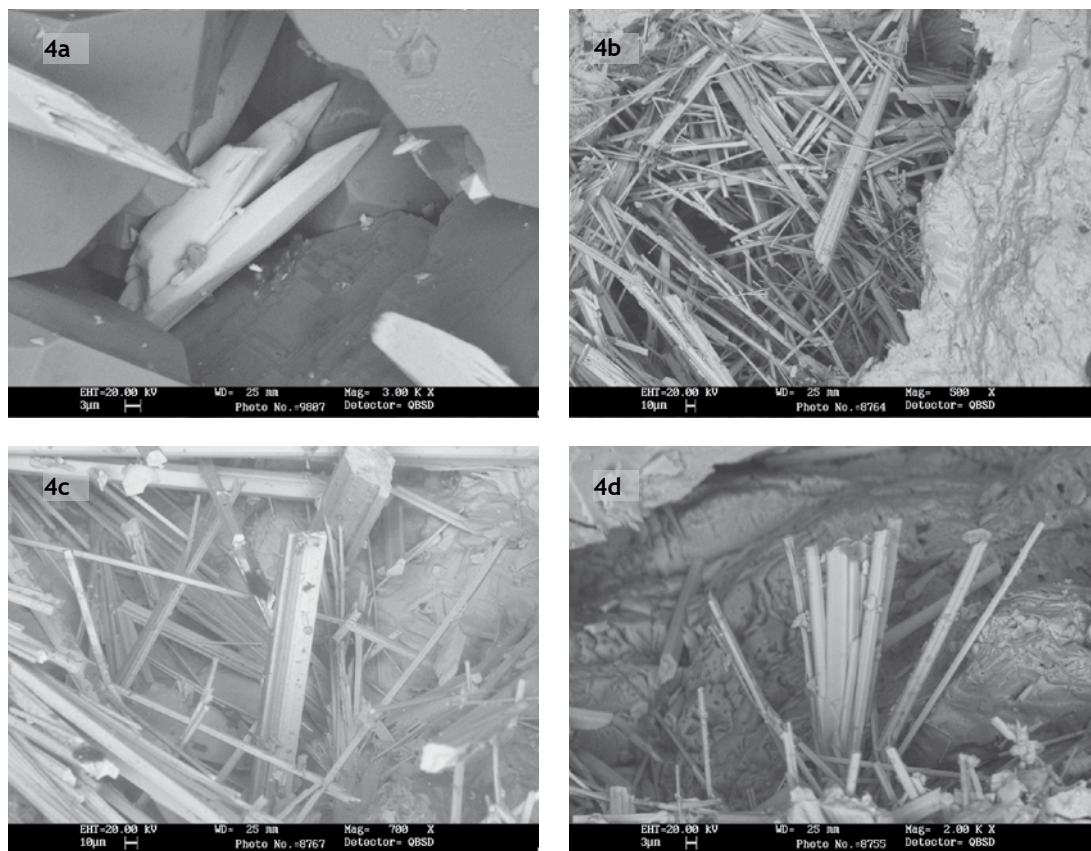
La zinkenite se présente en assemblage de fines aiguilles. Dans la lame LMG361, cette zinkenite en aiguilles est en association avec d'autres sulfosels de Pb-Sb (fülöppite, plagionite, et robinsonite) ainsi qu'avec l'ullmannite, la chalcostibite et la sphalérite dans une matrice de stibine (figure 20). La zinkenite a un rapport Sb/Pb variant entre 1,3 et 1,5.

La zinkenite remplit souvent des fractures dans des masses de stibine. La lame LM2007-19 présente un filon de stibine avec épontes de schiste (présence de quartz et pyrite aux épontes). Dans cette lame, nous avons pu observer une fracture remplie par la zinkenite avec d'autres sulfosels de Pb-Sb (fülöppite, plagionite, robinsonite) (figure 21). Cette phase n'a pas été identifiée dans les filons du puits II.

### Plagionite, $Pb_5Sb_8S_{17}$

Ce sulfosel de Pb-Sb est relativement rare à Goesdorf. Nous ne l'avons rencontré que dans deux lames minces où il est associé aux autres sulfosels de Pb-Sb. Un petit cristal de forme losangique est visible à la figure 22. La plagionite a un





**Planche 4:** (4a) Sulfosel de Pb-Sb en section hexagonale terminé en pointe : photo 9807 de l'échantillon 2009-sem61 - BSE, 3000x, 20kv, 150pa - (4b) ensemble de cristaux en aiguilles enchevêtrées de sulfosel de Pb-Sb : photo 8764 de l'échantillon 2009-sem34 - BSE, 500x, 20kv, 450pa - (4c) ensemble de cristaux enchevêtrées de sulfosel de Pb-Sb : photo 8767 de l'échantillon 2009-sem35 - BSE, 700x, 20kv, 450pa - (4d) cristaux de sulfosels de Pb-Sb en gerbe : photo 8755 de l'échantillon 2009-sem31 - BSE, 2000x, 20kv, 450pa.

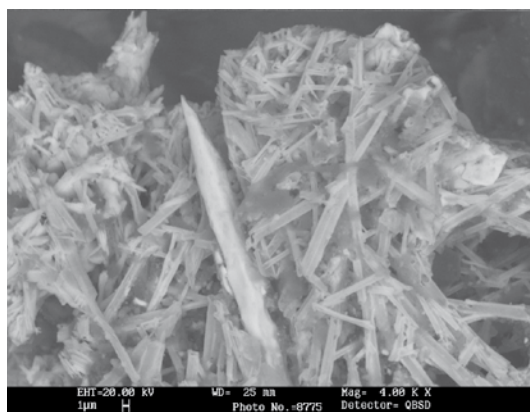
rapport Sb/Pb variant entre 0,9 et 1,1. Cette phase n'a pas été identifiée dans les filons du puits II.

### Robinsonite, $Pb_4Sb_6S_{13}$

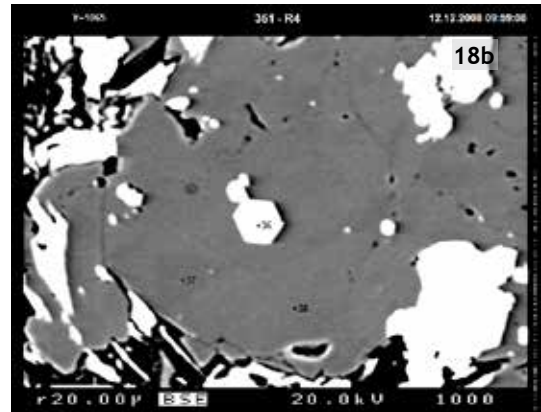
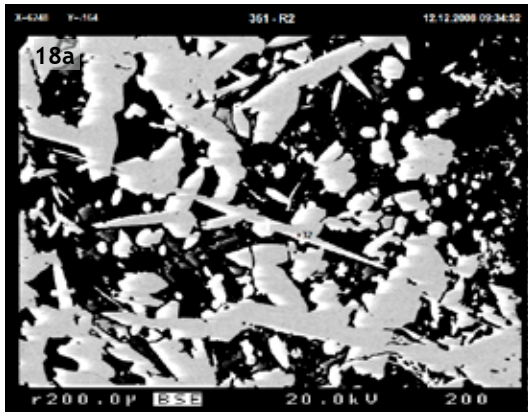
Cette espèce n'a été mesurée qu'une seule fois dans la lame 361. La robinsonite y est en association avec la zinkénite et la plagionite (figure 22). La robinsonite a un rapport Sb/Pb de 0,9. Cette phase n'a pas été identifiée dans les filons du puits II.

### Géocronite, $Pb_{14}Sb_6S_{23}$

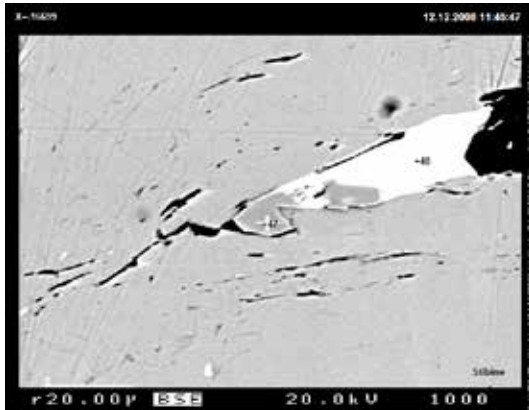
La géocronite n'a été mesurée qu'une seule fois dans la lame 366. IL s'agit du sulfosel de Pb-Sb le plus riche en plomb que nous ayons mesuré à Goesdorf. Cette géocronite a la particularité d'être



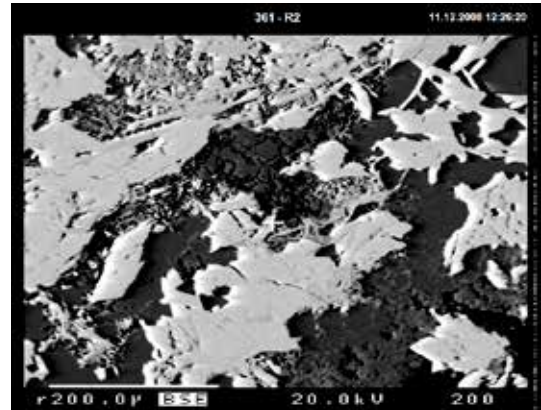
**Figure 17:** Jamesonite en forme de pointe de crayon dans un enchevêtrement de cristaux aciculaires de jamesonite également : photo 8775 de l'échantillon 2009-sem36 - BSE, 4000x, 20kv, 450pa.



**Figure 18:** (18a) Longue aiguille de fülöppite (analyse 32) dans une matrice de sphalérite : photo de l'échantillon LMG351 - BSE, 20kv, grossissement 200x - (18b) section hexagonale dans un cristal de fülöppite (analyse 36) dans une matrice de sphalérite (analyses 37 et 38) : photo de l'échantillon LMG351 - BSE, 20kv, grossissement 1000x.



**Figure 19:** Tülöppite (analyse 48) et ullmannite (analyse 47) dans une plage de stibine : photo de l'échantillon LMG345 - BSE, 20kv, grossissement 1000x.



**Figure 20:** Zinkenite (gris clair) montrant une cristallisation en aiguilles avec quelques exsolutions de plagioclase (gris plus marqué) dans une masse de sphalérite (plus foncée) : photo 361-R2 de l'échantillon LMG361 - BSE, 20kv, grossissement 200x.

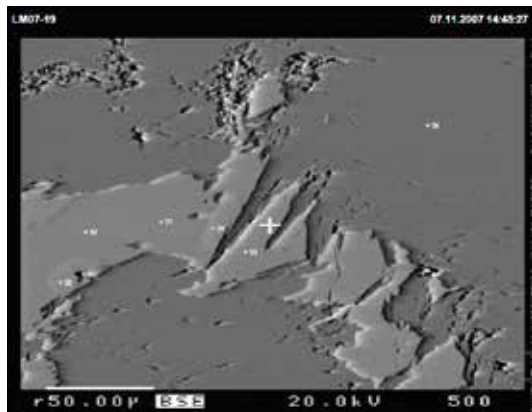
très pauvre en As, environ 0,3 % pds (figure 24). La géocronite a un rapport Sb/Pb variant entre 0,2 et 0,3 ; cette phase n'a pas été identifiée dans les filons du puits II.

Nous terminerons cette présentation des sulfosels de Pb-Sb par une représentation graphique des analyses microsondes dans le diagramme ternaire Pb - Sb - S présenté en figure 23. Ce graphique montre clairement l'enrichissement en plomb depuis la stibine jusqu'à la géocronite. Nous pouvons également conclure en soulignant que sur base de nos observations nous remarquons que : les sulfosels de Pb-Sb les plus courants à

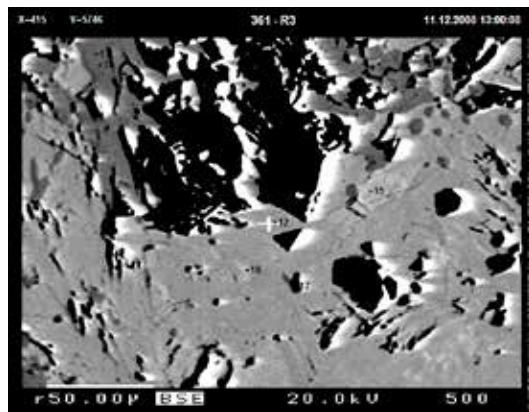
Goesdorf sont la fülöppite et la zinkenite ; que la plagioclase est plus rare ; que robinsonite et géocronite sont extrêmement rares ; et que la jamesonite est surtout trouvée en association avec la berthiérite et la chalcopyrite.

### Chalcostibite, $\text{CuSbS}_2$

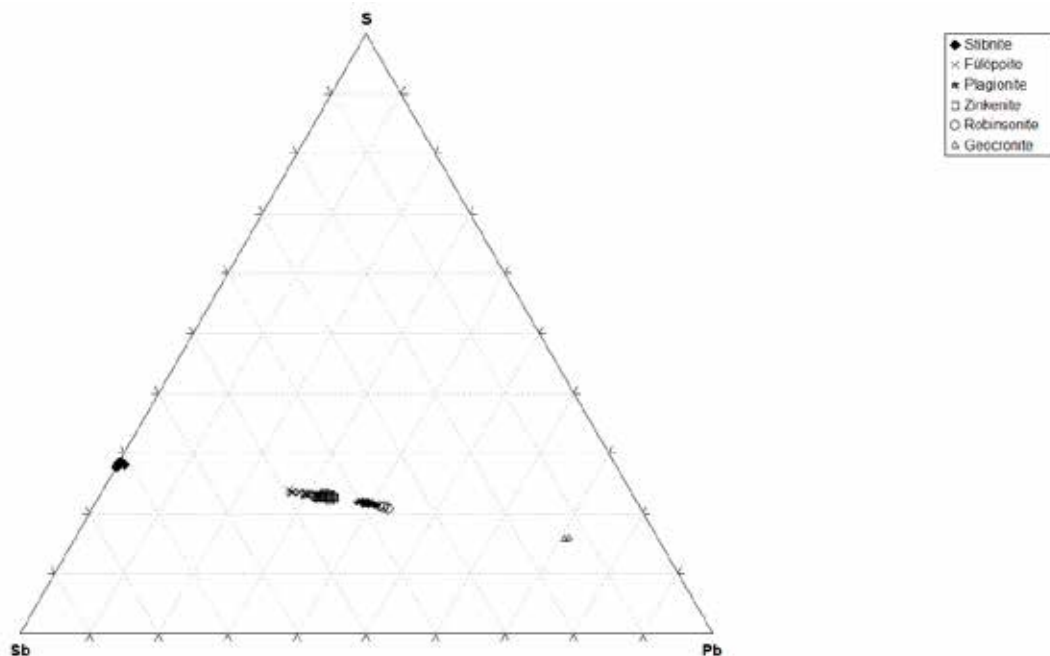
Comme nous l'avons présenté en 2007, la chalcostibite se présente soit sous la forme de monocristaux assez trapus, soit sous la forme d'aiguilles en assemblages fibroradiés. Les monocristaux trapus (figure 25) sont partiellement altérés soit en cuals-



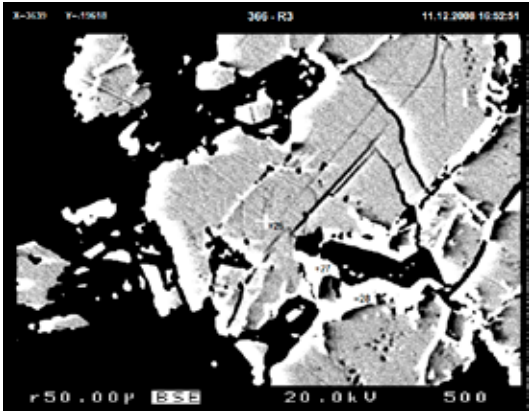
**Figure 21:** Zinkenite (analyses 51, 52, 55) avec quelques pointements de plagioclase (analyses 53 et 54) remplissant une fracture dans la stibnite (analyse 56) : photo LM07-19 de l'échantillon LM2007-19 - BSE, 20kv, grossissement 500x.



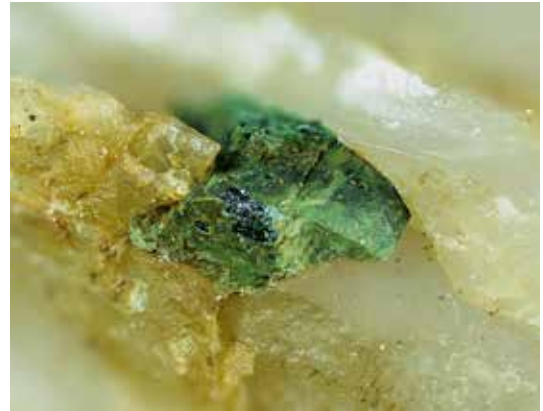
**Figure 22:** Plagioclase en cristal losangique au centre (analyse 12) entouré de zinkenite (analyses 13, 14 et 18) avec un pointement de robinsonite (analyse 15) et un petit cristal d'ullmannite (analyse 17) : photo 361-R3 de l'échantillon LMG361 - BSE, 20kv, grossissement 500x.



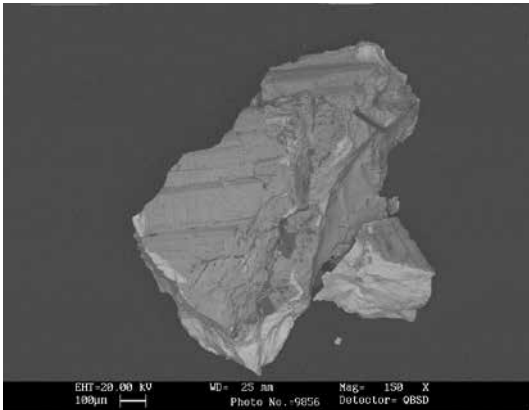
**Figure 23 :** Diagramme ternaire Pb - Sb - S présentant les analyses des sulfosels de Pb-Sb de Goesdorf étudiés à la microsonde électronique.



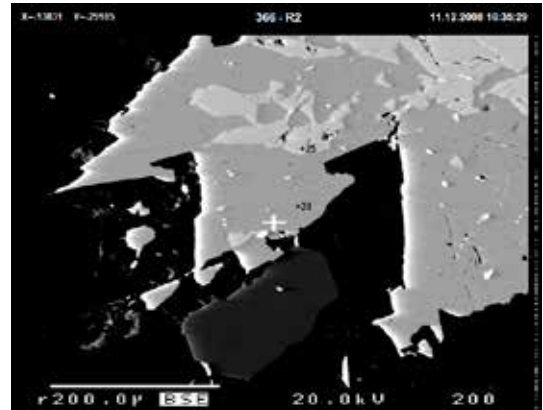
**Figure 24:** Géocronite (analyses 27, 28), zone brillante en remplacement des bords d'une grande plage de stibine (analyse 26) : photo 361-R3 de l'échantillon LMG361 - BSE, 20kv, grossissement 500x.



**Figure 25:** Monocrystal de chalcostibite bien formé et partiellement altéré en cualstibite dans une matrice de quartz, photo G. Niceus, largeur de l'image 3,2 mm.



**Figure 26 :** Chalcostibite, fragment de cristal isolé et son analyse eds montrant clairement les pics Sb, Cu et S : photo 9856 de l'échantillon 2009-sem86 - BSE, 150x, 20kv, 150pa.



**Figure 27:** Chalcostibite (analyse 24), grande zone avec stibine (analyse 25) et un cristal de pyrite bien formé (plus sombre) : photo 366-R2 de l'échantillon LMG366 - BSE, 20kv, grossissement 200x.

tibite, soit en une autre phase que nous n'avons pas encore pu déterminer (indéterminé 2). Ces phases d'altération secondaires permettent une reconnaissance assez facile de l'espèce.

Plusieurs cristaux de chalcostibite ont été photographiés au MEB et mesurés à l'EDS (figure 26). L'ambiguïté possible entre la chalcostibite et les autres phases composées de Cu, Sb et S, soit la famatinite et la skinnerite, a été levée par diffraction de rayons X et ensuite par nos mesures à la microsonde électronique sur les lames LMG 361 et 366. Cette phase s'y retrouve en association

avec la stibine, la fülöppite, la pyrite (figure 27) ; parfois aussi avec la berthierite en plus ; ou dans des quartz massifs avec sidérite et pyrite. Cette espèce rare n'a pas été identifiée dans les filons du puits II.

### Kermesite, $Sb_2S_2O$

Comme nous l'avons relaté en 2007, la kermesite se présente sous forme de petits cristaux rouge vif. Cette phase avait déjà été citée par Heinen & Kronz en 1993. C'est un minéral classique des

paragenèses d'antimoine en phase d'oxydation. Il peut être facilement confondu avec la metastibine. Nous avons réalisé de très nombreuses analyses de cette phase difficile à isoler par la taille des grains. Elle a été vérifiée par EDS et XRD.

## Oxydes

### Valentinite, $Sb_2O_3$

À Goesdorf, la valentinite est le principal minéral d'oxydation de la stibine. La variabilité des formes est énorme. Nous avons défini 5 habitus lors de nos observations à la loupe binoculaire (planche 5) et d'autres, ou des variations des premiers lors de nos observations au microscope électronique à balayage (planche 6). Pour l'habitus 1, les faces principales développées sont (110) et (011) de manière équivalente ; pour l'habitus 2, ce sont les faces (110) principalement et (011) ; pour l'habitus 3, c'est un prisme formé par (001) et (010) et terminé par (100) et (110) ; pour l'habitus 4, les faces principales développées sont (001), (100) et (110) ; pour l'habitus 5, ce sont les faces du prisme (100) et (001) terminées par (010) avec troncatures selon (011) et (110). Tous ces habitus sont schématisés à côté des photos de la planche 5.

Les cristaux sont rarement isolés, souvent ils se regroupent en éventails (assemblage radié). Ce regroupement pouvant être en rayons partiels ou complet, allant même jusqu'à former des boules lamellées ou fermées (planche 7). Cette planche

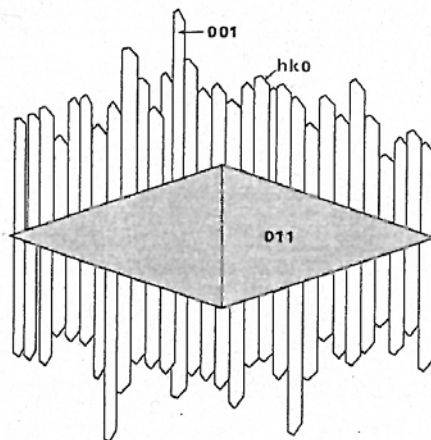


Figure 29 : Schéma de la reprise de croissance d'une valentinite sur une autre (mine du Lac Nicolet) - figure 21 de l'article de Robinson et Normand, 1996.

nous permet également d'apprécier la variété de couleurs de cette espèce.

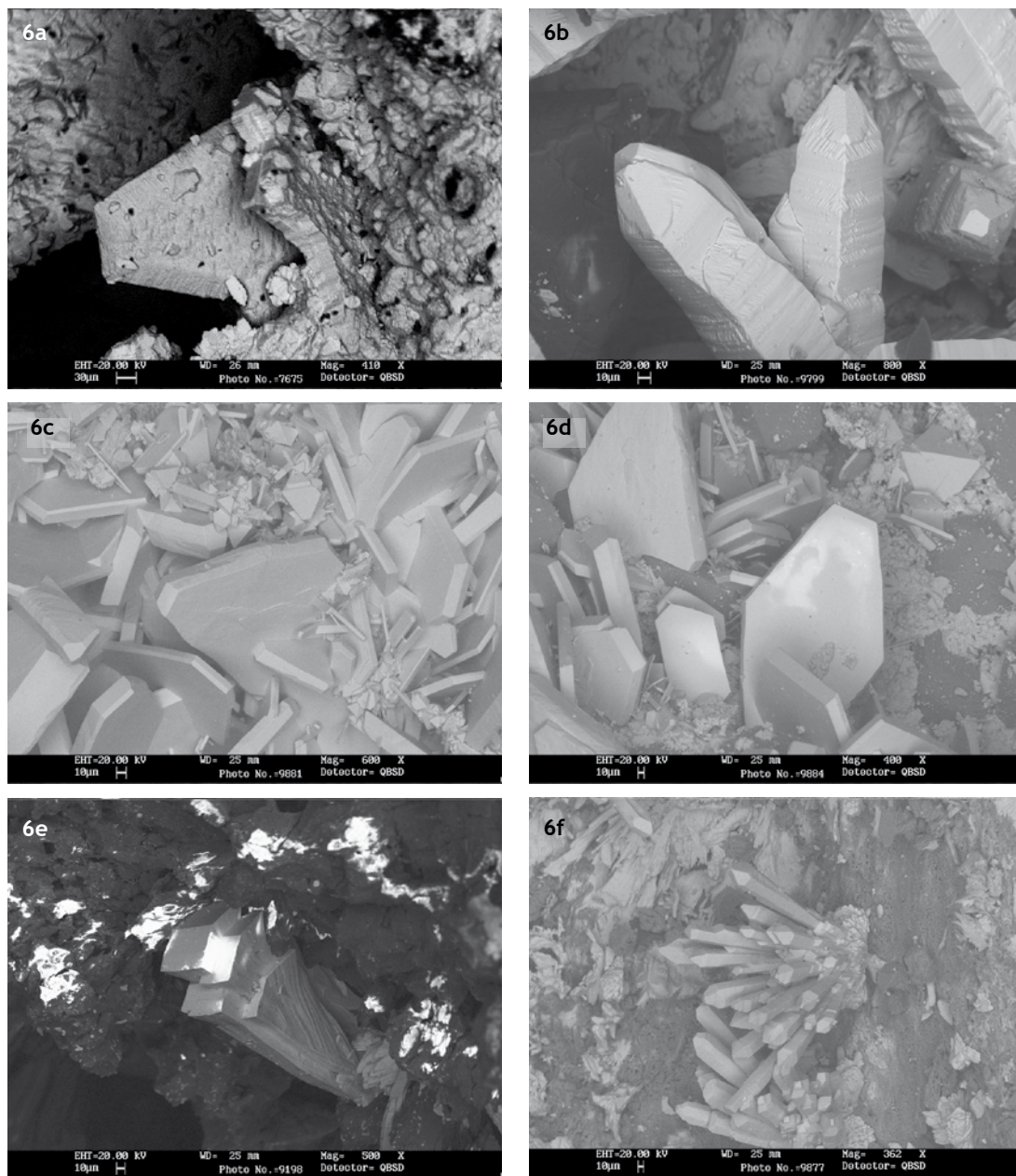
Nous venons de voir sur les planches 5 et 7 que la couleur de la stibine varie énormément. Elle peut être incolore, blanche, jaune orangé, rouge (figure 28a) et même tricolore (figure 28b). Nous constatons également que certaines valentinites sont une reprise de croissance orthogonale d'une valentinite sur une autre, ce qui donne des structures en peignes assez spectaculaires, tant en photo optique qu'au microscope électronique à balayage (planche 8). Les observations au microscope électronique et notamment les photos



Figure 28 : (28a) Valentinite rouge, photo G. Niceus, largeur de l'image 3,0 mm - (28b) valentinite tricolore jaune, orange et blanche (échantillon G167), photo G. Niceus, largeur de l'image 1,3 mm.



**Planche 5:** Principaux habitus des valentinites de Goesdorf (5a) habitus 1 de la valentinite (faces principales développées 110 et 011) - valentinite blanche en bipyramide, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,9 mm - (5b) habitus 1 de la valentinite - cristal jaune transparent en assemblage multiple, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,0 mm - (5c) Habitus 2 de la valentinite (faces principales développées 110 et 011) - cristal blanc parfaitement terminé sortant d'une boule de valentinite, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,3 mm - (5d) habitus 3 de la valentinite (faces principales du prisme 001 et 010 et terminaison avec 100 et 110) - ensemble de cristaux blancs avec un encroustement rouge, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,5 mm - (5e) habitus 4 de la valentinite (faces principales développées 001, 100 et 110) - cristal isolé flottant jaunâtre, photo G. Niceus, largeur de l'image 0,9 mm - (5f) habitus 5 de la valentinite (faces principales du prisme 100 et 001 terminé par 010 avec tronçatures 011 et 110) - deux cristaux transparents isolés et biterminés, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,47 mm.



**Planche 6:** (6a) Valentinite rouge avec un habitus différent : photo 7675 de l'échantillon 2009-sem06 - BSE, 410x, 20kv, 150pa - (6b) valentinite de l'habitus 1 : photo 9799 de l'échantillon 2009-sem59 - BSE, 800x, 20kv, 450pa - (6c) valentinite incolore du puits II présentant un habitus proche du 4 : photo 9881 de l'échantillon 2009-sem90 - BSE, 600x, 20kv, 450pa - (6d) valentinite incolore dont l'habitus est proche du 4 : photo 9884 de l'échantillon 2009-sem91 - BSE, 400x, 20kv, 450pa - (6e) valentinite jaune épaisse présentant un habitus encore différent : photo 9198 de l'échantillon 2009-sem45 - BSE, 500x, 20kv, 450pa - (6f) valentinite incolore ressemblant à l'habitus 1 mais avec le prisme (100, 001) fortement développé : photo 9877 de l'échantillon 2009-sem89 - BSE, 362x, 20kv, 450pa .





planche 8f et 8g montrent en détail comment cette reprise de croissance se fait. De telles reprises de croissance ont été décrites par Robinson et Normand en 1996 dans leur article sur la mine d'antimoine de Lac Nicolet au Québec (figure 29).

### Sénarmontite, $\text{Sb}_2\text{O}_3$

Ce minéral polymorphe de la valentinite est plus rare que cette dernière. Signalé pour la première fois à Goesdorf par Heinen et Kronz en 1993, il se présente toujours sous la forme d'octaèdres quasi parfaits de 0,2 à 0,3 mm de diamètre. Ce minéral d'oxydation se trouve souvent dans de petites géodes du minerai de stibine de couleur jaunâtre. Ces octaèdres sont rarement isolés mais tapissent les géodes dans lesquelles ils se trouvent. Cette espèce a été confirmée par diffraction des rayons X et par analyse chimique (EDS et microsonde électronique). Les planches 9 et 10 présentent les variations de couleur et de taille des octaèdres, tant en photo optique qu'au microscope électronique à balayage. Nos analyses à la microsonde électronique ont montré que régulièrement la sénarmontite contient de l'arsenic. La sénarmontite de la lame LMG351 (filon f3 du puits II) contient jusqu'à 3,7 % pds As.

### Stibiconite, $\text{Sb}^{3+}\text{Sb}^{5+}_2\text{O}_6(\text{OH})$

Même si elle ne forme pas de beaux cristaux mais plutôt des encroutements, la stibiconite est une phase d'altération importante de la stibine. Elle forme une pellicule de couleur jaunâtre recouvrant partiellement ou entièrement les cristaux de stibine (photos planche 1a et 1d). Dans de rares cas, nous avons pu observer une pseudomorphose complète de la stibine en stibiconite.

### Brandholzite, $\text{Mg}[\text{Sb}(\text{OH})_6]_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Le minéral décrit en 2007 en plaquettes pseudo-hexagonales de 3 à 4 mm, blanches ou incolore,

et striées sur la tranche s'est avéré être de la brandholzite. Cette brandholzite, nous l'avons référencée dans la publication de 2007 comme « indéterminé 2 » et décrite en 2009 (Filella *et al.*, 2009b). En 2010, Bakker et Kolitsch publient, dans la revue *Lapis*, un article sur la minéralogie de la mine et notamment sur la présence de brandholzite à Goesdorf en la référant comme est la troisième occurrence mondiale. La brandholzite est une espèce décrite relativement récemment. Approuvée par l'IMA en 1998, la publication la décrivant date de 2000 (Friedrich *et al.*, 2000).

Les plaquettes de brandholzite sont souvent inter-pénétrées ; elles sont alors blanches au centre et incolores sur les bords. Nous avons récolté de nombreux échantillons de cette espèce et remarqué à nos dépens qu'elle était fortement soluble dans l'eau. La planche 11 présente les variations de taille des brandholzites de Goesdorf ainsi que des détails de structure.

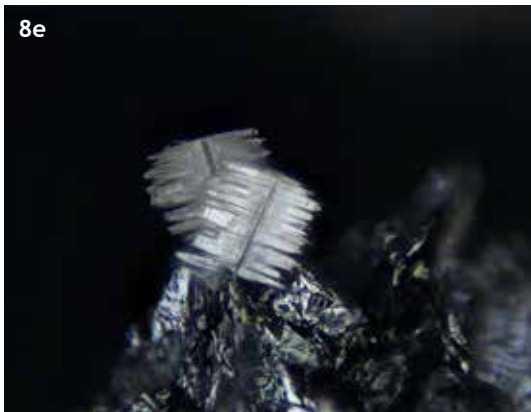
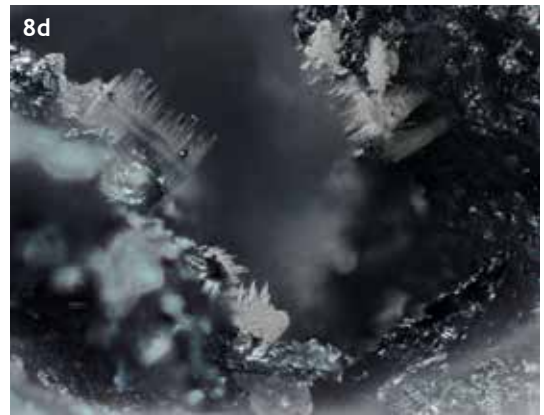
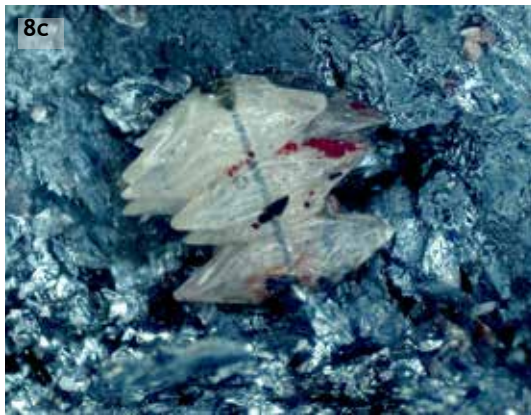
### Cualstibite, $\text{Cu}_2\text{Al}(\text{OH})_6[\text{Sb}^{5+}(\text{OH})_6]$

Nous avons réalisé plusieurs prélèvements de la phase d'altération de la chalcostibite. Cette phase d'altération était déjà problématique en 2007. Dans la publication, nous regroupons nos observations sous la description de l'indéterminé 3. De ces nombreuses analyses, il ressort que l'une des phases est la cualstibite. L'échantillon 2016-sem20 (G169) montre une analyse EDS avec la présence de Cu, Al, Sb et O et l'analyse par diffraction des rayons X montre les pics principaux de la cualstibite (4,89 – 4,17 – 2,33 et 1,79).

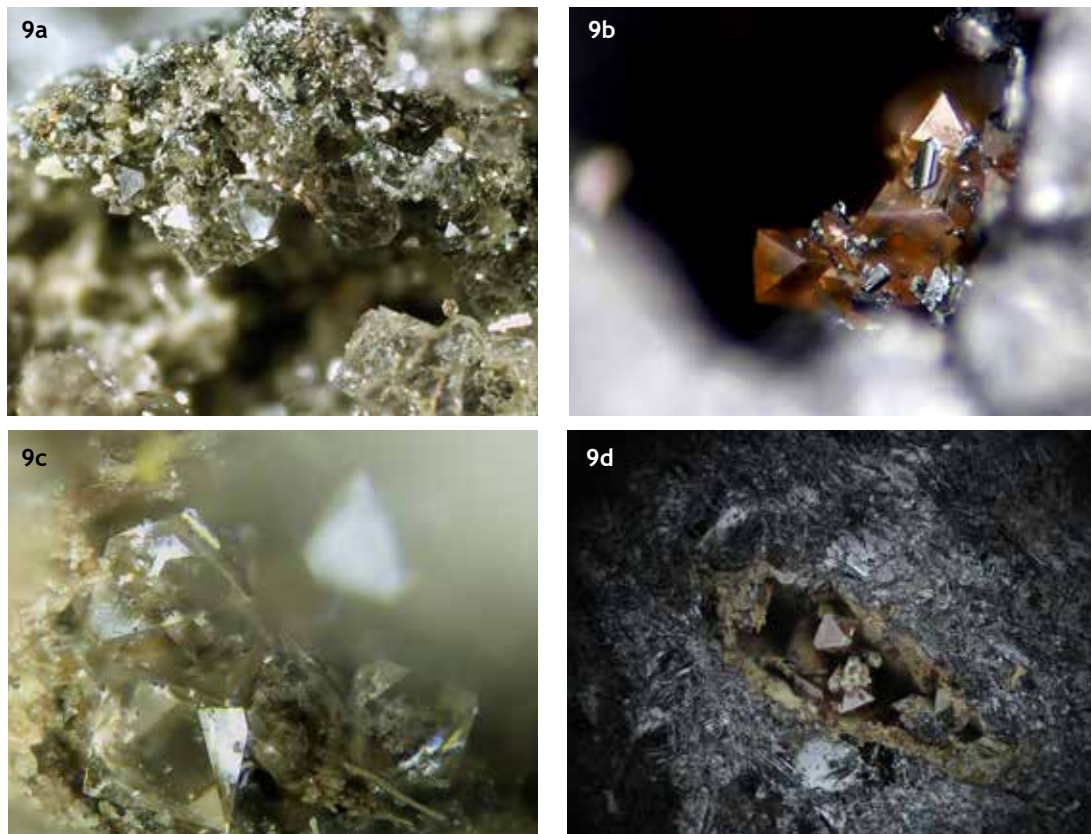
### Tripuhyite, $\text{Fe}^{3+}\text{Sb}^{5+}\text{O}_4$

La tripuhyite est un minéral d'altération de la stibine dans la zone d'oxydation. Nous l'avons observée à la loupe, au microscope électronique et à la microsonde. En optique, elle se présente sous la forme de superbes boules jaunes orangées (figure 30).

**Planche 7:** (7a) Valentinite biterminée : la première terminaison est incolore et nette, la seconde est blanche et fibreuse (habitus 5), photo G. Niceus, largeur de l'image 1,3 mm - (7b) valentinites blanches transparentes en assemblage fibroradié peu fourni (habitus 2), photo G. Niceus, largeur de l'image 1,8 mm - (7c) ensemble de cristaux de valentinite formant un rayon partiel ou un nœud papillon, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,3 mm - (7d) ensemble d'aiguilles de valentinite jaunes en bouquet, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,30 mm - (7e) bouquets fibroradiés dans toutes les directions de valentinite blanche jaunâtre, photo G. Niceus, largeur de l'image 3,2 mm - (7f) boule complète de valentinite jaune avec quelques cristaux dépassants, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,6 mm - (7g) boules complètes de valentinite jaune en lamelles avec sénarmontite, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,18 mm - (7h) boule de valentinite blanche en excroissance, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,23 mm.



**Planche 8:** (8a) Valentinite en peignes parallèles comme les pages d'un livre, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,3 mm - (8b) valentinite blanche en peigne sur une transparente (habitus 2 sur habitus 2), photo G. Niceus, largeur de l'image 1,12 mm - (8c) ensemble de cristaux de valentinite (habitus 6) en croissances parallèles sur un cristal de stibine, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,51 mm - (8d) valentinite blanche en peigne, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,00 mm - (8e) valentinite blanche en peigne, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,40 mm - (8f) valentinite avec reprise de croissance terminale et latérale : photo 8545 de l'échantillon 2009-sem21 - BSE, 400x, 20kv, 450pa - (8g) valentinite montrant le début et l'extension de la reprise de croissance latérale : photo 9191 de l'échantillon 2009-sem44 - BSE, 1500x, 20kv, 450pa.

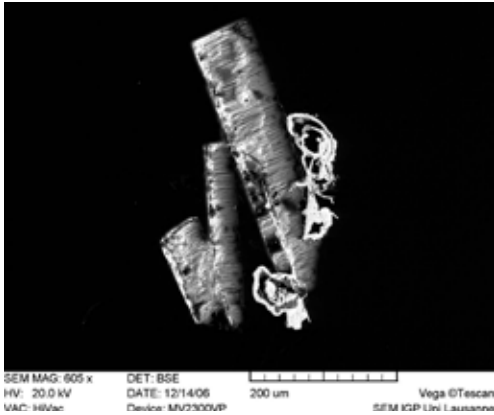


**Planche 9:** Différentes couleurs de la sénarmonite de Goesdorf. (9a) cristaux incolores transparents tapissant une géode, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,0 mm - (9b) cristaux jaunes avec des stibines, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,0 mm - (9c) gros cristaux incolores transparents, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,2 mm - (9d) cristaux parfaitement octaédriques transparents avec des inclusions rouges, photo G. Niceus, largeur de l'image 3,0 mm.

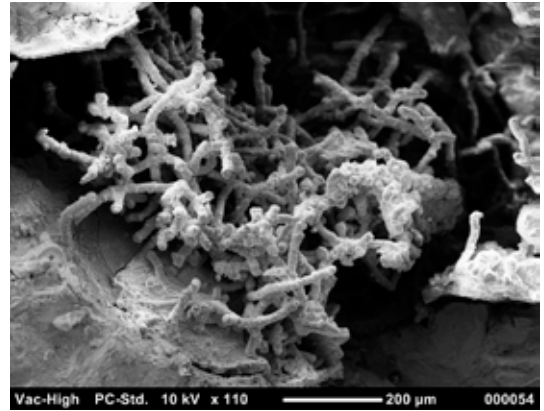
L'échantillon photographié à la figure 30 a été analysé (2009-sem98). La photo au microscope électronique de ce dernier est présentée à la planche 12a. L'analyse EDS indique les éléments Fe-Sb-O. Dans la lame LMG348, lors de nos analyses à la microsonde électronique, nous avons un grand nombre de tripuhyites dans la zone d'encaissant du filon (f2). Il s'agit de couronnes de tripuhyite entourant des masses de carbonates de Fe-Mg, type sidérite. Il doit probablement s'agir d'un phénomène de pseudomorphose (planche 12b). L'échantillon 2009-sem73, analysé à l'EDS Sb-Fe-O a été vérifié par diffraction des rayons X comme tripuhyite en 2016.



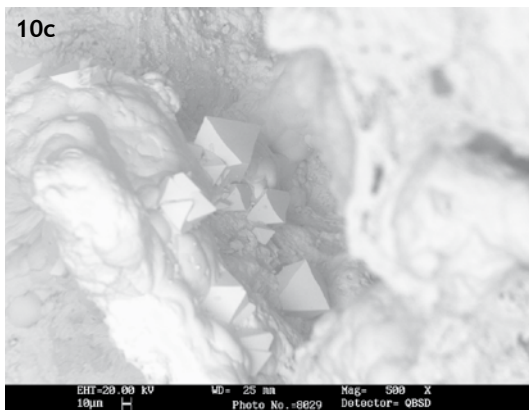
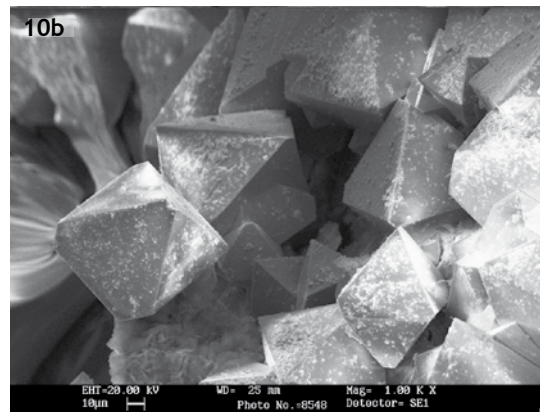
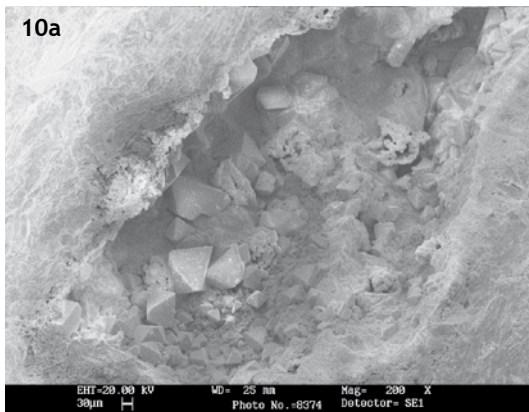
**Figure 30:** Superbe boule jaune orangée de tripuhyite, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,60 mm.



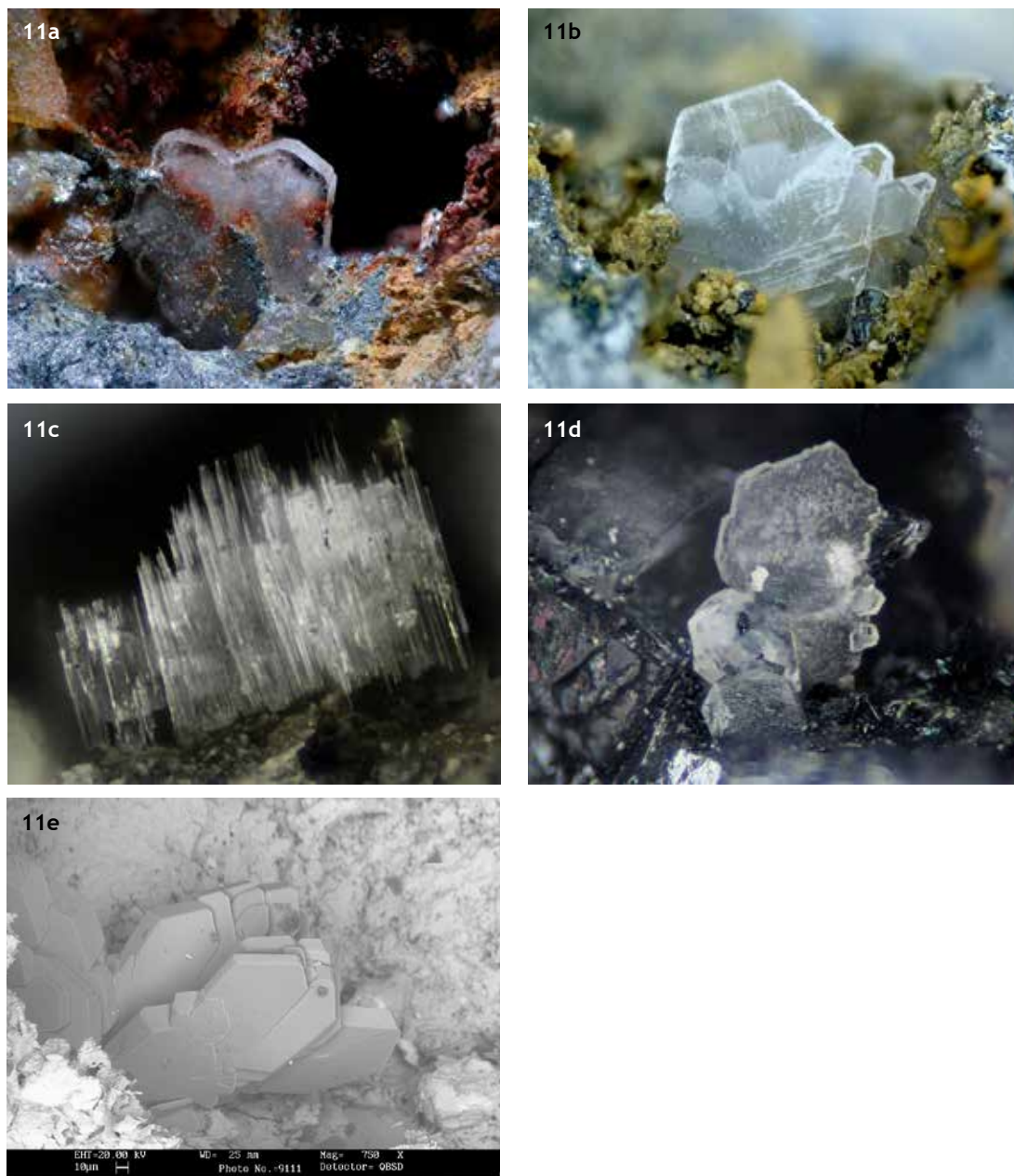
**Figure 31:** très fins vermicules de schafarzikite associés aux plaquettes de brandholzite : photo Uni Lausanne - BSE, 605x, 20kv



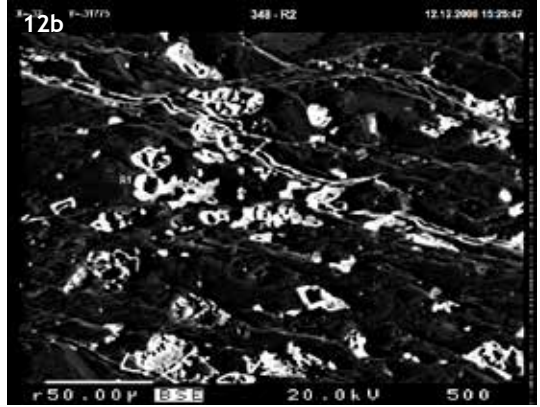
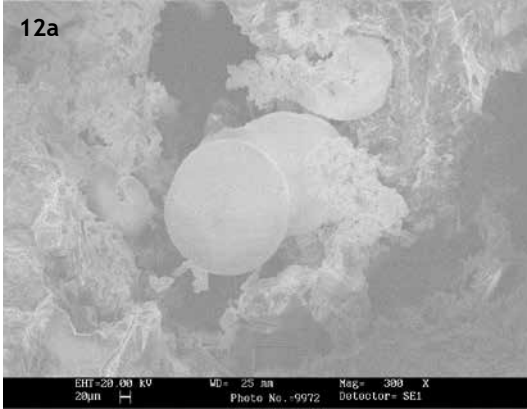
**Figure 32:** filaments rouges de schafarzikite analysés à l'eds : photo 0054 (Jeol 5000) de l'échantillon 2010-sem08 - BSE, 110x, 10kv, 150pa



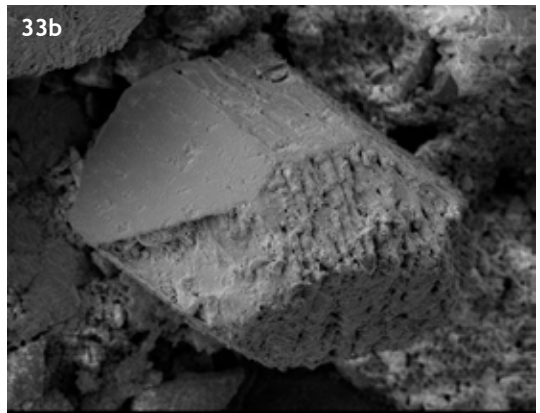
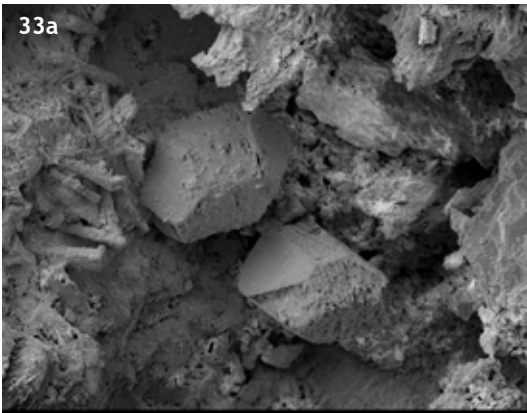
**Planche 10:** La sénarmontite de Goesdorf vue au MEB (10a) tapis d'octaèdres de sénarmontite en fond de géode : photo 8374 de l'échantillon 2009-sem25 - ES, 200x, 20kv, 150pa - (10b) géode remplie de cristaux de sénarmontite : photo 8548 de l'échantillon 2009-sem27 - ES, 1000x, 20kv, 150pa - (10c) sénarmontite en fond de géode : photo 8029 de l'échantillon 2009-sem15 - BSE, 500x, 20kv, 650pa.



**Planche 11:** Différentes tailles et formes de la brandholzite de Goesdorf (11a) deux cristaux accolés, incolores et transparents sur les bords et blancs au centre (échantillon G188), photo *indéterminé* 2 Ferrantia 49, largeur du cristal 3,0 mm NCO4 - (11b) cristal parfaitement hexagonal semi transparent, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,41 mm - (11c) vue coté tranche d'un cristal de brandholzite montrant l'aspect strié, voir fibreux, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,10 mm - (11d) cristaux empilés et interpénétrés, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,30 mm - (11e) ensemble de cristaux en hexagones étirés : photo 9111 de l'échantillon 2009-sem37 - BSE, 750x, 20kv, 150pa.



**Planche 12:** Différentes tripuhytes de Goesdorf (12a) boules jaunes de tripuhyte analysées à eds : photo 9972 de l'échantillon 2009-sem98 - ES, 300x, 20kv, 150pa -(12b) nombreuses couronnes de tripuhytes qui remplacent (phénomène de pseudomorphose) des sidérites : 348-R2 de l'échantillon LMG348 - BSE, 500x, 20kv, 450pa.



**Figure 33:** (33a) Cristaux idiomorphes de bindheimite analysés par eds : photos 001 (130x) et (33b) photo 002 (340x) de l'échantillon 2010-sem13 - BSE, 20kv.

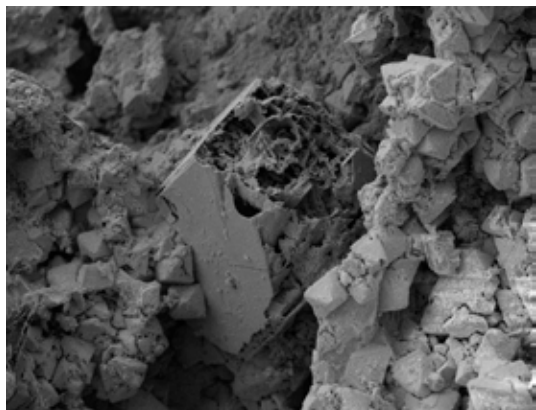
### Schafarzikite, $\text{Fe}^{2+}\text{Sb}^{3+}_2\text{O}_4$

La schafarzikite a été analysée par N. Meisser (Lausanne) en association avec la brandholzite. Elle se présente sous la forme de tout fins vermicules (figure 31). Une autre schafarzikite analysée à l'EDS se présente quant à elle sous la forme de filaments rouges (figure 32).

### Bindheimite, $\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_6(\text{O},\text{OH})$

La bindheimite est un minéral secondaire des zones d'oxydation des minerais de Pb-Sb. Apparemment l'espèce n'est pas adéquatement décrite et serait

sujette à correspondre à l'oxyplumboroméite décrite récemment. La bindheimite étant toujours valide, nous nommerons cette espèce ainsi. Elle a normalement une couleur jaune mais à Goesdorf nous l'avons trouvée sous la forme de cristaux idiomorphes de 200  $\mu\text{m}$  de longueur et de couleur blanc jaune ; ou sont la forme d'aiguilles jaune orange. Les cristaux idiomorphes ont été trouvés dans les échantillons 2010-sem13 (figure 33) et 2009-sem92 (figure 34). Leur spectre EDS montre les éléments Sb-Pb-O. Les aiguilles jaune orange de l'échantillon 2009-sem74 ont été analysées par EDS et vérifiées par diffraction des rayons X en 2016.



**Figure 34:** Cristal partiellement corrodé de bindheimite analysé par eds, avec sénarmontite en avant plan : photo 019 de l'échantillon 2009-sem92 - BSE, 240x, 10kv, 150pa.



**Figure 36:** Rutile avec de nombreuses macles en genoux, photo en lumière réfléchie de l'échantillon LM2007-12 - grossissement 2000x.

### Cetineite, $\text{Na}_{3,6}(\text{Sb}_2\text{O}_3)_3(\text{SbS}_3)(\text{OH})_{0,6} \cdot 2,4\text{H}_2\text{O}$

La cetineite décrite en Italie en 1987 est une espèce assez particulière car il s'agit d'un oxy-sulfure. Cette espèce de couleur rouge jaunâtre se présente sous la forme de boules d'aiguilles. A Goesdorf, cette espèce est extrêmement rare et le MnhnL n'en a qu'un seul échantillon en collection. Nous avons eu l'occasion d'analyser par EDS l'échantillon 2011-sem002 (Na-Sb-S-O) et d'en réaliser une photographie (figure 35).



**Figure 35:** Superbe boule jaune orangée de cetineite de Goesdorf, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,2 mm.

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

Mise en évidence à la microsonde électronique, cette phase se situe au niveau des épontes des filons. On retrouve du rutile dans les échantillons LM2007-12 (G50), LM-2007-10 (G6) et dans la lame LMG349 d filon f2 mais alors dans la gangue de schiste. Un superbe échantillon de rutile maclé (macle en genoux) provenant de l'échantillon LM2007-12 est présenté à la figure 36 à un grossissement de 2000x.

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

Le quartz est le minéral le plus courant de la gangue à Goesdorf. Il est souvent cristallisé de manière palissadique perpendiculairement aux épontes des filons. En 2007, nous signalions deux générations de quartz. La première en cristaux laiteux de 2 à 3 cm, en pyramides hexagonales avec des faces plagiédres, les quartz palissadiques ont probablement cristallisés avant les carbonates et la stibine. La seconde génération en cristaux euhédraux souvent hyalins, est postérieurs ou synchrones à la minéralisation en stibine (figure 37). Certains quartz hyalins peuvent même avoir des inclusions de stibine sous forme de gouttelettes (figure 38).



Figure 37: Quartz hyalin biterminé dans la stibine, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,12 mm.



Figure 38: Quartz hyalin avec des inclusions en 'goutte de stibine' (analysée en section polie), photo G. Niceus, largeur de l'image 3,35 mm.

### Goethite, $\text{FeOOH}$

Ce minéral se trouve en encroutements rougeâtres sur la pyrite.

### Hématite, $\text{Fe}_2\text{O}_3$

Ce minéral a été identifié par diffraction des rayons X et à la microsonde électronique dans des ensembles d'oxydes de Fe-Mn aux épontes de filons altérés. Elle résulte probablement de l'altération des carbonates et d'argiles.

### Todorokite, $(\text{Na,Ca,K,Ba})(\text{Mn,Mg,Al})_6\text{O}_{12}\cdot 3\text{-}4\text{H}_2\text{O}$

Ce minéral a été identifié par diffraction des rayons X dans des ensembles d'oxydes de Fe-Mn aux épontes de filons altérés. Elle résulte probablement de l'altération des carbonates et d'argiles.

### Sulfates

En 2007, nous n'avions signalé aucun sulfate de Sb car ceux-ci ont été trouvés à posteriori dans les échantillons du puits II. Dans nos articles de 2009 (Filella *et al.*, 2009 a et 2009b) nous présentons les proportions relatives entre sulfates de Sb et oxydes de Sb dans les phases secondaires. Nous abordons le sujet des conditions de formation même si dans le détail celle-ci sont mal connues.

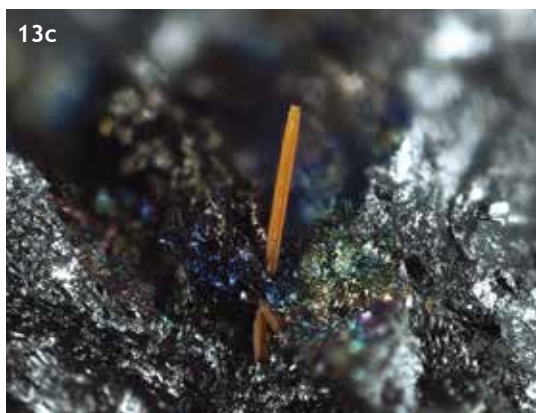
### Klebensbergite, $\text{Sb}_4\text{O}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_2$

La klebensbergite se présente en agrégats ou touffes de fins cristaux aciculaires allongés selon (001) ou aplatis selon (010) pour former des lamelles (Nakai & Appleman, 1980). Ils sont incolores, blancs, blancs jaunâtres et parfois rouges. La planche 13 nous montre la grande variabilité de couleurs de ce minéral. La planche 14 nous permet d'avoir une approche plus en détail sur les terminaisons des cristaux de klebensbergite. Les ensembles de cristaux bien développés tels que présentés ici sont relativement rares.

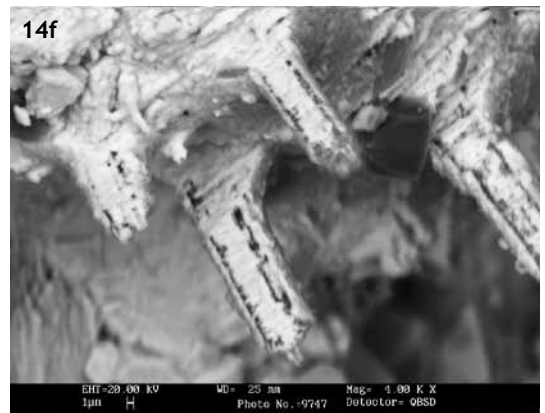
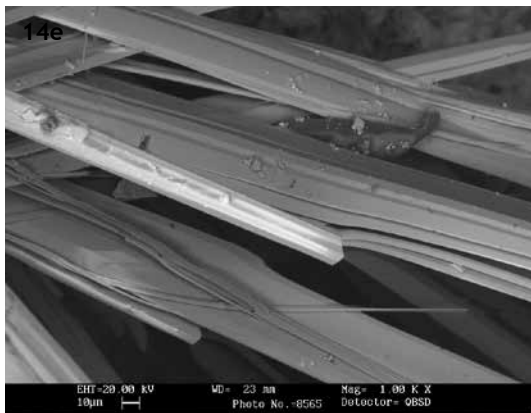
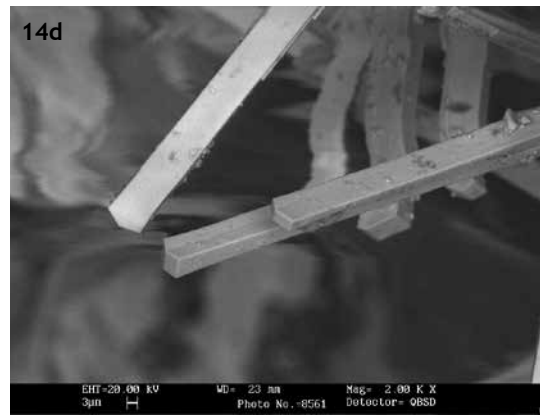
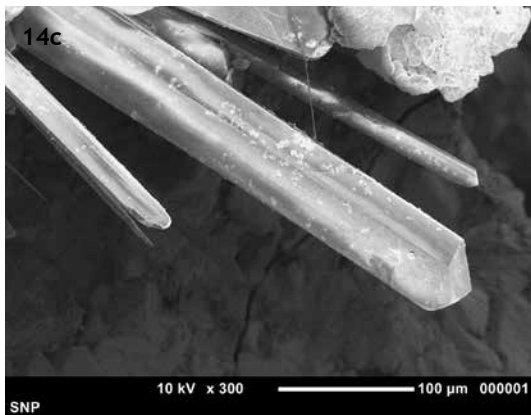
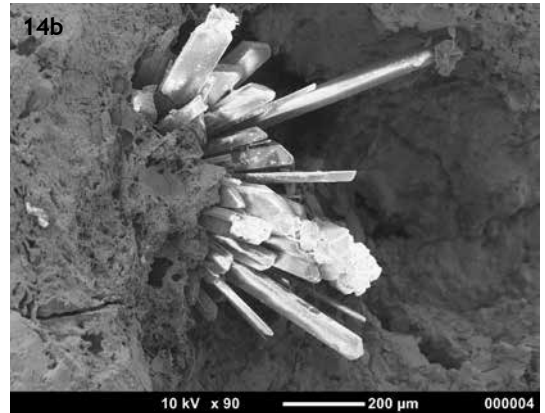
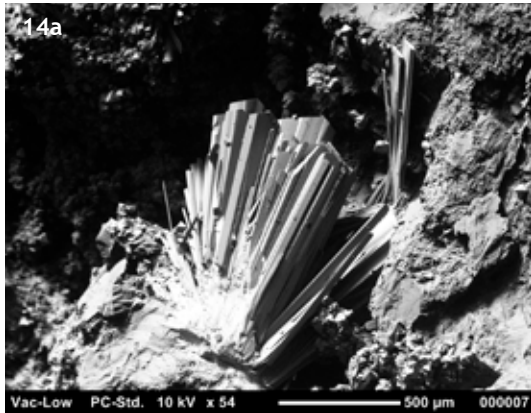


Figure 39: Boule blanche de coquandite formée de très fins cristaux dont certains sont beaucoup plus long, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,40 mm.

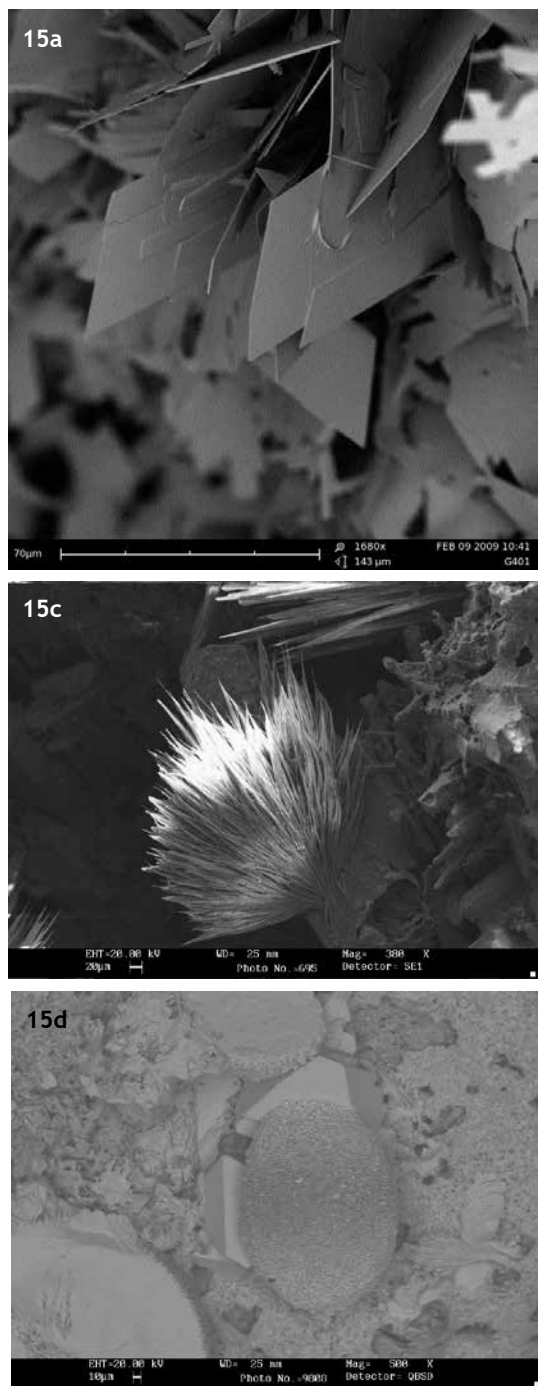




**Planche 13:** Différentes formes et couleurs de la klebelsbergite de Goesdorf - (13a) cristaux aciculaires de klebelsbergite accolés, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,2 mm - (13b) ensemble de cristaux aciculaires blancs de klebelsbergite dans une géode de coquandite, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,5 mm - (13c) cristal aciculaire isolé orange de klebelsbergite sur un sulfosel de Pb-Sb, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,8 mm - (13d) ensemble de cristaux aciculaires incolores et transparents de klebelsbergite dans une géode de carbonates, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,41 mm - (13e) aiguilles de klebelsbergite rouge avec des valentinites rouges, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,50 mm.



**Planche 14:** La klebsbergite de Goesdorf vue au MEB - (14a) cristaux parfaitement terminés de klebsbergite en gerbe analysés par eds : photo 07 de l'échantillon 2011-sem18 - BSE, 54x, 10kv - (14b) cristaux parfaitement terminés de klebsbergite en gerbe analysés par eds : photo 04 de l'échantillon 2011-sem29 - BSE, 90x, 10kv - (14c) zoom sur un des cristaux de la photo 14b montrant la terminaison : photo 01 de l'échantillon 2011-sem29 - BSE, 300x, 10kv - (14d) vue de détail de cristaux de klebsbergite : photo 8561 de l'échantillon 2009-sem30 - BSE, 2000x, 20kv, 450pa - (14e) vue de détail de cristaux de klebsbergite : photo 8565 de l'échantillon 2009-sem28 - BSE, 1000x, 20kv, 450pa - (14f) vue de détail de cristaux de klebsbergite rouge : photo 9747 de l'échantillon 2009-sem52 - BSE, 400x, 20kv, 450pa.



15b

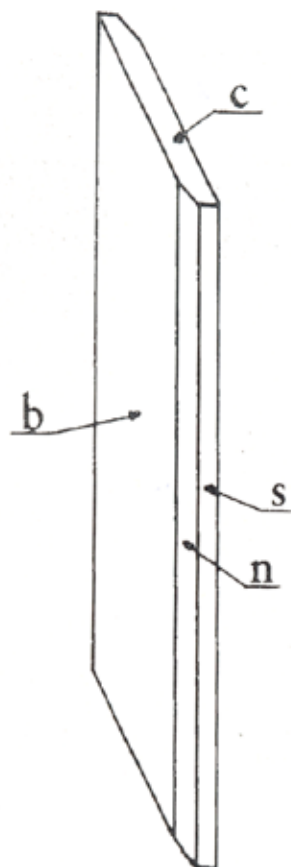


FIG. 2. Typical habit of a coquandite crystal from Pereta. Forms are:  $b$  {010},  $c$  {001},  $s$  {2 $\bar{1}$ 0},  $n$  {1, $\bar{2}$ ,0}.

Planche 15: La coquandite de Goesdorf vue au MEB (15a) cristaux parfaitement formés en lamelles très fines de coquandite : photo G401\_5b de l'échantillon 2009-sem16 - BSE, 1680x, 10kv - (15b) dessin de l'habitus typique de la coquandite de Pereta selon Sabelli et al., 1992 - (15c) boule incomplète d'aiguilles de coquandite analysées à l'eds : photo 695 de l'échantillon 2010-sem33 - SE, 380x, 20kv - (15d) boule de coquandite analysée sur cristal de sénarmontite : photo 9808 de l'échantillon 2009-sem66 - BSE, 500x, 20kv, 450pa.



**Figure 40:** Or natif en plaquage associé à la stibine et au quartz (échantillon 2012-sem06), photo G. Niceus, largeur de l'image 2,12 mm.

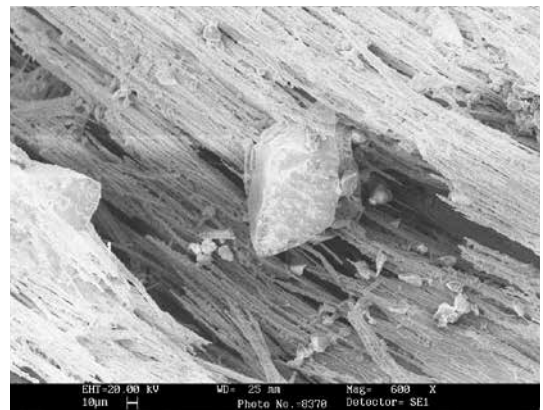
### Coquandite, $Sb_{6+x}O_{8+x}(SO_4)_x(OH)_x(H_2O)_{1-x}$ ( $x=0,3$ )

La coquandite se présente en touffes de très fins cristaux blancs aciculaires formant des tapis ou des boules (figure 39). Si nous allons dans le détail de l'observation de la morphologie de cette espèce, la photo 15a de la planche 15 correspond vraiment bien à l'habitus typique (lamelles très fines) de la coquandite de Pereta présenté dans la publication de Sabelli *et al.* (1992). Cet habitus est présenté à la planche 15 également (photo 15b). Les autres photos de la planche 15 (15c et 15d) présentent cette forme en boule composées de micro-aiguilles.

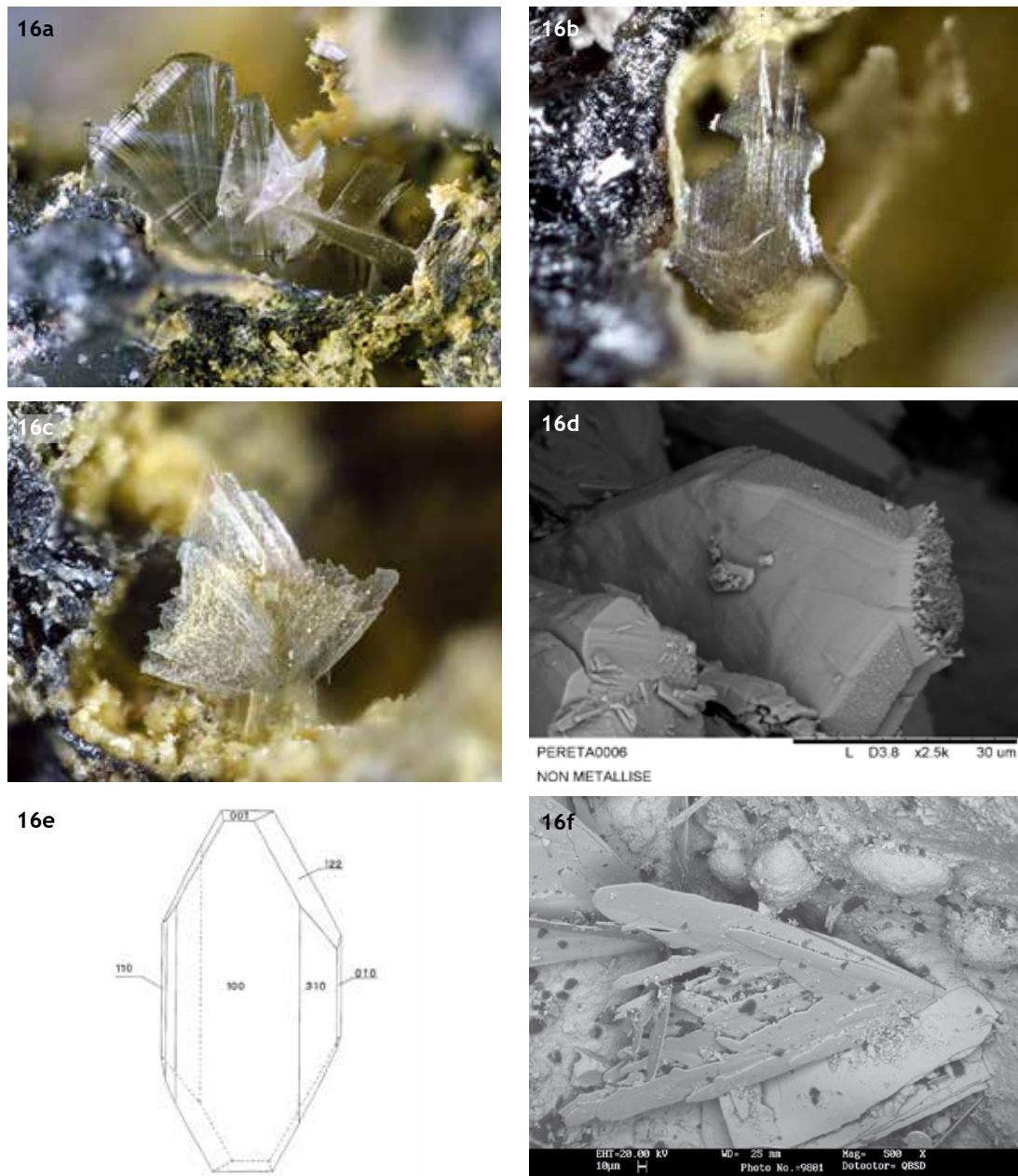
### Peretaite, $Ca(SbO)_4(SO_4)_2(OH)_2 \cdot 2H_2O$

Ce minéral est observé dans les zones de minerai plus riche en carbonates. Il se présente sous la forme de fines lamelles. Selon Cipriani *et al.* (1980a et b), la peretaite est pratiquement toujours maclée selon (100). Nos observations au MEB tendent à aller dans le même sens. Ces observations nous

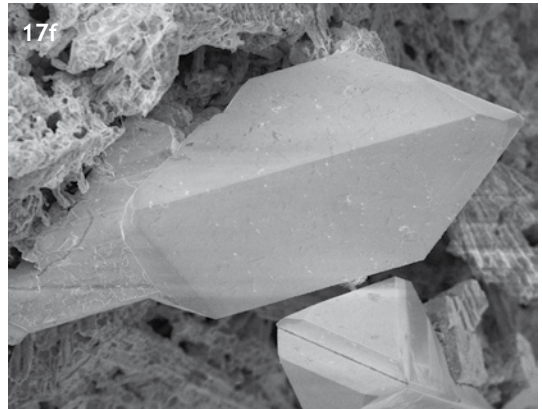
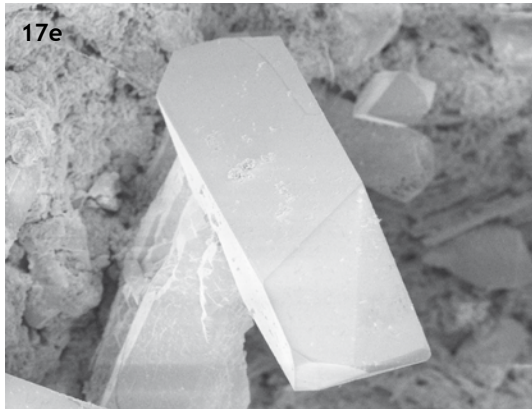
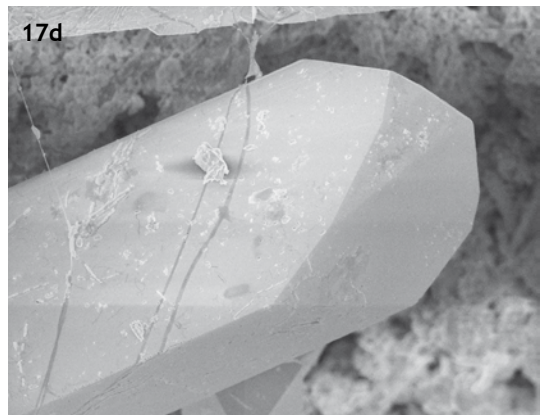
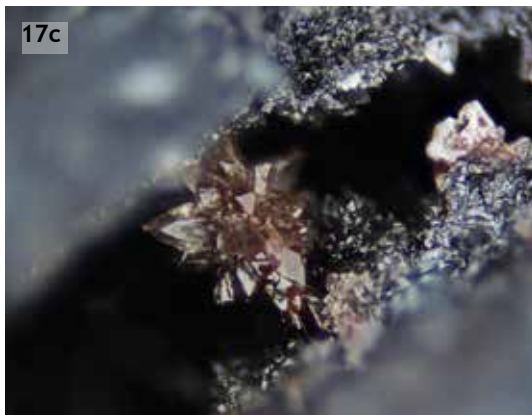
ont permis également de montrer que l'habitus décrit par Menchetti *et al.* (1980) (figure 3) est le plus représenté à Goesdorf. La planche 16 montre clairement ces observations optiques et au MEB.



**Figure 41:** Cristal pseudo rhomboédrique d'antimoine natif sur des aiguilles parallèles de sulfosels de Pb-Sb; photo 8370 de l'échantillon 2009-sem26 - ES, 600x, 20kv, 150pa.



**Planche 16:** La peretaite de Goesdorf vue en optique et au MEB - (16a) lamelles nacrées transparentes (maclées ?) de peretaite, photo G. Niceus, largeur de l'image 3,0 mm - (16b) lamelles nacrées transparentes présentant un effet de dentelle ou de tissage, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,8 mm - (16c) ensemble de lamelles nacrées, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,6 mm - (16d) vue de détail d'un cristal de peretaite présentant l'habitus le plus courant, cf. 16e : photo 06 de l'échantillon 2009-sem17 - BSE, 2500x, 15kv, 672pa - (16e) dessin de l'un des habitus typiques de la peretaite de Pereta selon Manchelli *et al.*, 1980 - (16f) cristaux maclés de peretaite : photo 9801 de l'échantillon 2009-sem60 - BSE, 500x, 20kv, 450pa.



**Planche 17:** L'anglesite de Goesdorf vue en optique et au MEB. (17a) cristaux d'anglesite en tablettes transparents sur les bords, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,41 mm - (17b) cristaux biterminés transparents d'anglesite, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,23 mm - (17c) druse de cristaux brunâtres d'anglesite, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,50 mm - (17d) vue de détail d'un cristal d'anglesite; photo 02 de l'échantillon 2011-sem28 - BSE, 600x, 10kv - (17e) vue d'un cristal parfait d'anglesite; photo 04 de l'échantillon 2011-sem28 - BSE, 440x, 10kv - (17f) vue d'un cristal parfait d'anglesite montrant un troisième habitus : photo 06 de l'échantillon 2011-sem28 - BSE, 540x, 10kv.

## Anglésite, $PbSO_4$

L'anglésite se trouve en association des minéralisations en Pb-Sb. A la microsonde électronique, nous l'avons observée dans l'échantillon LMG351 provenant du filon f3. Plusieurs photos optiques montrent des cristaux bien développés transparents, blancs ou brunâtres en tablettes épaisses. Au MEB, c'est l'échantillon 2011-sem28 qui nous a permis de voir les plus belles variations de formes pour cette espèce. La planche 17 montre ces observations tant en optique qu'au MEB.

## Gypse, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$

Le gypse n'est pas un minéral très fréquent à Goesdorf. En général, il est le résultat de la décomposition de sulfures en présence de carbonates de calcium. Nous l'avons principalement observé associé à l'altération de la pyrite sous la forme de cristaux en tablettes de 2 à 3 mm de long. La forme des cristaux est tout à fait classique. Nous n'avons eu l'occasion d'observer le gypse qu'une seule fois en association avec la stibine. La photo de cet échantillon a été présentée à la planche 1 (photo 1e). Enfin, tout au fond de la galerie d'exhaure, au pied du puits d'extraction principale, une mylonite extrêmement riche en gypse a été observée. Malheureusement plus aucun sulfure n'a pu être distingué dans ces échantillons.

## Éléments

### Or, Au

Dans notre publication de 2007, nous signalions que dans les collections du musée, un échantillon de stibiconite sur quartz présentait des traces d'or. Cet échantillon est noté comme ayant été trouvé en 1893 à l'époque des travaux dans la mine par Westhofen (Filippo & Hanson, 2007). Depuis lors, un seul échantillon présentant un très fin plaquage d'or a pu être observé et analysé à l'EDS (échantillon 2012-sem06). Sur cet échantillon, l'or est associé à la stibine dans une matrice de quartz (figure 40).

### Antimoine, Sb

Nous n'avons eu l'occasion d'observer et d'analyser un cristal d'antimoine natif qu'une seule fois.



**Figure 42:** Lamelles brunâtres ondulantes (rhomboédres) de sidérite dans le quartz, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,0 mm.

Il avait une forme de cristal pseudo-rhomboédrique d'un peu plus de 100  $\mu\text{m}$  associé à des sulfosels de Pb-Sb (figure 41).

### Soufre, S

Le soufre est régulièrement associé avec la valentinite et la sénarmontite. Il se présente en cristaux transparents ou jaunes dépassant rarement 0,2 mm de longueur. Il forme des cristaux bien terminés, des cristaux squelettiques (faces creuses liées à une croissance rapide), et montre parfois des formes atypiques comme des aiguilles. La planche 18 montre ces observations tant en optique qu'au MEB.

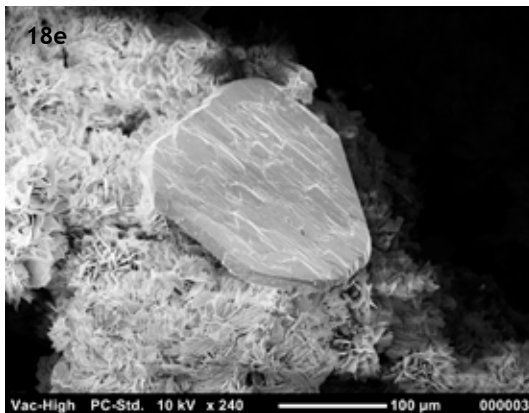
## Phosphates

### Apatite, $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$

L'apatite a été observée (une seule fois), et analysée à l'EDS, dans les épontes de filon (échantillon LMG349, filon f2) associée à la chlorite dans une matrice de quartz, pyrite et carbonates.

### Pyromorphite, $Pb_5(PO_4)_3Cl$

La pyromorphite a été observée (une seule fois), et analysée à l'EDS, sous la forme de cristaux blancs verdâtres aciculaires dans l'échantillon 2009-sem96. Elle était associée à des sulfosels de Pb-Sb.



**Planche 18:** Le soufre de Goesdorf vue en optique et au MEB. (18a) gros cristal de soufre jaunâtre bien cristallisé, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,0 mm - (18b) ensemble de cristaux jaunes clair montrant des formes bien développées, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,12 mm - (18c) ensemble de cristaux de soufre bien cristallisés, photo G. Niceus, largeur de l'image 2,50 mm - (18d) cristal de soufre en aiguille tordue: photo 9737 de l'échantillon 2009-sem50 - BSE, 300x, 20kv, 450pa - (18e) cristal aplati de soufre associé avec la coquandite (association extrêmement rare): photo 03 de l'échantillon 2010-sem010 - BSE, 240x, 10kv.



## Carbonates

La gangue carbonatée est composée de plusieurs carbonates de Mg-Fe et de calcite. Ces phases ont été vérifiées par diffraction des rayons X (ankérite, calcite, dolomite et sidérite) et par microsonde électronique (dolomite et sidérite).

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

Elle se présente en scalénoèdres ou rhomboèdres de couleur jaune. C'est un minéral important de la gangue qui remplit les cavités de quartz.

### Sidérite, $\text{FeCO}_3$

C'est le carbonate de Fe-Mg le plus courant. Il se présente sous la forme de rhomboèdres à surface ondulante de couleur brunâtre (figure 42). On le retrouve associé aux autres carbonates de Fe-Mg et à la calcite dans le quartz.

### Dolomite, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

Elle se présente en cristaux blanchâtres et est associée à la sidérite et l'ankérite.

### Ankérite, $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})(\text{CO}_3)_2$

Elle se présente en tout petits cristaux, dont l'identification a été confirmée par diffraction des rayons X.



**Figure 43:** Cristal bien formé de zircon dans la roche encaissante dans l'échantillon LM20017-12 (G50), vue au microscope pétrographique, grossissement 100x.



**Figure 44:** Cristal bien formé de zircon dans le minéral de stibine dans l'échantillon LMG349 (filon f2), vue au microscope pétrographique en lumière naturelle, grossissement 320x.

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

La malachite se présente en encroutements de couleur verte. Nous l'avons vérifiée par EDS et diffraction des rayons X. C'est la phase d'altération de la chalcopyrite et parfois de la chalcostibite.

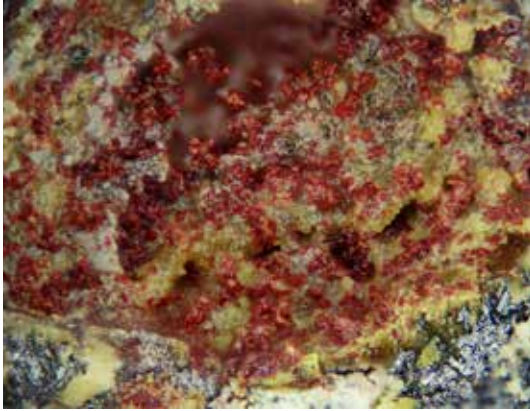
## Silicates

### Zircon, $\text{ZrSiO}_4$

Le zircon a été observé plusieurs fois dans les lames polies. Il est facilement reconnaissable par sa cathodoluminescence induite par le faisceau d'électrons. Nous avons néanmoins procédé à chaque fois à une analyse EDS. Nous l'avons localisée dans la roche aux épontes du minéral (figure 43) ainsi qu'au milieu du minéral de stibine (figure 44).

### Chlorite (clinocllore) $(\text{Mg,Fe})_5\text{Al}(\text{Si,Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

Le clinocllore se présente sous la forme d'agrégats microscopiques en forme de sphéroïde. On le trouve principalement dans les zones d'éponte. Nous l'avons signalé ci-dessus en association avec l'apatite. Ce minéral a été vérifié par EDS et diffraction des rayons X.



**Figure 45:** Superbe échantillon de cristaux rouges non identifiables de manière certaine, photo G. Niceus, largeur de l'image 1,6 mm.

### Illite, $K_{0,65}Al_2[Al_{0,65}Si_{3,35}O_{10}(OH)_2]$

Cette argile que l'on retrouve aux zones d'épontes (salbandes) a été identifiée par diffraction des rayons X. Son contenu en éléments en trace a été publié en 2007 (Filippo et Hanson, 2007). Nous le reprenons ci-dessous : Cr 0,015% ; Ni 0,007% ; Rb 0,015% ; Sr 0,015% ; Zr 0,03% ; Ba 0,04% ; La 0,01% et Ce 0,02%.

### Kaolinite, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$

La kaolinite, apparemment sa variété dickite (mais sans plus de précision) a été analysé par diffraction des rayons X.

### Calcédoine, $SiO_2 \cdot nH_2O$

Des zones de silice amorphe ont été vérifiées par EDS. Elles sont souvent incolores et mamelonnées.

## Indéterminés

### Indéterminé 1 : autre phase d'altération de la chalcostibite

Nous avons vu ci-dessus lors de la description de la chalcostibite que la problématique de la phase d'altération de la chalcostibite n'est pas nouvelle. Nous avons pu identifier à ce jour au moins deux phases d'altération, mais il reste des questions sur d'autres.

La première phase d'altération de la chalcostibite est la chalcostibite, notamment sur l'échantillon 2016-sem20.

Les analyses EDS de l'échantillon 2009-sem12 montrent un carbonate de cuivre, fort probablement la malachite pour la seconde.

Les questions qui restent en suspens sont les suivantes :

dans le diffractogramme de poudres de l'échantillon 2016-sem20, il reste des pics non identifiés à 11,72 Å et 7,95Å

les échantillons 2009-sem87 et 2009-sem09 montrent des analyses EDS donnant Cu-Sb-O ce qui pourrait correspondre à la partzite  $Cu_2Sb_2(O,OH)_7$ . Néanmoins le diffractogramme de poudres de rayons X du 2009-sem87 ne fournit que 2 pics formellement identifiables à celle-ci... les autres n'ayant pas encore pu être indexés.

Nous aimerions aller plus loin dans cette étude, Malheureusement nous n'avons plus en collection de chalcostibites sur lesquelles nous puissions faire de nouveaux prélèvements.

### Indéterminé 2 : autre phase d'altération rouge

Les phases d'altération rouge de la stibine sont également problématiques et à étudier au cas par cas. Nous avons vu des valentinites rouges, des klebelsbergites rouges... certains échantillons sont identifiés comme kermesite, d'autres comme metastibine... Toutes ces espèces ayant été



**Figure 46:** Cristal en plaquette de 300 µm non identifié: photo 140 de l'échantillon 2016-sem41 - ES, 170x, 15kv.

vérifiées par EDS et par diffraction des rayons X ; elles sont valides.

Il nous reste cependant certains cas avec des échantillons fort bien cristallisés et pour lesquels aucune des déterminations reprises ci-dessous ne correspondent. C'est le cas des cristaux de la figure 45, les analyses tendent à les qualifier de kermesite (EDS : Sb-S-O) mais le diffractogramme de poudres ne correspond à rien.

### Indéterminé 3

L'échantillon 2016-sem41 fourni un cristal en plaquette bien cristallisé et transparent de 300 µm de longueur (figure 46). Les analyses EDS fournissent les éléments suivants : Sb-S-O-Al. Nous avons également obtenu un très bon diffractogramme de poudres que nous n'arrivons pas à indexer. Voici les valeurs  $d$  et les intensités de ce diffractogramme :

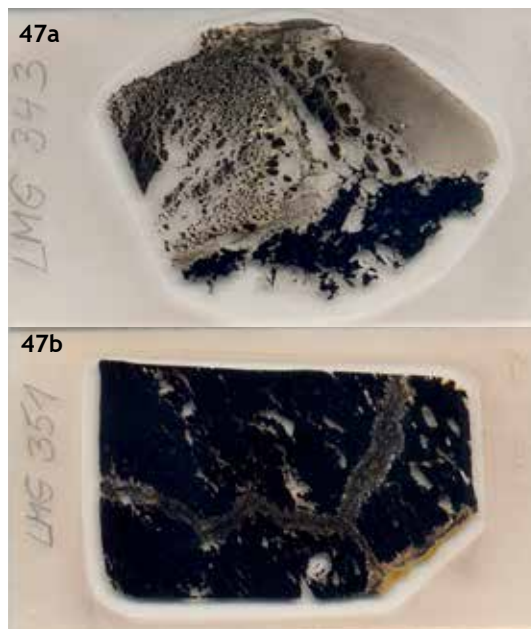
8,08 (5) – 5,00 (6) – 4,26 (10) – 3,81 (8) – 3,33 (9) – 2,99 (6) – 2,71 (5) – 2,20 (3) – 2,15 (3) – 2,04 (5) – 1,88 (2) – 1,79 (2) – 1,70 (2) – 1,62 (3) – 1,49 (2) Å

## Métallogénie

Dans notre chapitre lié au nouvel échantillonnage, nous avons vu que le puits II nous avait permis d'accéder à des filons directement en place. Ils sont au nombre de cinq. Les échantillons prélevés ont été étudiés en lames minces et à la microsonde électronique. Le filon f1a est composé de pyrite, stibine et berthièrite. Le filon f1b est composé de pyrite uniquement. Le filon f2 est composé de pyrite, stibine, sphalérite, berthièrite, jamesonite, chalcoppyrite, ullmannite. Le filon f3 est composé de stibine, sphalérite et fülöppite. Le filon f3b est composé de stibine et sphalérite. Le filon f4 est composé de stibine et chalcoppyrite. Le filon f5 est composé de pyrite, stibine, sphalérite, chalcoppyrite et berthièrite. Et la jonction des filons f5 et f1 est composée de pyrite, stibine et sphalérite. Aucun de ces filons ne contient de chalcostibine. L'ensemble de ces données a été compilé sur le schéma de la figure 3 et présenté à la figure 48. En synthétisant les métaux exprimés dans cette minéralogie, nous voyons également que les filons f2 et f3 sont constitués de Sb, Zn et Pb. Le filon f2 contient en plus du Fe, Cu et Ni. Le filon f4 uniquement Sb et Cu ; f5 contient Sb, Zn, Fe et Cu et

f1 uniquement Sb et Fe. Seul le filon f1 exprime donc une minéralogie simple à antimoine et pyrite.

L'analyse des deux photos de lames minces présentées à la figure 47 nous apprend énormément sur la manière dont ces minéraux sont répartis en interne. La lame LMG343 (figure 47a) montre une pyrite au contact avec la roche encaissante schisteuse. Cette pyrite est très fortement fracturée. Nous pouvons même redessiner les lignes de fissuration de celle-ci. La minéralisation sous la fracture principale est composée de minéraux de Sb, Fe et Cu (stibine avec berthièrite). Nous pouvons donc en déduire que la minéralisation en pyrite a été fracturée et qu'un fluide antimonifère a déposé de la stibine massive et que la réaction avec le Fe des pyrites a formé la berthièrite. La lame LMG351 (figure 47b) est composée essentiellement de stibine et de quartz. Nous voyons clairement des fissures sinueuses à travers celle-ci. Ces fissures sont remplies de sulfosels de Pb-Sb (fülöppite) et de sphalérite. Nous pouvons donc en déduire que la minéralisation en stibine a été fracturée et qu'un fluide plombifère et zincifère a permis de former cette nouvelle minéralogie.



**Figure 47:** (47a) lame mince LMG343 : pyrite fracturée et minéralisation en stibine et berthièrite - (47b) lame mince LMG351 : minéralisation en stibine fracturée et reminéralisée en fülöppite et sphalérite.

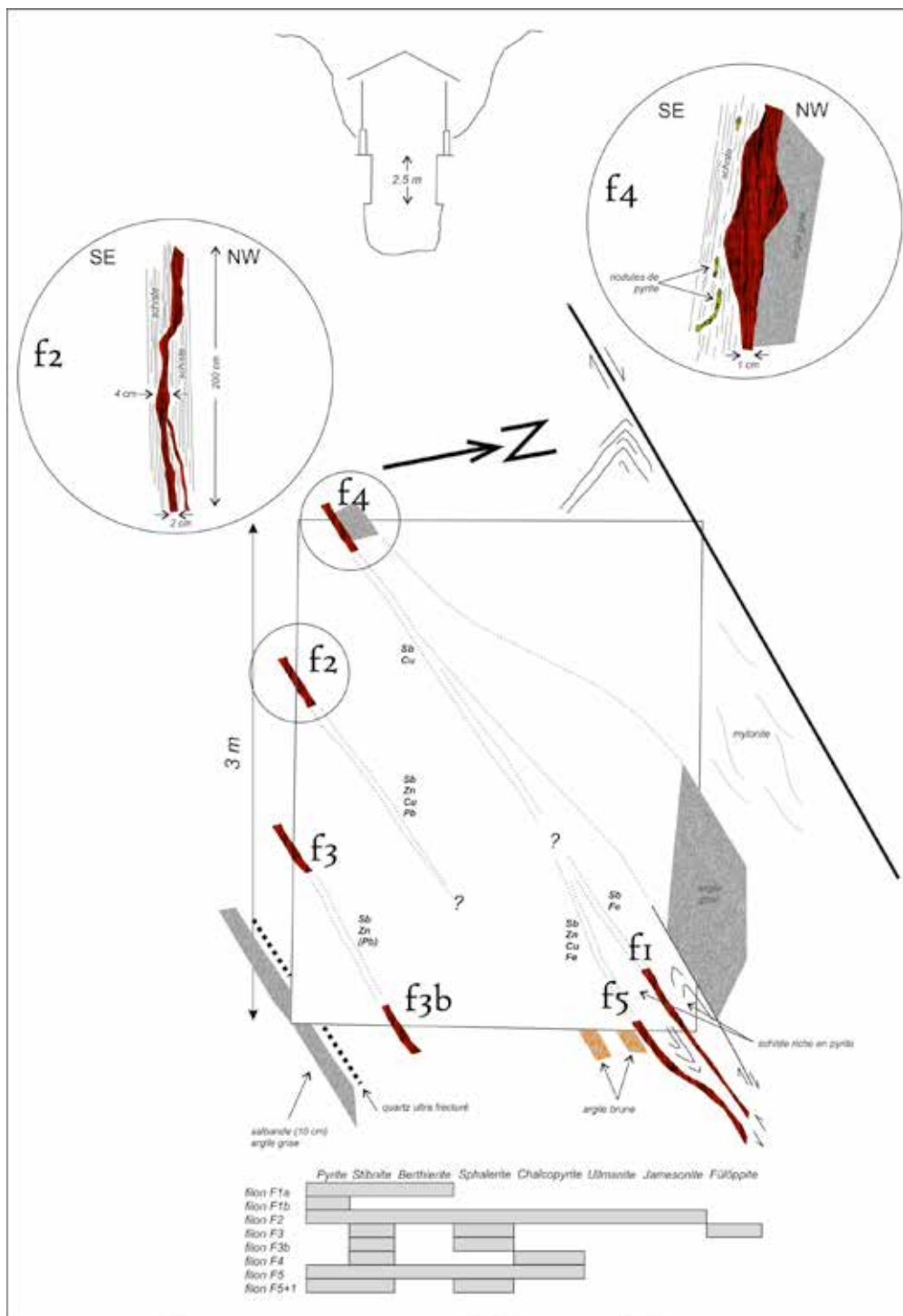


Figure 48: Schéma du puits II avec représentation des différents filons, des failles et des salbandes ; croquis des filons f2 et f4 - compilation des minéraux déterminés par filons et des éléments analysés pour chacun d'eux.

Ces observations nous permettent de penser que les premiers filons mis en place à Goesdorf sont des filons de pyrite uniquement (semblables au filon f1b). Ces filons ont été fissurés et la minéralisation en antimoine s'est alors mise en place. Cette minéralisation s'exprime essentiellement sous forme de stibine avec des traces de berthiërite. Cette minéralisation a été fissurée à son tour et des fluides plombifères ont réagis avec la stibine pour former la série de sulfosels de Pb-Sb que nous avons décrits. Il s'agit donc d'un phénomène de surimposition : un événement à Pb qui remanie celui à Sb. Comme la sphalérite est pauvre en Fe, on peut penser que fort probablement, selon Yves Moëlo (comm. pers.), Zn est contemporain de Pb. La réaction de Cu sur la berthiërite formant de la chalcopyrite ou de la chalcostibite est un événement appelé 'chalcopyrite disease'. C'est la mise en solution plus ou moins forte de Fe qui détermine si l'on forme la chalcopyrite ou la chalcostibite. Il s'agit donc d'un événement Pb-Zn-Cu et Ni (ullmannite) qui est probablement épithermal. C'est lors de cet événement que la stibine secondaire (de néoformation) se forme également.

Il est intéressant à noter pour cet événement du Pb qui remanie le Sb que les sulfosels que nous avons observés précipitent systématiquement dans un ordre du rapport Pb/Sb croissant en se remplaçant mutuellement (Kosakevitch & Moëlo, 1982). Selon les mêmes auteurs, le long des fissures ouvertes le maintien d'une concentration élevée en Pb est propice au développement de cette séquence de sulfosels à Pb/Sb croissant. Au contraire, dans les réseaux fissures de la stibine massive, le rapport Pb/Sb se maintient à des valeurs basses. C'est bien ce que nous avons observés dans la lame LMG351 avec le développement exclusif de la fülöppite.

En résumé, nous avons donc à Goesdorf trois stades de minéralisation :

stade 1 : ferro-arsénifère (pyrite riche en As (cf figure 7) et gangue de quartz)

stade 2 : antimonifère (stibine et gangue de quartz)

stade 3 : événement à Pb, Zn, Cu (Ni) (sulfosels de Pb-Sb, sphalérite, chalcopyrite, chalcostibite, ullmannite)

D'autres minéralisations semblables à celle de Goesdorf sont connues, notamment, en Allemagne à Ahrbruck, Altenhar et St Johann dans l'Eifel (Wagner & Cook, 2000) ou encore Wolfsberg

dans le Harz ; en France à Bournac dans l'Hérault (Munoz & Moëlo, 1982), à Lepuix-Gy dans les Vosges (Marcoux & Moëlo, 1991) ou encore à Beg ar Galez dans le Finistère (Chauris *et al*, 1977). Toutes ces minéralisations sont mises en place dans des terrains hercyniens.

Dans le socle hercynien du massif schisteux rhéan, Wagner & Cook (2000) concluent sur la mise en place des minéralisations à quartz-stibine dans des phases tardives postérieures au paroxysme du cycle de plissement hercynien, épisode qui correspond à une phase d'extension sans liaison flagrante avec des phénomènes magmatiques. La mise en place lors de la phase d'extension a l'avantage d'expliquer la localisation des minéralisations en quartz-stibine dans les structures ouvertes, faillées et fracturées comme c'est le cas également à Goesdorf. L'étude des gisements les plus proches en Eifel (Ahrbruck, Altenhar et St Johann) montre l'importance de ces structures pour la mine en place des minéralisations, le métallotecte (Wagner & Cook, 2000 ; Wagner & Schneider, 2002 et Wagner & Boyce, 2003).

Les minéralisations en antimoine de type veines du massif schisteux rhéan sont décrites dans plusieurs articles de Wagner (2000, 2002 et 2003). Il précise qu'il existe d'une part un système de veines d'extension minéralisées en quartz et stibine et d'autre part, un assemblage de sulfosels (Cu)-Pb-Sb en surimposition d'un système de veines Pb-Zn préexistant. A Goesdorf, la surimposition des sulfosels se fait directement sur les veines à quartz et stibine. Par contre, les processus décrits pour Lepuix-Gy dans les Vosges (Marcoux & Moëlo, 1991) correspondent quasi à l'identique avec ceux que nous avons vu à Goesdorf.

Une étude complète des paléofluides des minéralisations luxembourgeoises, incluant bien sûr la minéralisation de Goesdorf, est en cours. Les données relatives aux inclusions fluides et les conclusions locales et régionales sont en cours de rédaction. Nous avons par cette étude essayé de répondre aux questions relatives à l'origine des fluides minéralisateurs posées dans les conclusions du Ferrantia 49 relatif à la minéralisation de Goesdorf (Filippo & Hanson, 2007).

## Bibliographie

- Bakker R. & Kolitsch U. 2010. Weltweit drittes Vorkommen von Brandholzit : Die Antimon-Grube von Goesdorf in Luxembourg, *Lapis* 30 : 43-45.
- Buzatu A., Damian G., Dill H.G. & Apopei A.I. 2015. Mineralogy and geochemistry of sulfosalts from Baia Sprie ore deposit (Romania) - New bismuth minerals occurrence. *Ore Geology Reviews* 65(1):132-147.
- Chauris L., Fouquet Y. & Moëlo Y. 1977. Les occurrences antimonifères de l'île de Sein et du Cap Sizun (Finistère). Leur place dans la métallogénie armoricaine. *Bull. Soc. fr. Minéral. Cristallogr.* 100 : 208-213.
- Cipriani N, Menchetti S, Orlandi P, Sabelli C. 1980a. Peretaite,  $\text{CaSb}_4\text{O}_4(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , a new mineral from Pereta, Tuscany, Italy. *Am. Mineral.* 65: 936-9.
- Cipriani N, Menchetti S, Sabelli C. 1980b. Klebelsbergite and another antimony mineral from Pereta, Tuscany, Italy. *Neues Jahrb. Mineral. Monatsh.* 223-229.
- Filella M., Chanudet V., Filippo S. & Quentel F. 2009a. Particle size and mineralogical composition of inorganic colloids in waters draining the adit of an abandoned mine, Goesdorf, Luxembourg, *Applied Geochemistry* 24(1): 52-61.
- Filella M., Filippo S., Belzile N., Chen Y-W. & Quentel, F. 2009b. Natural attenuation processes applying to antimony: a study in the abandoned antimony mine in Goesdorf, Luxembourg, *Science of the Total Environment* 407 : 6205-6216.
- Friedrich A, Wildner M, Tillmanns E, Merz PL. 2000. Crystal chemistry of the new mineral brandholzite,  $\text{M}^{2+}(\text{H}_2\text{O})_6[\text{Sb}(\text{OH})_6]_2$ , and of the synthetic analogues  $\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_6[\text{Sb}(\text{OH})_6]_2$  ( $\text{M}^{2+}=\text{Mg}, \text{Co}$ ). *American Mineralogist* 85: 593-599.
- Heinen G. & Kronz G. 1993. Die Mineralien des Oeslings. Numéros hors-série de l'AGMP 1, 19 p.
- Kosakevitch A. & Moëlo Y. 1982. Le plomb dans les gisements d'antimoine du Maroc central : expression minéralogique, type paragénetique, signification géochimique. *Chronique de la recherche minière* 467 : 5-33.
- Lucius M. 1948. Les gîtes métallifères de l'Oesling, Extrait de la revue technique, 4/48, 41 p.
- Marcoux E. & Moëlo Y. 1991. Lead Isotope Geochemistry and Paragenetic Study of Inheritance Phenomena in Metallogenesis : Examples from Base Metal Sulfide Deposits in France. *Economic Geology* 86 : 106-120.
- Menchetti S. & Sabelli C. 1980. Peretaite,  $\text{CaSb}_4\text{O}_4(\text{OH})_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  : its atomic arrangement and twinning. *American Mineralogist* 65 : 940-946.
- Moëlo Y. 1988. Contributions à l'étude des conditions naturelles de formation des sulfures complexes d'antimoine et de plomb (sulfosels de Pb/Sb). Signification métallogénique, Documents du BRGM 55 : 1-204.
- Munoz M. & Moëlo Y. 1982. Etude paragénetique de la minéralisation sulfurée complexe (Sb-Pb-Zn...) de Bournac (Hérault, France). *Bull. Mineral.* 105 : 625-632.
- Nakai I. & Appleman D.E. 1980. Klebelsbergite,  $\text{Sb}_4\text{O}_4(\text{OH})\text{SO}_4$ : redefinition and synthesis. *American Mineralogist* 65 : 499-505.
- Orlandi P. 1984. Segnalazione di nuove specie mineralogiche in località italiane [peretaite, klebelsbergite a Micciano—PI]. *Riv. Mineral. Ital.* 8: 33-40.
- Filippo S. & Hanson A. 2007. La Minéralisation en antimoine de Goesdorf: 111-146, in Filippo S. (eds), *Inventaire minéralogique du Luxembourg: Stolzembourg, Schimpach, Goesdorf*. Ferrantia 49, Musée national d'histoire naturelle, Luxembourg, 152 p.
- Ramdohr P. 1955. Die Erzminerale und ihre verwachsungen. Akademie-Verlag, Berlin, 875 p.
- Ramdohr P. 1980. The ore minerals and their intergrowths. 2 volumes. Pergamon Press, 1205 p.
- Robinson G.W. & Normand C. 1996. The Lac Nicolet antimony mine, South Ham, Quebec. *The Mineralogical Record* 27: 121-134.
- Sabelli C, Orlandi P, Vezzalini G. 1992. Coquandite,  $\text{Sb}_6\text{O}_8(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , a new mineral from Pereta, Tuscany, Italy, and two other localities. *Mineral Mag.* 56: 599-603.

- Sarp H, Perroud P, Deferne J. 1983. Présence de peretaite,  $\text{CaSb}_4\text{O}_4(\text{OH})_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , dans la mine de Cetine (Toscane, Italie). *Archives des Sciences Genève* 36: 345–347.
- Sejkora J, Ozdín D, Vitáloš J, Tuček P, Čejka J, Ďuďa R. 2007. Schafarzikite from the type locality Pernek (Malé Karpaty Mountains, Slovak Republic) revisited. *Eur. J. Mineral.* 19: 419–427.
- Wagner T. & Cook NJ. 2000. Late-Variscan antimony mineralisation in the Rheinisches Schiefergebirge, NW Germany: evidence for stibine precipitation by drastic cooling of high-temperature fluid systems. *Mineralium Deposita* 35: 206–222.
- Wagner T. & Schneider J. 2002. Lead isotope systematics of vein-type antimony mineralization, Rheinisches Schiefergebirge, Germany: a case history of complex reaction and remobilization process. *Mineralium Deposita* 37: 185–197.
- Wagner T. & Boyce A.J. 2003. Sulfur isotope geochemistry of black shale-hosted antimony mineralization, Arnsberg, northern Rhenish Massif, Germany: implication for late-stage fluid flow during the Variscan orogeny. *Journal of the Geological Society* 160: 299–308.
- Williams PA. 1990. *Oxide zone geochemistry*. Chichester: Ellis Horwood.

## Annexe

Résultats de l'analyse à la microsonde électronique des sulfures, sulfoels et quelques oxydes de la minéralisation de Goesdorf.



zone	pt	année	wS	wFe	wCo	wNi	wCu	wZn	wAs	wSb	wPb	wTotal	Mineral
<b>THEORIC</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>28,32</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>71,68</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>Stibnite</b>
LM07-19	15	2007	28,241	0,008	0	0	0	0	2,185	71,482	0,131	102,047	Stibnite
LM07-19	16	2007	28,340	0,002	0	0	0	0	2,250	71,267	0,253	102,112	Stibnite
LM07-19	29	2007	28,271	0,034	0	0	0	0	2,192	71,203	0,162	101,862	Stibnite
LM07-19	1	2007	28,237	0,027	0	0	0	0,781	2,259	70,974	0,212	102,490	Stibnite
LM07-19	12	2007	28,353	0,008	0	0	0	2,025	2,214	70,595	0,221	103,416	Stibnite
LM07-19	15	2007	28,138	0,015	0	0	0	0,049	2,203	71,605	0,272	102,282	Stibnite
LM07-19	24	2007	28,582	0,027	0	0	0	0,041	2,226	71,652	0,216	102,744	Stibnite
LM07-19	31	2007	28,317	0,012	0	0	0	0,082	2,072	71,583	0,159	102,225	Stibnite
LM07-19	3	2007	27,978	0,027	0	0	0	0,043	2,068	71,258	0,163	101,537	Stibnite
LM07-17	1	2007	27,918	0,024	0	0	0	0,055	2,147	70,595	0,255	100,994	Stibnite
LM07-17	11	2007	28,277	0,034	0	0	0	0,013	2,278	71,205	0,028	101,835	Stibnite
LM07-17	22	2007	27,896	0,011	0	0	0	0,030	2,175	70,125	1,045	101,282	Stibnite
366//R1	22	2008	27,598	0,006	0,001	0,006	0,084	0,000	2,486	71,666	0,000	101,847	Stibine
366//R2	25	2008	27,423	0,027	0,000	0,000	0,308	0,019	2,441	71,377	0,000	101,595	Stibine
366//R3	26	2008	27,427	0,027	0,048	0,037	0,075	0,009	2,452	71,591	0,000	101,666	Stibine
345//R1	40	2008	27,456	0,000	0,014	0,013	0,025	0,000	2,504	71,214	0,000	101,226	Stibine
<b>THEORIC</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>29,99</b>	<b>13,06</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>56,95</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>Berthierite</b>
LM07-17	7	2007	29,731	12,168	0	0	0	0,038	1,757	56,696	0,166	100,556	Berthierite
LM07-17	8	2007	29,807	12,347	0	0	0	0,051	1,746	56,800	0,159	100,910	Berthierite
LM07-17	9	2007	29,844	12,239	0	0	0	0,075	1,739	56,713	0,186	100,796	Berthierite
LM07-17	10	2007	29,961	12,187	0	0	0	0,023	1,651	56,453	0,246	100,521	Berthierite
345//R1	39	2008	29,117	12,039	0,007	0,313	0,012	0,051	2,061	56,760	0,000	100,360	Berthierite
345//R2	42	2008	29,658	12,103	0,029	0,360	0,010	0,062	2,001	56,891	0,000	101,114	Berthierite
345//R3	45	2008	29,343	11,980	0,020	0,486	0,006	0,000	2,028	57,002	0,000	100,865	Berthierite
345//R5	52	2008	29,268	11,754	0,022	0,314	0,096	0,036	1,997	57,284	0,000	100,771	Berthierite
<b>THEORIC</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>27,71</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>25,47</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>48,81</b>	<b>0</b>	<b>101,99</b>	<b>Chalcostibine</b>
366//R1	21	2008	25,120	0,019	0,006	0,043	24,972	0,005	1,996	49,239	0,000	101,400	Chalcostibine
366//R2	24	2008	25,257	0,071	0,038	0,003	24,832	0,046	1,860	49,228	0,000	101,335	Chalcostibine
<b>THEORIC</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>23,16</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>46,91</b>	<b>29,93</b>	<b>0</b>	<b>Fülöppite</b>
LM07-19	25	2007	23,262	0	0	0	0	0,03	1,161	47,315	29,578	101,346	Fülöppite
LM07-19	26	2007	23,374	0,009	0	0	0	0,047	1,256	46,787	29,881	101,354	Fülöppite
LM07-19	29	2007	23,364	0,009	0	0	0	0,046	1,244	47,767	28,433	100,863	Fülöppite
LM07-19	30	2007	23,387	0	0	0	0	0,301	1,202	47,273	29,653	101,816	Fülöppite
LM07-19	1	2007	23,027	0	0	0	0	0,198	1,245	46,883	29,653	101,006	Fülöppite
LM07-17	2	2007	23,571	0,154	0	0	0	0	1,264	48,480	26,511	99,980	Fülöppite
LM07-17	3	2007	23,242	0,018	0	0	0	0,052	1,224	46,833	29,518	100,887	Fülöppite
LM07-17	4	2007	23,167	0,017	0	0	0	0,032	1,163	46,012	29,968	100,359	Fülöppite
LM07-17	5	2007	23,119	0	0	0	0	0,017	1,147	46,215	29,996	100,494	Fülöppite
LM07-17	6	2007	22,991	0,017	0	0	0	0,022	1,191	46,337	29,703	100,261	Fülöppite
361//R1	2	2008	22,877	0,000	0,000	0,051	0,056	0,350	1,364	46,655	27,868	99,221	Fülöppite
361//R1	5	2008	22,914	0,004	0,000	0,000	0,019	0,021	1,394	46,669	27,573	98,594	Fülöppite
366//R1	23	2008	22,808	0,000	0,027	0,044	0,000	0,050	1,404	47,907	26,646	98,886	Fülöppite
351//R1	30	2008	21,934	0,000	0,024	0,003	0,430	0,174	1,358	44,037	29,991	97,951	Fülöppite
351//R1	31	2008	22,680	0,000	0,035	0,020	0,293	0,116	1,375	44,670	30,712	99,901	Fülöppite
351//R2	32	2008	22,372	0,000	0,015	0,009	0,404	0,011	1,277	44,470	30,614	99,172	Fülöppite
351//R4	36	2008	22,695	0,000	0,002	0,043	0,277	3,775	1,330	44,163	30,950	103,235	Fülöppite

zone	pt	année	wS	wFe	wCo	wNi	wCu	wZn	wAs	wSb	wPb	wTotal	Mineral
345//R4	48	2008	22,851	0,016	0,011	0,020	0,029	0,102	1,380	47,604	26,648	98,661	Fülöppite
345//R6	53	2008	22,826	0,015	0,011	0,001	0,012	0,065	1,427	47,379	26,818	98,554	Fülöppite
345//R6	54	2008	22,662	0,463	0,015	0,017	0,072	0,079	1,375	46,035	27,374	98,092	Fülöppite
<b>THEORIC</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>21,33</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>38,12</b>	<b>40,54</b>	<b>99,99</b>	<b>Plagionite</b>
LM07-19	2	2007	21,795	0	0	0	0	0	1,012	39,260	38,697	100,764	Plagionite
LM07-19	5	2007	21,835	0	0	0	0	0	0,958	39,082	39,605	101,48	Plagionite
LM07-19	6	2007	21,874	0	0	0	0	0	0,977	39,305	38,297	100,453	Plagionite
LM07-19	7	2007	21,721	0	0	0	0	0	0,914	38,882	39,073	100,59	Plagionite
LM07-19	11	2007	21,693	0	0	0	0	0	1,048	38,212	39,751	100,704	Plagionite
LM07-19	12	2007	21,815	0	0	0	0	0	0,969	38,802	39,356	100,942	Plagionite
LM07-19	17	2007	21,488	0	0	0	0	0	0,912	38,684	39,796	100,88	Plagionite
LM07-19	24	2007	21,683	0,003	0	0	0	0	0,941	38,701	39,756	101,084	Plagionite
LM07-19	26	2007	21,677	0,004	0	0	0	0	0,92	38,725	39,346	100,672	Plagionite
LM07-19	14	2007	21,628	0,013	0	0	0	0,050	0,954	38,413	40,325	101,383	Plagionite
LM07-19	17	2007	21,945	0	0	0	0	0,025	0,993	39,241	38,995	101,199	Plagionite
LM07-19	21	2007	21,723	0,028	0	0	0	0,017	0,887	39,069	39,317	101,041	Plagionite
LM07-19	22	2007	21,701	0,009	0	0	0	0,014	0,94	38,952	39,038	100,654	Plagionite
LM07-19	27	2007	21,699	0,139	0	0	0	0,057	0,932	39,178	38,790	100,795	Plagionite
LM07-19	28	2007	21,867	0,004	0	0	0	0,075	1,024	40,211	37,627	100,808	Plagionite
LM07-19	2	2007	21,551	0,004	0	0	0	0,385	0,959	39,389	39,006	101,294	Plagionite
LM07-17	18	2007	21,762	0	0	0	0	0,016	1,026	39,509	38,350	100,663	Plagionite
LM07-17	19	2007	21,369	0	0	0	0	0,023	0,975	39,126	39,080	100,573	Plagionite
361//R1	3	2008	21,215	0,000	0,000	0,013	0,044	0,041	1,046	38,946	37,315	98,620	Plagionite
361//R1	4	2008	21,303	0,000	0,004	0,006	0,025	0,103	1,180	39,073	37,011	98,705	Plagionite
361//R2	7	2008	20,960	0,000	0,048	0,040	0,036	0,245	1,008	38,389	37,607	98,333	Plagionite
361//R3	12	2008	20,827	0,000	0,028	0,000	0,034	0,357	1,107	37,922	37,791	98,066	Plagionite
361//R3	18	2008	20,711	0,000	0,014	0,012	0,017	0,087	0,991	37,027	39,939	98,798	Plagionite
361//R4	20	2008	21,046	0,003	0,006	0,044	0,022	0,399	1,103	38,364	37,965	98,952	Plagionite
<b>THEORIC</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>22,86</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>45,48</b>	<b>31,66</b>	<b>100</b>	<b>Zinkenite</b>
LM07-19	9	2007	22,885	0,023	0,000	0	0,000	1,164	1,095	43,182	33,578	101,927	Zinkenite
LM07-17	15	2007	22,361	0,028	0,000	0	0,000	0,017	1,082	42,456	33,393	99,337	Zinkenite
LM07-19	1	2007	22,782	0	0,000	0	0,000	0	1,096	44,901	31,787	100,566	Zinkenite
LM07-19	3	2007	22,785	0,012	0,000	0	0,000	0	1,113	44,65	31,716	100,276	Zinkenite
LM07-19	4	2007	22,936	0	0,000	0	0,000	0	1,183	44,634	32,192	100,945	Zinkenite
LM07-19	9	2007	22,771	0,017	0,000	0	0,000	0	1,15	44,74	31,695	100,373	Zinkenite
LM07-19	10	2007	22,918	0,003	0,000	0	0,000	0	1,22	45,041	32,3	101,482	Zinkenite
LM07-19	13	2007	22,689	0,006	0,000	0	0,000	0	1,163	43,615	32,861	100,334	Zinkenite
LM07-19	14	2007	22,811	0	0,000	0	0,000	0	1,171	43,815	32,368	100,165	Zinkenite
LM07-19	18	2007	21,515	0	0,000	0	0,000	0	1,084	42,491	32,418	97,508	Zinkenite
LM07-19	19	2007	22,588	0	0,000	0	0,000	0	1,187	44,49	32,213	100,478	Zinkenite
LM07-19	20	2007	22,476	0,007	0,000	0	0,000	0	1,126	43,56	32,741	99,91	Zinkenite
LM07-19	21	2007	22,833	0,056	0,000	0	0,000	0	1,141	44,2	32,542	100,772	Zinkenite
LM07-19	22	2007	22,51	0	0,000	0	0,000	0	1,071	43,484	33,126	100,191	Zinkenite
LM07-19	25	2007	22,605	0	0,000	0	0,000	0	1,133	43,552	33,349	100,639	Zinkenite
LM07-19	28	2007	22,652	0	0,000	0	0,000	0	1,121	43,412	32,619	99,804	Zinkenite
LM07-19	30	2007	22,702	0,002	0,000	0	0,000	0	1,149	43,524	33,027	100,404	Zinkenite
LM07-19	31	2007	22,459	0	0,000	0	0,000	0	1,072	43,903	32,299	99,733	Zinkenite

zone	pt	année	wS	wFe	wCo	wNi	wCu	wZn	wAs	wSb	wPb	wTotal	Mineral
LM07-19	32	2007	22,537	0	0,000	0	0,000	0	1,13	43,586	33,204	100,457	Zinkenite
LM07-19	11	2007	22,792	0	0,000	0	0,000	0,231	1,101	43,339	33,025	100,488	Zinkenite
LM07-19	19	2007	22,859	0	0,000	0	0,000	0,028	1,085	43,419	32,9	100,291	Zinkenite
LM07-19	20	2007	22,685	0,008	0,000	0	0,000	0,003	1,11	43,857	32,986	100,649	Zinkenite
LM07-19	23	2007	23,212	0	0,000	0	0,000	0,046	1,094	43,828	31,887	100,067	Zinkenite
LM07-17	12	2007	22,763	0,041	0,000	0	0,000	0,049	1,201	44,867	32,03	100,951	Zinkenite
LM07-17	13	2007	22,774	0,006	0,000	0	0,000	0,003	1,175	44,991	32,261	101,21	Zinkenite
LM07-17	14	2007	22,883	0,02	0,000	0	0,000	0,017	1,099	44,861	31,94	100,82	Zinkenite
LM07-17	16	2007	22,645	0,008	0,000	0	0,000	0,042	1,055	43,497	33,359	100,606	Zinkenite
LM07-17	20	2007	22,5	0	0,000	0	0,000	0,033	1,094	43,431	32,377	99,435	Zinkenite
LM07-19	23	2007	22,526	0,025	0,000	0	0,000	0	1,09	43,036	33,622	100,299	Zinkenite
361//R1	6	2008	22,406	0,054	0,015	0,019	0,092	0,070	1,432	44,341	30,747	99,176	Zinkenite
361//R2	8	2008	22,355	0,019	0,007	0,000	0,097	0,325	1,312	44,717	30,802	99,634	Zinkenite
361//R2	10	2008	22,190	0,043	0,027	0,023	0,039	0,479	1,261	44,526	30,455	99,043	Zinkenite
361//R2	11	2008	22,370	0,050	0,000	0,018	0,097	0,179	1,276	44,027	30,925	98,942	Zinkenite
361//R3	14	2008	22,649	0,065	0,040	0,031	0,059	0,295	1,190	43,704	31,351	99,384	Zinkenite
361//R4	19	2008	22,148	0,053	0,000	0,028	0,073	0,605	1,314	44,397	31,004	99,622	Zinkenite
361//R1	1	2008	22,423	0,043	0,027	0,048	0,081	0,105	1,364	44,765	30,597	99,453	Zinkenite
<b>THEORIC</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>21,09</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>36,97</b>	<b>41,94</b>	<b>100,000</b>	<b>Robinsonite</b>
361//R3	16	2008	20,446	0,000	0,038	0,023	0,010	0,218	1,081	35,759	42,022	99,597	Robinsonite
LM07-19	18	2007	21,281	0,005	0	0	0	0,034	0,926	36,824	42,144	101,214	Robinsonite
LM07-19	16	2007	21,303	0	0	0	0	0,020	0,948	37,651	41,644	101,566	Robinsonite
<b>THEORIC</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>16,88</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>16,76</b>	<b>66,40</b>	<b>100,040</b>	<b>Geocronite</b>
366//R3	27	2008	15,405	0,000	0,037	0,035	0,034	0,054	0,290	12,490	69,103	97,448	Geocronite ?
366//R3	28	2008	15,369	0,000	0,000	0,034	0,060	0,000	0,335	13,025	68,732	97,555	Geocronite ?
<b>THEORIC</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>21,75</b>	<b>2,70</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>35,39</b>	<b>40,15</b>	<b>99,990</b>	<b>Jamesonite</b>
345//R2	43	2008	21,261	2,420	0,033	0,060	0,039	0,042	0,934	35,798	38,407	98,994	Jamesonite
345//R2	44	2008	21,522	2,452	0,044	0,051	0,097	0,025	1,021	36,485	36,528	98,225	Jamesonite
345//R3	46	2008	21,722	2,311	0,016	0,125	0,000	0,060	1,147	37,029	36,454	98,864	Jamesonite
345//R5	49	2008	22,961	1,875	0,005	0,079	0,133	0,021	1,309	44,139	27,047	97,569	Jamesonite
345//R5	50	2008	22,440	2,732	0,021	0,060	0,584	0,000	1,177	40,074	32,131	99,219	Jamesonite
345//R5	51	2008	22,471	2,155	0,017	0,047	0,106	0,009	1,146	40,464	32,160	98,575	Jamesonite
362//R2	55	2008	22,327	1,925	0,000	0,139	0,141	0,078	1,238	42,104	30,769	98,721	Jamesonite
362//R2	56	2008	21,915	2,118	0,009	0,198	0,178	0,030	1,023	38,264	35,191	98,926	Jamesonite
362//R2	57	2008	21,879	1,974	0,048	0,126	0,138	0,040	1,122	39,710	33,227	98,264	Jamesonite
<b>THEORIC</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>53,45</b>	<b>46,55</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>Pyrite</b>
LM07-17	4	2007	53,466	46,338	0,000	0	0,000	0,022	0	0	0,202	100,028	Pyrite
LM07-17	5	2007	52,783	45,358	0,000	0	0,000	0,023	0,023	0	0,084	98,271	Pyrite
LM07-17	6	2007	52,651	45,044	0,000	0	0,000	0,001	0,016	0	0	97,712	Pyrite
LM07-17	7	2007	53,153	45,996	0,000	0	0,000	0,019	0,017	0	0,034	99,219	Pyrite
LM07-17	17	2007	54,671	46,220	0,000	0	0,000	0,044	0,08	0	0,183	101,198	Pyrite
LM07-17	23	2007	52,123	45,045	0,000	0	0,000	0,036	2,147	0	0,056	99,407	Pyrite
LM07-17	9	2007	53,420	37,618	0,000	7,844	0,000	0,173	0,049	1,242	0,157	100,503	Pyrite
LM07-11	1	2007	54,250	46,274	0,000	0	0,000	0	0,173	0	0,052	100,749	Pyrite
LM07-11	2	2007	50,956	44,669	0,000	0	0,000	0,018	3,659	0	0,184	99,486	Pyrite
<b>THEORIC</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>32,90</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>67,10</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>Sphalerite</b>
LM07-17	24	2007	33,029	1,231	0,000	0	0,000	62,892	0,135	1,179	0	98,466	Sphalerite

zone	pt	année	wS	wFe	wCo	wNi	wCu	wZn	wAs	wSb	wPb	wTotal	Mineral
361//R2	9	2008	29,483	0,606	0,033	0,018	0,085	58,844	0,232	4,445	0,000	93,746	Sphalerite
351//R4	37	2008	32,401	0,032	0,017	0,002	0,210	66,628	0,056	0,097	0,000	99,443	Sphalerite
351//R4	38	2008	32,519	0,030	0,028	0,015	0,166	65,686	0,059	0,765	0,000	99,268	Sphalerite
<b>THEORIC</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>34,94</b>	<b>30,43</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>34,63</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>Chalcopyrite</b>
345//R2	41	2008	34,788	28,463	0,017	0,000	33,430	0,083	0,020	0,516	0,000	97,317	Chalcopyrite
<b>THEORIC</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>15,09</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>27,61</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>57,29</b>	<b>0</b>	<b>99,99</b>	<b>Ullmannite</b>
LM07-17	1	2007	15,192	0,027	0,000	26,576	0,000	0,360	2,835	56,255	0,040	101,285	Ullmannite
LM07-17	2	2007	15,259	0,009	0,000	26,692	0,000	0,377	4,497	53,947	0,096	100,877	Ullmannite
LM07-17	3	2007	15,367	0,020	0,000	26,839	0,000	0,147	4,490	53,776	0,063	100,702	Ullmannite
LM07-17	4	2007	15,350	0,014	0,000	26,919	0,000	0,099	4,443	54,510	0,130	101,465	Ullmannite
LM07-17	5	2007	15,112	0,034	0,000	25,886	0,000	0,100	2,293	57,150	0,055	100,630	Ullmannite
LM07-17	6	2007	15,212	0,027	0,000	25,730	0,000	0,064	2,292	57,497	0,079	100,901	Ullmannite
LM07-17	7	2007	14,976	0,019	0,000	25,963	0,000	0,000	2,218	57,743	0,099	101,018	Ullmannite
LM07-17	8	2007	15,034	0,023	0,000	26,104	0,000	0,078	2,284	57,063	0,058	100,644	Ullmannite
361//R3	17	2008	15,264	0,053	0,686	24,702	0,167	0,153	2,630	56,834	0,000	100,489	Ullmannite
345//R4	47	2008	14,835	0,007	0,031	26,929	0,044	0,032	2,349	57,823	0,000	102,050	Ullmannite
LM07-19	8	2007	0,163	0,046	0,000	0	0,000	0	3,109	80,233	0,153	83,704	Valentinite
LM07-19	27	2007	0,041	0,006	0,000	0	0,000	0	3,178	81,698	0,215	85,138	Valentinite
366//R4	29	2008	0,027	0,011	0,012	0,018	0,024	0,067	3,636	82,554	0,032	86,381	Senarmontite
351//R3	33	2008	0,023	0,031	0,028	0,016	0,028	0,080	3,668	80,275	0,194	84,343	Senarmontite
351//R3	35	2008	0,200	0,012	0,022	0,050	0,007	0,405	3,614	79,890	0,095	84,295	Senarmontite
LM07-19	8	2007	24,962	0,003	0,000	0	0,000	1,175	2,219	64,615	0,149	93,123	Kermesite ?
LM07-19	13	2007	27,261	0,043	0,000	0	0,000	4,216	2,005	64,741	2,755	101,021	Unknown 1
LM07-17	21	2007	26,341	0,014	0,000	0	0,000	0,04	1,817	62,712	10,574	101,498	Unknown 2

# Prospection électromagnétique sur le site de l'ancienne mine de Goesdorf

**Steve Bornain**

Office de Contrôle des Matériaux et de l'Environnement  
8, ZI am Bruch  
L-3327 Crauthem  
steve.bornain@ocme.lu

## Zusammenfassung

Das Dorf Goesdorf ist bekannt die ehemalige Antimonmine auf seinem Territorium. Die Mine ist heutzutage nur schwer zugänglich, um die Mineralisierung an Ort und Stelle zu untersuchen. Hier kann die Geophysik helfen, die betreffende Mineralisierung zu verstehen und herauszuheben. Elektromagnetische Messungen wurden deshalb in der Nähe der

Antimonmine entlang sechs Nord-Süd-Profilen durchgeführt, die die möglichen mineralisierten Venen in Ost-West-Orientierung schneiden.

Die Messungen brachten Spots hervor, die Bereiche in der Tiefe markieren, die stärker leitfähig und daher möglicherweise mineralisiert sind.

## Abstract

The village of Goesdorf is known for the presence of a former antimony mine on its territory. Nowadays, the mine is difficult to access for the *in-situ* study of the mineralization and its extension. For this purpose, geophysics can help understand and single out the mineralization involved. Therefore, electromagnetic monitoring was carried out near the mine of

antimony following six North-South profiles intersecting the anticipated mineralized veins of East-West orientation.

This campaign allowed to highlight spots marking areas at depth of greater conductivity and thus possibly mineralized.

## Résumé

Le village de Goesdorf est connu pour la présence sur son territoire d'une ancienne mine d'antimoine, aujourd'hui difficilement accessible pour l'étude de la minéralisation en place et de son extension. A cet effet, la géophysique peut apporter une aide pour la compréhension et la mise en évidence des minéralisations en présence. Une campagne électromagnétique a dès lors été réalisée aux

abords de la mine d'antimoine et dirigée suivant six profils Nord-Sud recoupant ainsi les éventuels filons minéralisés d'orientation Est-Ouest.

Cette campagne a permis de mettre en évidence des spots marquant des zones de plus grande conductivité en profondeur et probablement minéralisées.



Fig. 1: Localisation de la zone de prospection EM.

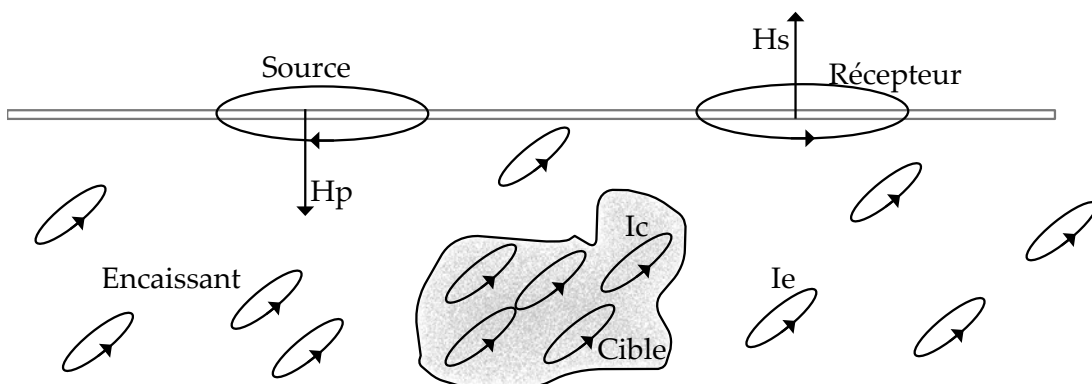


Fig. 2: Modèle "générique" de prospection EM (Blakely, 1995).

## Introduction

A la demande du Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg (Section Géologie/Minéralogie), la société OCME a réalisé une campagne de prospection géophysique sur le site de l'ancienne mine d'antimoine à Goesdorf, au Grand-Duché de Luxembourg. Cette prospection est basée sur l'utilisation d'une méthode électromagnétique. Elle vise à mettre en évidence les filons d'antimoine qui pourraient encore être présents sur le site et ses environs.

Le présent article traite de la théorie des méthodes de prospections électromagnétiques, des résultats obtenus et des conclusions qui peuvent être rédigées.

## Localisation du site de prospection

Le village de Goesdorf est situé dans la région septentrionale du Grand-Duché de Luxembourg à 6 kilomètres du barrage de Esch sur Sûre (Fig. 1).

Au point de vue géologique, ce village est localisé au sein de schistes compacts appartenant à la formation géologique du Siegenien supérieur, aujourd'hui appelé Praguien supérieur.

La mine d'antimoine est quant à elle, située sur la formation des Schistes de Stolzembourg appartenant à l'Emsien inférieur. Ces schistes sont bien stratifiés avec de rares bancs de grès quartzeux et quartzophyllades.

Il est apparu clairement lors de différentes études précédentes portant sur la minéralisation que celle-ci s'est mise en place par un jeu de failles d'orientation principale Est-Ouest et rejetée par des systèmes de failles Nord-Sud (campagnes de prospection magnétique et gravimétrique dirigées par Dr. S. Philipppo, Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg).

## Prospection électromagnétique

### Principe de la méthode

La prospection électromagnétique (en abrégé EM) est basée sur l'induction de courant électrique dans les corps conducteurs lorsque ceux-ci sont excités par un champ magnétique.

$$\nabla \times H = J = \sigma E$$

On peut présenter les choses à partir d'un modèle "générique" valable pour toutes les méthodes (fig. 2).

1. Le courant circulant dans la source produit un champ magnétique primaire  $H_p$ .
2. Ce champ primaire  $H_p$  induit des courants secondaires dans l'encaissant ( $I_e$ ) et la cible ( $I_c$ ). Ceux-ci seront d'autant plus importants que la cible et/ou l'encaissant seront conducteurs. Souvent, on va négliger l'induction dans l'encaissant.
3.  $I_e$  et  $I_c$  produisent un champ magnétique secondaire  $H_s$  enregistré par le récepteur. Ce champ secondaire est toujours beaucoup plus faible que le champ primaire qui est également enregistré par le récepteur.

### Analogie du Circuit RL

Pour quantifier la réponse du sous-sol à une excitation magnétique, nous allons faire une analogie avec un circuit RL traversé par un flux

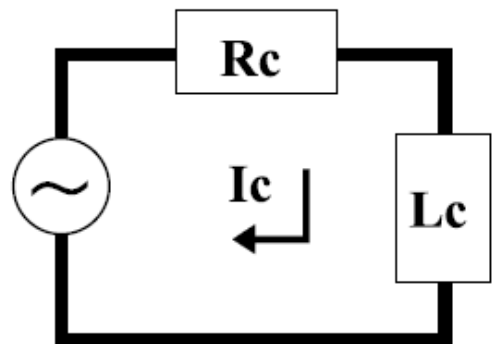


Fig. 3: Circuit RL analogue à l'induction EM (Blakely, 1995).

magnétique harmonique  $\phi_p$  de pulsation  $\omega$ . On suppose donc que tous les champs et courants sont de la forme  $e^{i\omega t}$ .

La force électromotrice d'induction dans le circuit est donnée par la Loi de Lenz :

$$e = -\frac{\partial\phi_p}{\partial t} = -i\omega\phi_p$$

L'impédance de notre circuit RL est donnée par  $R_c + i\omega L_c$ , donc on peut calculer le courant  $I_c$  avec la loi d'Ohm :

$$I_c(\omega) = \frac{e}{R_c + i\omega L_c} = -\frac{i\omega\phi_p}{R_c + i\omega L_c}$$

Introduisons la constante de temps du circuit  $\tau = L_c/R_c$ , on retrouve :

$$I(\omega) = \left[ -\frac{i\omega\tau}{1 + i\omega\tau} \right] \frac{\phi_p}{L_c} = A(\omega) \frac{\phi_p}{L_c}$$

Le terme  $A(\omega)$ , sans dimension, est la fonction de réponse du circuit.  $A(\omega)$  est complexe, on peut donc le décomposer en une partie réelle (en phase) et une partie imaginaire (en quadrature) :

$$\Re(A(\omega)) = \frac{-1}{1 + \frac{1}{\omega^2\tau^2}}$$

$$\Im(A(\omega)) = \frac{-1}{\omega\tau + \frac{1}{\omega\tau}}$$

Selon la valeur de  $\omega\tau$ , on retrouve trois domaines :

**1.  $\omega\tau \rightarrow \infty$**

Dans ce cas, la partie réelle de  $A = -1$  et la partie imaginaire tend vers 0. On a donc une réponse réelle et de signe opposé à l'excitation. Ceci revient à dire que le flux secondaire induit est opposé au flux primaire à l'intérieur du circuit. Reprenons l'expression pour l'impédance: on a  $R_c + i\omega L_c$ . Or, si  $\omega\tau$  tend vers l'infini, cela signifie que  $\omega$  est très grand et que donc le terme  $L_c$  (inductif) va dominer l'impédance. On dit que nous sommes dans un régime de haute induction. La self-inductance  $L$  n'est malheureusement pas une propriété physique caractéristique des roches et donc on ne peut pas caractériser les objets du sous-sol en haute induction.

**2.  $\omega\tau \rightarrow 0$**

Dans ce cas, la partie réelle de  $A$  tend vers 0 mais la partie imaginaire est plus élevée. On a donc une réponse imaginaire. Ceci revient à dire que le flux secondaire induit est déphasé (retardé) par rapport au flux primaire. Ici,  $\omega$  tend vers 0 et donc le terme  $R_c$  (résistif) va dominer l'impédance. Nous sommes dans un régime de basse induction. La résistance  $R_c$  ou plutôt la résistivité  $\rho$ , est une propriété physique caractéristique des roches et donc on peut caractériser les objets du sous-sol en basse induction. Les instruments de prospection EM, dont l'EM34, sont tous des appareils à basse induction

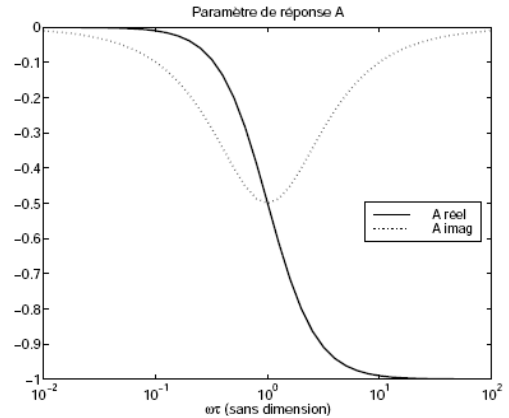


Fig. 4: Fonction de réponse  $A(\omega)$  (Blakely, 1995).

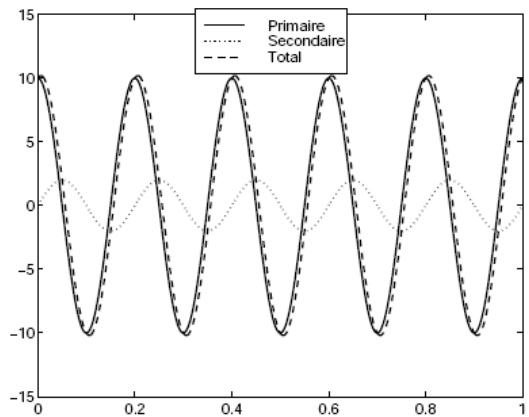


Fig. 5: Exemple de réponse en basse induction. Le déphasage permet la détection du signal secondaire même s'il est faible (Blakely, 1995).



3.  $\omega\tau = 1$

Ici, la partie réelle et la partie imaginaire de A sont égales et l'amplitude de A y est maximum. Le flux secondaire induit est donc d'amplitude maximum par rapport au flux primaire. Cette réponse maximale indique que le corps est en résonance avec l'excitation. Cette propriété peut apparaître prometteuse: en effet, on devrait pouvoir caractériser très bien le corps si on trouve sa fréquence de résonance. Qu'en est-il en pratique?

La résistivité électrique des objets varie sur plusieurs (6, voire plus) ordres de grandeur. Il en est donc de même pour la fréquence de résonance. Il semble alors difficile de concevoir un appareil qui balayerait six ordres de grandeur en fréquence, sans compter le temps que prendrait chaque point de mesure. Nous laisserons donc tomber cette approche pour des raisons pratiques.

Donc, seuls les appareils à basse induction seront intéressants. On note cependant que dans ce régime, la réponse est très faible. Pour être sûr de détecter cette réponse, on va se baser sur le retard (déphasage) de la réponse. La figure 5 illustre un

exemple de signaux primaire et secondaire, on voit que ce retard permet la détection aisée de la réponse malgré un signal secondaire faible

Dans le cas présent, nous nous intéresserons principalement à la composante de susceptibilité magnétique mesurée par l'appareil, qui met en évidence les masses ferriques.

Résultats

Appareillage

L'appareillage utilisé est un Geonics EM34. De manière à investiguer à une profondeur suffisante, les bobines source et réceptrice ont été espacées de 40 m. De cette manière, cette profondeur est de l'ordre de 60 m.

Les valeurs données sur les cartes de résultats (fig. 6) sont exprimées en mS/m.

Tab. 1: Localisation et valeurs de conductivité de chaque point de mesure des profils de prospection P01 à P06. (coordonnées X et Y en WGS84 UTM (UTM31N),  $\sigma_v$  et  $\sigma_h$  en mS/m)

P01				P02			
X	Y	$\sigma_v$	$\sigma_h$	X	Y	$\sigma_v$	$\sigma_h$
712208.57	5534216.14	8	8	712242.00	5534213.00	0	-2
712208.48	5534211.14	8	9	712241.91	5534208.00	-2	-2
712208.39	5534206.14	10	8	712241.83	5534203.00	-3	-3
712208.30	5534201.14	9	8	712241.74	5534198.00	-3	-3
712208.22	5534196.14	9	10	712241.65	5534193.00	-2	-5
712208.13	5534191.14	11	11	712241.56	5534188.00	-2	-1
712208.04	5534186.14	10	12	712241.48	5534183.00	-1	-1
712207.95	5534181.14	12	11	712241.39	5534178.01	-1	-2
712207.87	5534176.15	12	12	712241.30	5534173.01	-1	0
712207.78	5534171.15	19	21	712241.21	5534168.01	-4	-2
712207.69	5534166.15	22	23	712241.13	5534163.01	-4	-2
712207.61	5534161.15	52	26	712241.04	5534158.01	-6	-2
712207.52	5534156.15	21	10	712240.95	5534153.01	-6	-3
712207.43	5534151.15	7	6	712240.87	5534148.01	-5	-3
712207.34	5534146.15	8	7	712240.78	5534143.01	-1	-2
712207.26	5534141.15	7	8	712240.69	5534138.01	-4	-1
712207.17	5534136.15	20	16	712240.60	5534133.01	-1	-2
712207.08	5534131.15	19	18	712240.52	5534128.01	-3	-3
712206.99	5534126.15	18	20	712240.43	5534123.01	-3	0
712206.91	5534121.15	17	7	712240.34	5534118.01	-5	-1
712206.82	5534116.15	7	6	712240.25	5534113.02	1	-1
712206.73	5534111.16	6	6	712240.17	5534108.02	-1	0
712206.65	5534106.16	7	7	712240.08	5534103.02	1	0
712206.56	5534101.16	7	7	712239.99	5534098.02	5	0

Tab. 1: suite

P03				P05			
X	Y	$\sigma_v$	$\sigma_h$	X	Y	$\sigma_v$	$\sigma_h$
712267.00	5534207.46	0	1	712337.18	5534165.12	6	19
712267.00	5534202.46	-1	-2	712337.26	5534160.12	5	22
712267.00	5534197.46	0	-1	712337.35	5534155.12	6	52
712267.00	5534192.46	-2	0	712337.44	5534150.12	8	21
712267.00	5534187.46	-1	2	712337.53	5534145.12	7	7
712267.00	5534182.46	-21	1	712337.61	5534140.12	5	8
712267.00	5534177.46	0	6	712337.70	5534135.12	4	7
712267.00	5534172.46	-1	2	712337.79	5534130.12	5	20
712267.00	5534167.46	-1	1	712337.87	5534125.12	10	19
712267.00	5534162.46	-2	1	712337.96	5534120.12	4	18
712267.00	5534157.46	-2	0	712338.05	5534115.13	5	17
712267.00	5534152.46	0	2	712338.14	5534110.13	6	7
712267.00	5534147.46	-2	3	712338.22	5534105.13	7	6
712267.00	5534142.46	-15	12	712338.31	5534100.13	5	7
712267.00	5534137.46	1	4	712338.40	5534095.13	5	7
712267.00	5534132.46	2	1	712338.48	5534090.13	5	4
712267.00	5534127.46	1	1	712338.57	5534085.13	5	4
712267.00	5534122.46	-1	1				
712267.00	5534117.46	2	2				
712267.00	5534112.46	0	2				
712267.00	5534107.46	1	1				
712267.00	5534102.46	0	1				
712267.00	5534097.46	1	2				
712267.00	5534092.46	0	2				

P04				P06			
X	Y	$\sigma_v$	$\sigma_h$	X	Y	$\sigma_v$	$\sigma_h$
712292.00	5534210.04	4	1	712472.00	5534243.00	3	-20
712292.35	5534205.05	5	13	712473.63	5534238.27	2	-14
712292.70	5534200.06	4	9	712475.27	5534233.55	5	-12
712293.05	5534195.07	-4	8	712476.90	5534228.82	4	-14
712293.40	5534190.08	4	5	712478.53	5534224.10	5	-14
712293.74	5534185.10	4	5	712480.16	5534219.37	5	-20
712294.09	5534180.11	3	12	712481.80	5534214.64	4	-50
712294.44	5534175.12	4	7	712483.43	5534209.92	9	130
712294.79	5534170.13	4	6	712485.06	5534205.19	11	25
712295.14	5534165.14	2	8	712486.70	5534200.47	5	23
712295.49	5534160.16	2	4	712488.33	5534195.74	4	12
712295.84	5534155.17	-2	5	712489.96	5534191.02	8	12
712296.19	5534150.18	3	5	712491.59	5534186.29	11	6
712296.53	5534145.19	4	8	712492.66	5534181.40	10	1
712296.88	5534140.21	4	5	712493.73	5534176.52	8	8
712297.23	5534135.22	5	3	712494.80	5534171.64	8	5
712297.58	5534130.23	5	5	712495.87	5534166.75	8	4
712297.93	5534125.24	6	6	712496.94	5534161.87	5	4
712298.28	5534120.25	5	6	712498.01	5534156.98	7	5
712298.63	5534115.27	6	6	712499.17	5534152.12	5	5
712298.98	5534110.28	5	6	712500.34	5534147.26	4	5
712299.32	5534105.29	10	8	712501.52	5534142.40	7	6
712299.67	5534100.30	7	7	712502.69	5534137.54	6	6
712300.02	5534095.32	5	6	712503.76	5534132.66	3	5
				712504.00	5534127.67	8	5
				712504.23	5534122.67	4	9
				712504.47	5534117.68	5	7
				712504.70	5534112.69	5	5
				712504.94	5534107.69	2	5

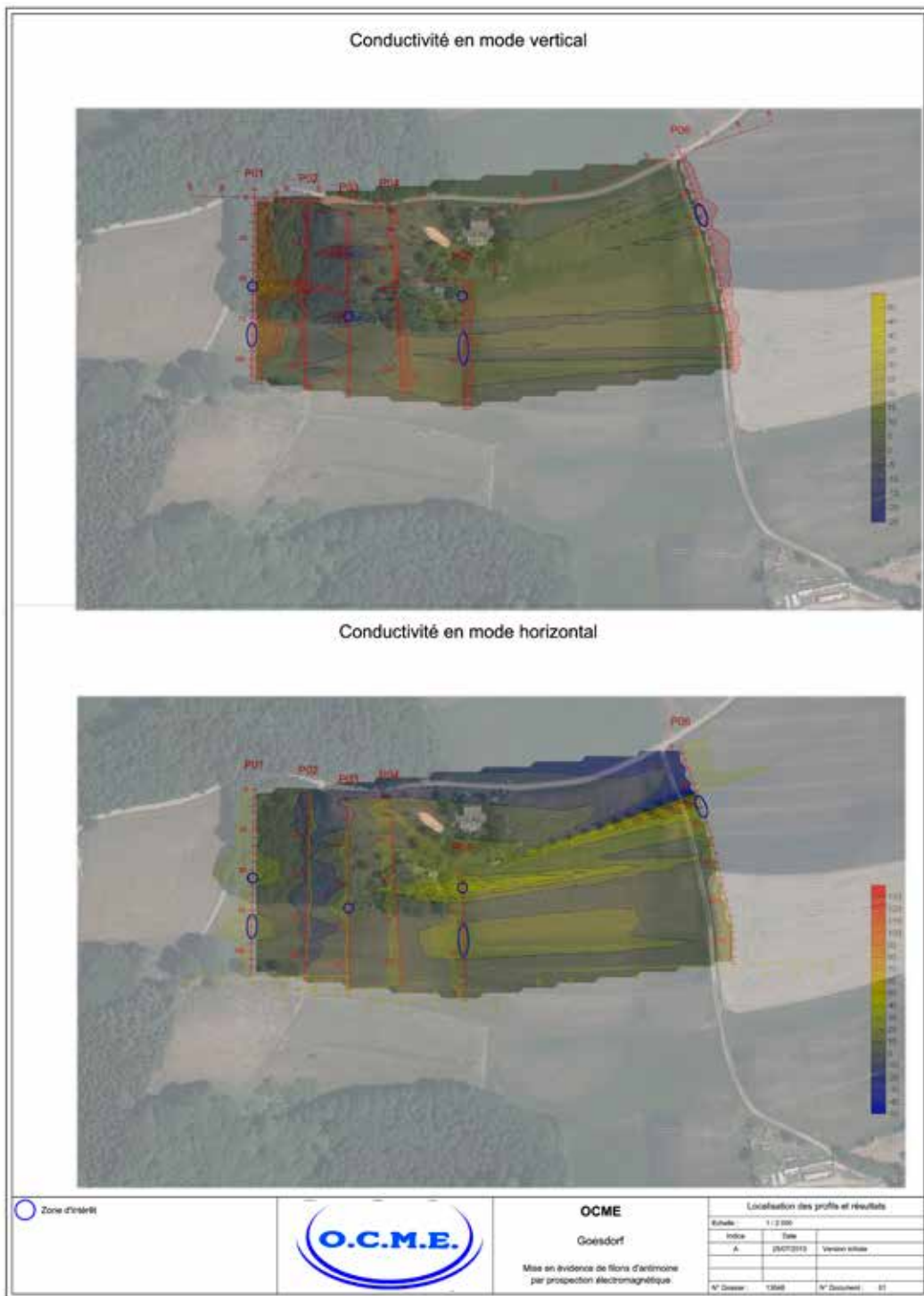


Fig. 6: Cartes de synthèse des anomalies électromagnétiques mesurées.

## Implantation

Les mesures ont été effectuées le long de profils traversant la zone minéralisée. Le pas de mesure est de 5 m. Les filons et lentilles d'antimoine étant orientés Est-Ouest, les six profils réalisés leur ont été positionnés perpendiculairement et réalisés du Nord vers le Sud, permettant ainsi d'une part la mise en évidence des filons au niveau de la mine elle-même et d'autre part leur extensions vers l'Est et vers l'Ouest (fig. 6).

## Résultats

Les mesures de la conductivité ont été prises dans le mode vertical et dans le mode horizontal. Les valeurs sont donnés dans le tableau 1.

## Conclusion

Ces résultats permettent une approche qualitative de la zone étudiée. Ils ont été reportés sur la carte reprise dans la figure 6, à la fois sous forme de graphiques en fonction de la position et sous forme de cartes d'iso-conductivité. Les échelles de conductivité sont identiques.

Pour le mode vertical, les valeurs positives sur les graphiques sont orientées vers la droite ; et vers la gauche pour le mode horizontal.

De manière globale, les valeurs sont faibles et très proches de 0. Des valeurs négatives sont même mesurées.

Des spots de conductivité sont mis en évidence en 6 endroits différents. Ils sont indiqués sous forme d'ellipses bleues sur la carte des résultats (fig.6).

P01, Spot à 55 m du point de départ du profile (coordonnées X=712207.61 et Y=5534161.15)

P01, Spot entre 80m et 90 m du point de départ du profile (coordonnées de X=712207.17 à X=712206.99 et de Y=5534136.15 à Y=5534126.15)

P03, Spot à 65 m du point de départ du profile (coordonnées X=712267.00 et Y=5534142.46)

P05, Spot à 10 m du point de départ du profile (coordonnées X=712337.35 et Y=5534155.12)

P05, Spot entre 35m et 50 m du point de départ du profile (coordonnées de X=712337.79 à X=712338.05 et de Y=5534130.12 à Y=5534115.13)

P06, Spot entre 35m et 45 m du point de départ du profile (coordonnées de X=712483.43 à X=712486.70 et de Y=5534209.92 à Y=5534200.47)

Ces spots marquent des zones où la conductivité plus élevée est induite par des zones plus conductrices en profondeur, probablement minéralisées.

## Hypothèses et propositions techniques

Suite à campagne électromagnétique, il apparaît que les filons minéralisés sont présents et mis en évidence sur le site de l'ancienne mine d'antimoine.

Dès lors, il serait intéressant de poursuivre la campagne électromagnétique en positionnant de nouveaux profils, à savoir :

- 2 profils à l'Ouest du profil P01 ;
- 2 profils entre les profils P05 et P06 ;
- 2 profils à l'Est du profil P06

Ces nouveaux profils permettraient de pouvoir mettre en évidence les occurrences des zones minéralisées ainsi que leurs extensions Est-Ouest.

Au niveau des zones de conductivités les plus marquées, il serait également intéressant de procéder à des forages de reconnaissance carottés permettant un recoupement des zones minéralisées, de mise en évidence du filon et de la possibilité de collecte d'échantillons minéralisés en vue de leur analyse ultérieure en laboratoire (diffraction des rayons X, étude microscopique, ...).

## Bibliographie

Blakely R.J. 1995. - Potential theory in gravity and magnetic application. Cambridge University Press, London, 441p.

# La mine de Beauraing

**Francis Van Troyen**

**Ghislain Ruelle**

**Luc Van Bellingen**

Collaborateurs scientifiques du  
Musée national d'histoire naturelle  
25, rue Münster  
L-2160 Luxembourg

## Zusammenfassung

Die Grube von Beauraing ist lange von Mineralogen Liebhaber und Fachleute nicht beachtet worden. Allein die Einwohner der kleinen Stadt und besonders die des Weilers Saint Martin haben seine vergängliche Existenz gekannt. Diese unter Simon Philippo Schirrherrschaft Veröffentlichung, ist eine Ansammlung der historischen, geologischen und mineralogischen Daten von 2013 bis 2016 und "ernährt" sich durch zahlreiche Schürfungen auf dem Gelände, die von Mitarbeitern des MnhnL, besonders Francis van Troyen

und Ghislain Ruelle realisiert wurden ; Identifizierung der Fossil Typen von Luc Van Bellingen, geholfen bei der Analyse bestimmter Neobildungsminerale von Michel Blondieu unter Mitarbeit von der Universität Lüttich (ULg). Die Grube von Beauraing hat eine Bleiglanz Spaltader vereinigt mit Zinkblende (Sphalerit) die öfters reichlicher vorkommend ist als das Bleierz. Das Erz hat sich während eine post- Variszische Periode in Brüche des Givetium ins Platz gesetzt und sorgte besonders für die Bildung von Trois Fontaines.

## Abstract

The mine of Beauraing has been ignored during a long time by mineral prospectors and professionals. Only the inhabitants of that little town and more specifically those of the St Martin hamlet were aware of its short-lived workings.

This publication, under the auspices of Simon Philippo, is a synthesis of historical, geological and mineralogical data gathered between 2013 and 2016 including observations made during numerous field trips organized by Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg (MnhnL) fellow-workers, especially Francis Van Troyen

and Ghislain Ruelle. Luc Van Bellingen helped with fossil identifications and analyses of neof ormation minerals were carried out by Michel Blondieau in partnership with the Belgian university of Liège (ULg).

The mine of Beauraing has worked a breccia lode of galena with, as associated mineral, sphalerite, this last one being often more widespread than the targeted lead mineral. The ore is dated from a post-variscan period and has filled fractures opened during the Givetian, more specially the Trois Fontaines formation.

## Résumé

La mine de Beauraing a été longtemps ignorée des minéralogistes amateurs et même professionnels. Seuls les habitants de la petite ville et plus spécialement du hameau Saint Martin ont connu son existence éphémère.

Cette publication, parrainée par Simon Philippo, est une synthèse de données historiques, géologiques et minéralogiques rassemblées de 2013 à 2016 et alimentées par de nombreuses prospections sur le terrain réalisées par les collaborateurs du Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg (MnhnL), notamment Francis Van Troyen et

Ghislain Ruelle, aidés dans l'identification de fossiles types par Luc Van Bellingen et dans l'analyse de certains minéraux de néoformation par Michel Blondieau en collaboration avec l'université de Liège (ULg).

La mine de Beauraing a exploité un filon bréchi que de galène avec comme minéral associé de la sphalérite, cette dernière étant souvent plus abondante que le minerai recherché à base de plomb. Le minerai s'est mis en place au cours d'une période post-varisque et a rempli des fractures formées dans le Givétien, notamment la formation de Trois Fontaines.

## Introduction

En septembre 2014, j'ai organisé pour le compte de L'Escargotite ASBL, sur une initiative de l'Echevinat de l'Environnement de la Ville de Namur, une exposition intitulée " Trésors minéralogiques du Namurois ". C'est ainsi que j'ai appris l'existence d'une mine sur le territoire de Beauraing. Ghislain Ruelle, Président de L'Escargotite ASBL, m'a fait découvrir le site. Je suis directement tombé sous le charme de cette ancienne mine et j'ai voulu en savoir beaucoup plus...Je me suis très vite rendu compte qu'il y avait très peu de renseignements.

À ce jour, toute activité extractive a cessé dans la région de Beauraing. Toutefois, bon nombre de carrières témoignent d'une intense exploitation par le passé des calcaires givétiens. Ces calcaires ont été exploités pour la fabrication de chaux comme en témoignent les vestiges d'un four à chaux à l'entrée de Beauraing. Ils ont en outre probablement servi à la production de granulats, de pierres de construction et de pavement, voire à d'autres applications industrielles (pharmacie, chimie, métallurgie, verrerie, cimenterie, agriculture) (Fig. 1, Fig. 2).



**Fig. 2:** Les fours à chaux le long de la route de Winenne, à l'arrêt depuis 1958. Juillet 2015  
Photo F Van Troyen

Durant plus de trois années, Ghislain Ruelle et moi-même, nous avons enquêté sur cette vieille mine. Ce travail n'a pas la prétention de mettre un point final à l'étude du filon de galène et sphalérite de Beauraing. Il résulte de nos observations sur le terrain, des recherches dans les bibliothèques et archives, de questions aux universités ainsi qu'aux services géologiques fédéraux et



**Fig. 1 :** La carrière de Tamizon en juillet 2015. Photo F Van Troyen

régionaux. L'examen des haldes nous a permis de faire certaines suppositions plus ou moins fondées qui ne pourraient être confirmées qu'en ayant accès à l'ancienne galerie d'exploitation, ce qui est malheureusement impossible dans l'état actuel.

## Localisation

Cartes IGN 1/25000 : Felenne – Vencimont 58 / 7-8  
Agimont – Beauraing 58 3/4.

La mine de Beauraing se situe dans la province de Namur, dans l'arrondissement de Dinant, dans la commune de Beauraing, dans le bois Laury (Fig. 3 - Fig. 6).

De Beauraing, prendre la direction de Winenne N981. Prendre un petit sentier en face du Castel St Pierre qui monte au Nord. Longer la lisière du bois vers l'Ouest. On a la possibilité de ramasser des débris de sphalérite dans les labours.



Fig. 3: Beauraing dans la province de Namur.  
Dessin F Van Troyen.



Fig. 4: Vue aérienne du bois Laury. Photo Google Maps.



Fig. 5: Carte IGN 1/25000.

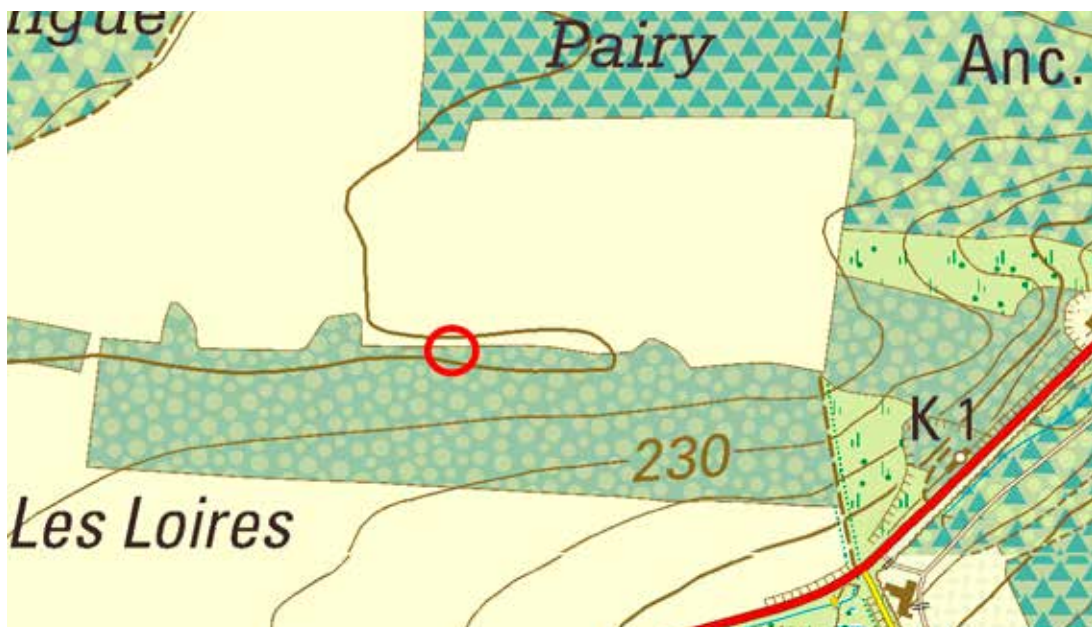


Fig. 6: Carte IGN 1/25000, détail.



## Description

On retrouve sur le site l'entonnoir à l'aplomb du puits principal maintenant fermé par une dalle en béton armé de forte épaisseur. Elle est cachée par près de deux mètres d'humus. Des haldes stériles et d'autres très riches en minerais entourent le puits dans un rayon de 20 m. L'épaisseur de ces haldes diminue à mesure que l'on s'éloigne de l'entonnoir. Il ne reste aucune trace de ruines, de bâtiments et d'installations extractives. On peut trouver d'autres vestiges de grattages et de tranchées dans le bois en question dans un rayon de 40 m environ (Fig 7).

Il est très difficile de donner une description de la mine car aucune concession n'a jamais été octroyée. Il n'y a donc aucun plan ni dossier. La description faite en 1925 par M-E Denaeyer nous permet de nous faire une vague idée :

" M.Culot-Durbecq, propriétaire à Beauraing, a mis à jour un ancien puits de 25 mètres de profondeur, mais sans rencontrer le filon plombifère qu'il espérait y découvrir. A divers niveaux ce puits présentait des amorces de galeries latérales. L'une d'elles, vers 4 mètres de profondeur, montrait un mince lit argileux entre deux bancs de calcaire. Ce lit a été suivi par le mineur jusqu'à environ 20 mètres de profondeur sous un angle de 40° S S W. En ce point apparaît un filon de 40 centimètres d'épaisseur qui semble se poursuivre dans la même direction. Il a été exploité sur 4 à 5 mètres en profondeur ; mais, actuellement, le travail est suspendu, le fond de la mine est noyé et je n'ai pu étudier qu'une faible partie de ce filon. " (Fig. 8 - Fig. 10)



Fig.7: Cône de l'ancien puits (entonnoir) et détail du mur, juillet 2015. Photo: F Van Troyen.

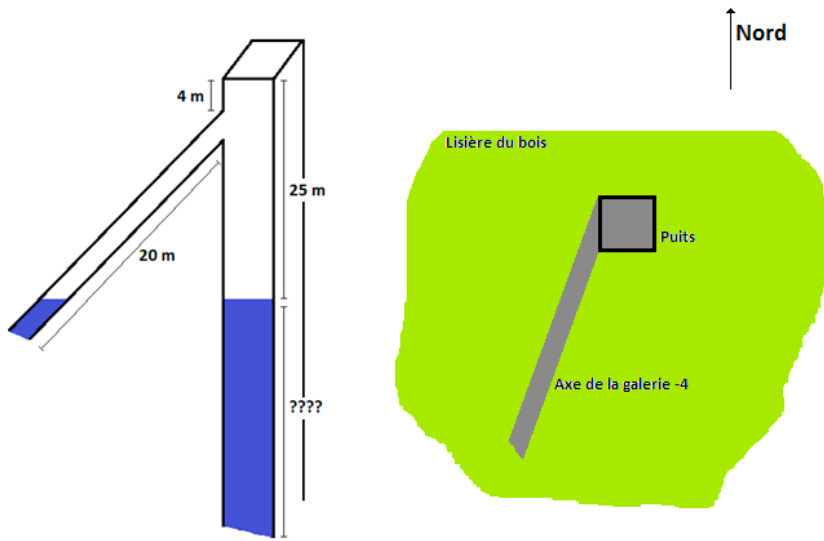


Fig. 8: Le puits. Dessin : F Van Troyen.



Fig. 9: Les haldes en juillet 2015. Photo : F Van Troyen.



Fig. 10: Tranchée en contrebas du puits et grattages, juillet 2015. Photo : F Van Troyen.

## Historique

Les premières traces d'exploitation à Beauraing proviennent d'un acte passé en 816 par Louis le Débonnaire, Prince de l'église de Reims qui institue une vaste zone dans le comté de Lomme pour l'extraction du plomb nécessaire à la construction de la cathédrale de Reims (Fig. 11).

Guillaume 1<sup>er</sup> (1337-1391), Comte de Namur, encourage fortement l'exploitation des mines dans son comté. Il a proposé des règles et des obligations entre le comté d'une part, les propriétaires fonciers et les entrepreneurs d'autre part.

Le 07 mars 1390, Johans de Herbegnny, seigneur de Beauraing, octroie une concession pour l'extraction du plomb.

"Nous, Johans de Herbegnny, Sire de Bealrain et de Dercy, Chevalier, faisons savoir à tous ceuz qui ces présentes lettres veiront et oront, que nous avons accenseit héritablement à nous bien amais Johan Gobar de Bealrain, Colar Quernial de Frayne et Gilar le Peire pour eaux, leurs hoirs, successeurs, parcheniers ou marchans à yauz, nostre ditte terre de Bealrain pour mineir ou faire mineir en y celle à mine de plont... Tirage des mines ; Au Seigneur appartient dans sa

terre et Baronnie de Beauraing la dixième charrée de tous minéraux quelconques que se puissent être tant sur les aisances de Beauraing que sur les terres des particuliers"

Réf : Abbé De Leuze, "Beauraing et son Château" (Namur 1891)

En 1472, on dénombre plusieurs petites mines sur le territoire de Beauraing.

Aux environs de 1600-1620, l'activité extractive a été fortement diminuée et finalement mise à l'arrêt. Les grands frais d'exploitation, l'approfondissement de la mine, les importantes inondations et les trop nombreux accidents mortels furent les causes de cet arrêt.

En 1924, M Culot-Durbecq a remarqué des zones circulaires à la végétation anémiée, parsemées de débris de calcite renfermant des cristaux de galène et de blende. Il a fait creuser un de ces cercles à proximité de la lisière nord du bois Laury, à la côte 240. Il a mis à jour un ancien puits profond de 25 mètres sans découvrir le filon plombifère tant espéré. Cette entreprise n'a pas duré longtemps et malheureusement s'est terminée par un fiasco.

L'exploitation redémarra vraiment vers 1948 mais un coup d'eau mit fin aux espoirs des proprié-



Fig. 11: Louis 1<sup>er</sup> dit le Pieux ou le Débonnaire (778-840). Encyclopédie Larousse.

taires qui n'avaient pas les moyens d'investir plus avant. Le site fut alors abandonné en l'état, ce qui est confirmé par la richesse de certaines haldes qui n'ont même pas été triées pour en séparer le minerai. Ce dernier devait être évacué en suivant la pente naturelle du terrain c'est -à-dire vers la route menant de Beauraing à Winenne.

Rien dans l'histoire ne permet de dire que la mine de Beauraing a été exploitée pour ses riches veines de zinc. Peut-être parce que seule la galène y a été exploitée. C'est probablement la raison pour laquelle Beauraing n'a jamais été mentionnée comme une mine de zinc. La fréquence du minerai de zinc présent dans les haldes semble soutenir cette proposition. Nous soupçonnons que l'exploitation du zinc n'était pas économiquement viable, par rapport à des gisements importants comme ceux de Bleyberg-Moresnet.

## Géologie

### La mine dans le cadre géologique régional

La zone de Beauraing recoupe trois zones géographiques d'orientation E-W qui sont, du N au S, les plateaux du Condroz, la dépression de Fagne-Famenne et la Calestienne. Les terrains cartographiés, d'âge dévonien inférieur à supérieur (paléozoïque), appartiennent au bord sud du Synclinorium de Dinant structuré durant l'orogénèse varisque (ou hercynienne, de 340 à 290 millions d'années). Pendant cette période, le Synclinorium de Dinant, partie de "l'allochtone ardennais" (Fig. 12), est plissé et charrié par le jeu de failles inverses sur le Synclinorium de Namur. Une couverture post-paléozoïque de terrains d'âge tertiaire à quaternaire est discordante sur les terrains plissés paléozoïques.

Les formations des séries sédimentaires paléozoïques comportent des lithologies allant de roches siliciclastiques à calcaires, correspondant à trois phases sédimentaires successives : terrigène argilo-sableuse et légèrement calcaire (Emsien), argilo-calcaire avec bioconstructions (Eifelien, Givétien, Frasnien) et terrigène argilo-sableuse à calcaire vers le sommet (Famennien). Les dépôts d'âge tertiaire à quaternaire (poches sableuses, alluvions, loess, travertins, colluvions) ne recouvrent que très partiellement ces terrains. Les loess et colluvions ne sont pas cartographiés. Quatre unités tectoniques sont définies du N au S : les unités du Condroz, de Feschaux, de Baronville et de la Calestienne. Elles sont séparées par des failles longitudinales importantes (de charriage ou de rétro-charriage). Le style structural de la partie méridionale de la carte, avec ses plis franchement déversés vers le N sur des failles de charriage à pente S, s'oppose à celui de la partie septentrionale qui se caractérise au contraire par des plis droits dans une structure monotone moins raccourcie.

Cette région communément appelée "la pointe de Givet" est profondément entaillée dans une direction N-S par la Meuse. Elle est également partagée dans sa partie médiane par une large dépression d'orientation E-W, la dépression de Fagne-Famenne. (Fig. 14 - 15)

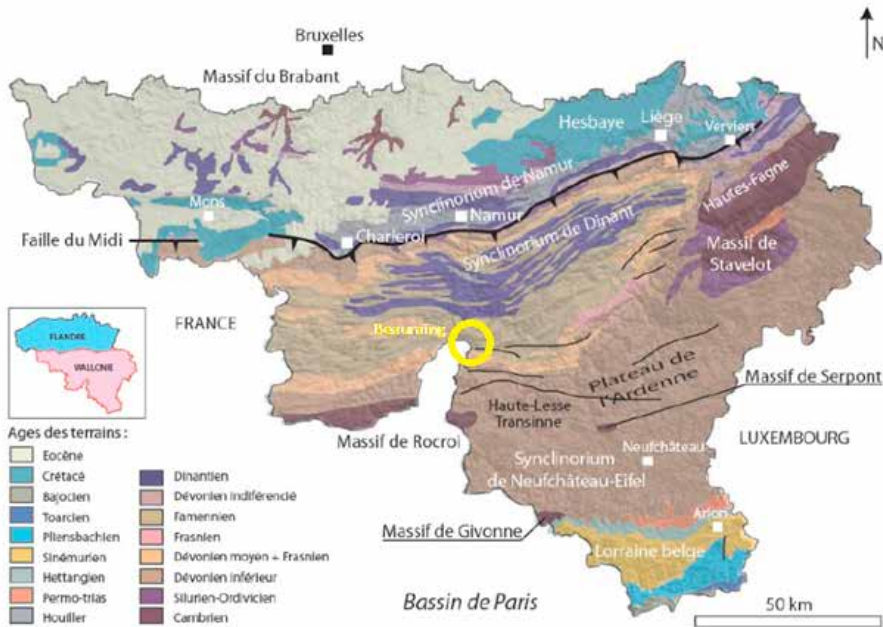


Fig. 12: Localisation de la zone de la mine dans le cadre géologique régional. Carte géologique simplifiée de la Wallonie surimposée à la topographie régionale (MNT SRTM3, NASA) F.Boulvain, J-L Pingot 2006.

Trois unités morphologiques majeures, orientées E-W, se différencient et sont étroitement liées à la nature lithologique des roches. Du nord au sud, elles sont les suivantes :

**Les plateaux et collines du Condroz** s'étendant entre 240 et 305 mètres d'altitude, limités au S par les ruisseaux de Massembré, de Maisoncelle et du Colmy. La bordure méridionale de ces hauteurs est généralement bien délimitée par un abrupt important, à l'exception du goulet d'étranglement de la plaine alluviale de la Meuse en aval de Givet (entre Heer et Agimont). Partiellement boisés, ces terrains sont fortement entaillés par divers cours d'eau dont les plus importants sont, en dehors de la Meuse, ses propres affluents et le ruisseau de Mahou, affluent de la Lesse. Ces ruisseaux entaillent aisément le cœur des anticlinaux où se logent des formations péliques famenniennes, préservant de larges zones en plateaux culminant à près de 300 m où siègent, au cœur des synclinaux, des formations de grès ou de calcaires famenniennes. La partie SW de cette entité, à l'W du ruisseau de Soumiée et au S du ruisseau du Bas Pré, correspond à la terminaison orientale

du "Massif" de Philippeville (Maillieux, 1926), s'étendant jusqu'à Heer. (Fig.14 - 15)

**Une plaine en dépression d'environ trois kilomètres de large**, (Fig. 14 - 15) localisée entre les villages belges de Feschaux et de Baronville et s'étendant entre 160 et 215 mètres d'altitude (la dépression de la Famenne à l'E de la Meuse), et entre le ruisseau du Colmy et le Fort Condé à Givet (la dépression de la Fagne à l'W de la Meuse). La formation de cette large dépression à pentes très douces est le résultat d'aplanissements quaternaires et plus précisément de ruissellements et autres processus périglaciaires datant du Pléistocène supérieur (Alexandre, 1957; Seret & de Béthune, 1967). L'omniprésence de schistes famenniens ou frasnien y a favorisé les processus d'érosion;

**Un seuil topographique** passant par les localités de Foisches, Givet, Dion et Beauraing (appelé Calestienne), constitué pour l'essentiel de formations calcaires givétiennes, séparant l'Ardenne *sensu stricto* schisto-gréseuse au S, de la Fagne-Famenne schisteuse au N. (Fig. 13, 14, 15) Sa

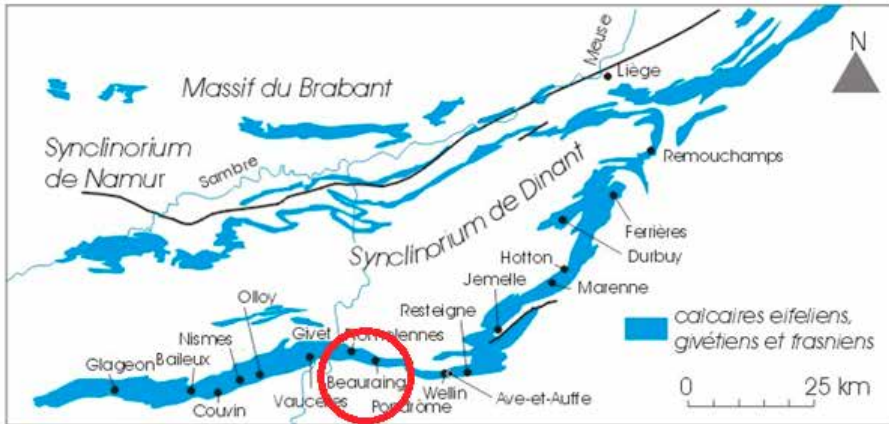


Fig. 13: Carte géologique simplifiée des calcaires dévoniens (La Calestienne). " Une introduction à la géologie de la Wallonie " F.Boulvain J-L Pingot 2015.

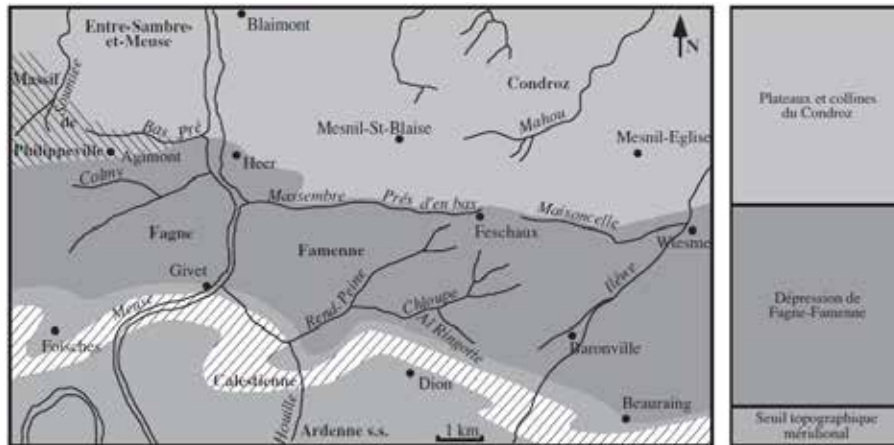


Fig. 14: Les trois unités morphologiques principales de la zone de Beauraing. Notice explicative de la carte géologique Agimont-Beauraing 58/3-4. E.Lemonne et V.Dumoulin ULB 1998.

bordure nord est nettement marquée par une crête globalement orientée E-W, perturbée par des ondulations localisées à Foisches, Fromelennes et Beauraing. Son altitude s'étend de 160 à 260 mètres, le travail érosif ayant creusé de petites vallées (ruisseaux de Dion-le-Val et Îleuve).

Ref : Notice explicative de la carte géologique Agimont-Beauraing 58/3-4. E. Lemonne et V. Dumoulin ULB 1998.

## Données géologiques relatives à la zone de la mine.

### Le Givétien

Le Givétien (Gv) est divisé en deux unités, le Gva et le Gvb, de lithologie calcaire toutes les deux. *Delvaux de Fenffe* (1985) fait correspondre la Formation de Charlemont au Gva et la Formation de Fromelennes au Gvb :

La Formation de Charlemont, d'une épaisseur de 350 m, est composée de dolomie et de calcaire.



Fig. 15: Vue depuis les hauteurs de Focant. Juillet 2015. Photo : F Van Troyen.

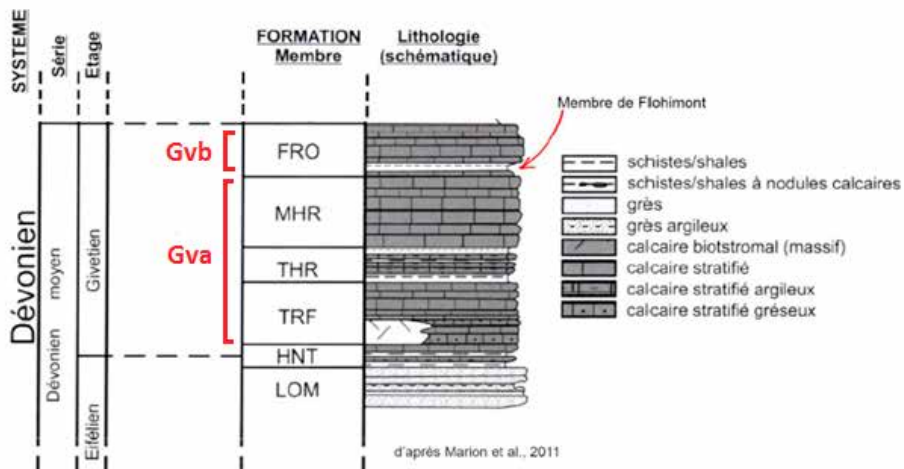


Fig. 16: Colonne lithostratigraphique du Givetien de la zone de Rochefort d'après Marion et al 2011.

La Formation de Fromelennes est constituée de calcaires avec une couche de schistes à la base et est épaisse de 140 m.

*Marion et al.* (2011) donne une description nettement plus détaillée du Givétien qui incorpore au sein des calcaires des niveaux schisteux. La colonne lithostratigraphique de la Fig. 16 donne la succession des formations et membres du Givétien. Dans l'ordre chronologique croissant, les unités sont les suivantes :

La **Formation de trois-Fontaines** (TRF) est constituée de calcaires.

La **Formation des Terres d'Haus** (THR) est constituée de calcaires souvent argileux séparés par de minces couches de shales carbonatés.

La **Formation du Mont d'Haus** (MHR) débute par un niveau argileux auxquels succèdent des calcaires francs. L'épaisseur de cette formation varie entre 150 m et 180 m.

La **Formation de Fromelennes** (FRO) est composée de trois membres :

Le **Membre de Flohimont** est constitué de calcaires argileux alternant avec des passées de shales pouvant atteindre 1 m d'épaisseur. L'épaisseur de ce membre est d'environ 30 m.

Le **Membre du Moulin Boreux** est composé de calcaires. L'épaisseur de ce membre est d'environ 85 m.

Le **Membre du Fort Hulobiet** est composé de calcaires argileux et francs dans sa partie inférieure. La partie sommitale renferme des niveaux bréchiques. L'épaisseur de ce membre est d'environ 25 m.

Les Formations de Trois-Fontaines, des Terres d'Haus et du Mont d'Haus représentent l'ancien Gva tandis que la Formation de Fromelennes représente l'ancien Gvb.

La zone de la mine se situe dans le Givétien au contact des formations de Trois-Fontaines (TRF) et des formations des Terres d'Haus et du Mont d'Haus (TM). On retrouve au nord la formation de Fromelennes (FRO) et au sud la formation d'Hanonet (HNT).

## Les formations du Givétien

La situation réelle n'est pas aussi simple car des affleurements de différentes formations n'appartenant pas au Givétien apparaissent à divers endroits (Fig. 18).

## Formation de Trois-Fontaines (TRF)

**Origine du nom :** de la carrière de Trois-Fontaines, en France, au sud-ouest de Givet (GOSSELET, 1876 ; BONTE, RICOUR, 1949).

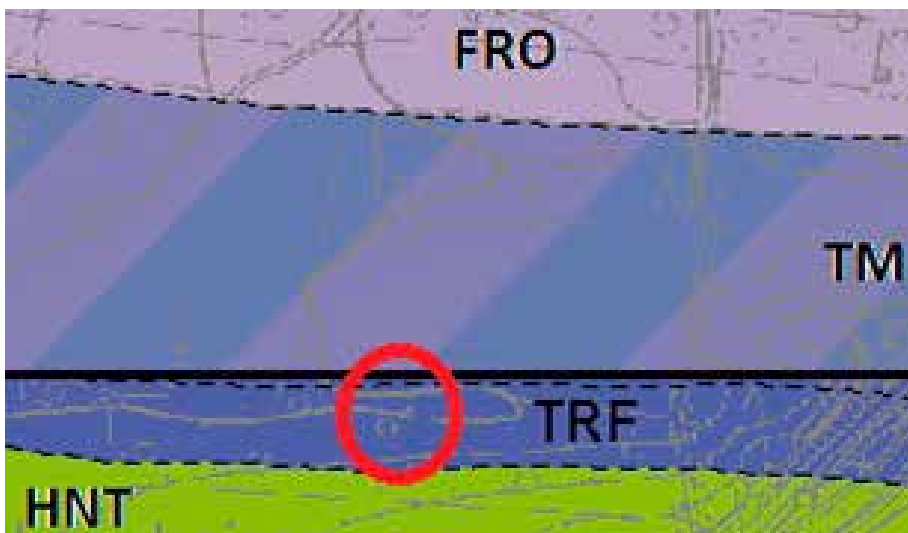


Fig. 17: Localisation de la mine sur la carte géologique en comparant la courbe de niveau 240.



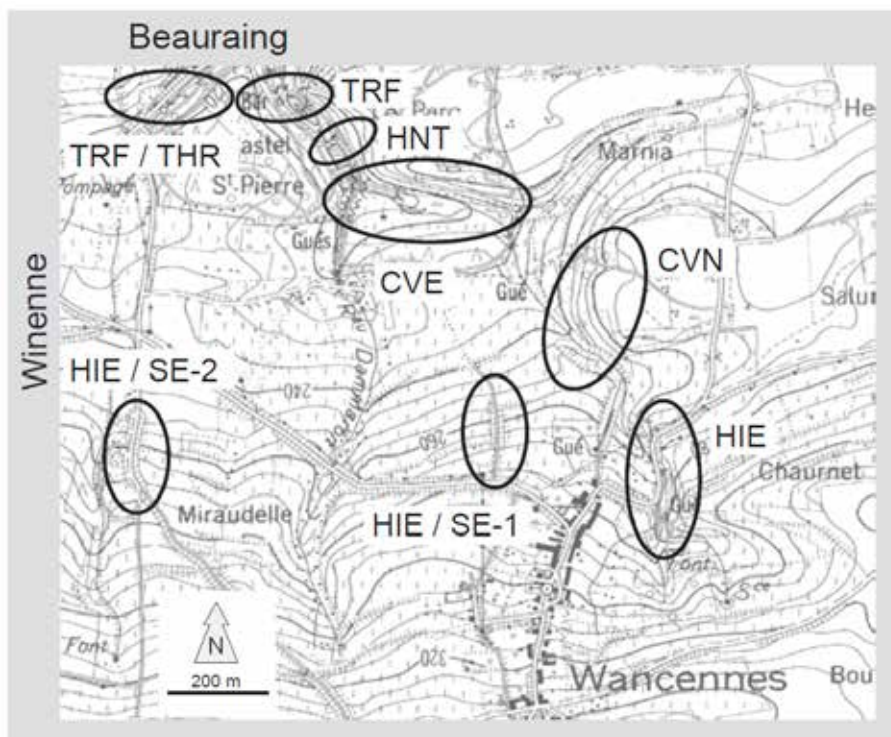


Fig. 18: Localisation des affleurements des formations de Hierges (HIE), de Saint-Joseph - Eau Noire (SE), de Couvain (CVN), de Jemelle (Membre des Chavées - CVE), de Hanonet (HNT), de Trois-Fontaines (TRF) et des Terres d'Haus (THR) au nord de Wancennes. Notice explicative de la carte géologique Felenne-Vencimont 58/7-8. V.Dumoulin et S.Blockmans 2013.

Dans la zone de Beuraing, la formation de Trois-Fontaines débute par un ensemble d'ordre plurimétrique de calcaire grenu crinoïdique clair. Vient ensuite un second niveau d'ordre pluridécimétrique formé de calcaire " saccharoïde non évidemment construit ", désigné avec humour par M Coen comme le SNEC (calcaire en bancs massifs pluri décimétriques de couleur variable, d'aspect saccharoïde, qui pourrait être construit). Localement on y distingue quand même des organismes tels que des stromatopores globuleux, des rugueux solitaires, des coraux branchus, des crinoïdes et des lumachelles. Cet ensemble s'apparenterait au traditionnel biostrome de base de la Formation de Trois-Fontaines. Le sommet de la formation est constitué de calcaire algaire fin, finement laminaire (type laminites), clair interstratifié de quelques niveaux de calcaire fin à fenestreae ou à *Leperditia*.

**Épaisseur** : de l'ordre de 75 m à Givet et de 30 m à Beuraing.

**Âge** : partie inférieure du Givétien (BULTYNCK, 1987).

**Utilisation** : comme concassé et plus rarement comme empierrement ou pour la construction et la fabrication de la chaux.

#### Affleurements représentatifs.

- Dans le parc du Castel St Pierre (Lamb.72 : 191 730,88 100) (Fig. 19).
- Ancienne carrière au nord-ouest de la route Winenne - Beuraing montrant le contact avec la Formation des Terres d'Haus (Lamb. 72 : 191 480, 88 120).



Fig. 19: Affleurement dans le parc du Castel St Pierre. Juillet 2015. photo : F Van Troyen.

## Formations des Terres d'Haus et du Mont d'Haus (TM)

En raison de la faible densité des affleurements de la formation des Terres d'Haus et par conséquent des difficultés de la différencier de la Formation du Mont d'Haus, ces deux formations sont cartographiées ensemble.

## Formation des Terres d'Haus (THR)

**Origine du nom :** de la colline des Terres d'Haus en France, au sud de Givet (PEL, 1975).

La Formation des Terres d'Haus débute par quelques bancs à colonies d'*Argutastrea quadrigemina* (COEN-AUBERT, 2003) qui constituent un niveau repère régional. Suivent des calcaires argileux fort sombres, finement grenus et souvent crinoïdiques. Les bancs sont généralement stratifiés avec une allure généralement noduleuse à subnoduleuse et les joints argileux sont fréquents. On y trouve des niveaux à accumulations de gastéropodes, de brachiopodes ou de coraux divers tels que rugueux solitaires et tabulés branchus, çà et là les bancs ont un aspect laminaire.

**Épaisseur :** de l'ordre de 70 – 75 m.

**Âge :** Givétien.

**Utilisation :** comme concassé, mais peu exploité en raison de ses mauvaises propriétés mécaniques (PEL, 1975).

### Affleurements représentatifs

Ancienne carrière de Tamizon au nord-ouest de la route Winenne – Beuraing montrant le contact avec la Formation de Trois-Fontaines

## Formation du Mont d'Haus (MHR)

**Origine du nom :** de la forteresse du Mont d'Haus, au sud de Givet en France (Errera et al. 1972; Préat & Tourneur in Bultynck et al, 1991).

Sa limite inférieure est à la base du premier banc de calcaire massif (biostrome à stromatopores et coraux) surmontant les calcaires argileux et noduleux de la Formation des Terres d'Haus. Cette formation se caractérise par une alternance de calcaires grossiers ou fins en bancs épais. Plus précisément, elle est formée d'alternances : - de calcaires (floatstones, rudstones) massifs, pluridécimétriques à métriques, riches en organismes constructeurs tels que des stromatopores massifs, lamellaires et branchus, des coraux (tabulés branchus, *Alveolites*, rugueux solitaires et fasciculés) auxquels sont associés des brachiopodes (notamment *Stringocephalus burtini*) et des crinoïdes; - de calcaires (wackestones à floatstones) localement argileux, en bancs décimétriques à pluridécimétriques à bioclastes divers de même type que ci-dessus. Dans la partie sommitale de la formation (sur quelques mètres), les calcaires sont progressivement plus argileux.

**Épaisseur :** environ 160 m à Givet.

### Affleurements représentatifs :

- En Belgique : dans la vallée du ruisseau Îlève, à l'ouest de Beuraing.
- En France : la tranchée est de la route menant de la nationale Givet-Vireux à Foisches.

**Âge :** Givétien.

**Utilisation :** les pierres concassées des carrières de Beuraing ont anciennement été exploitées pour les fours à chaux.

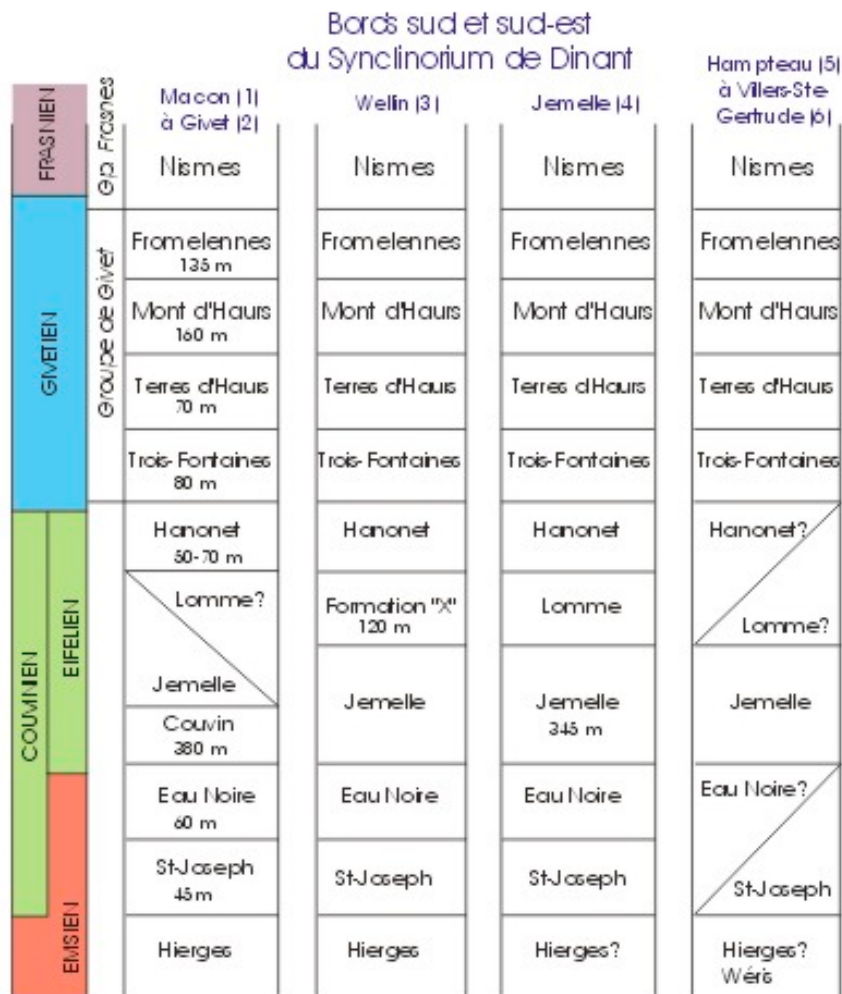


Fig. 20: Les formations du Dévonien Moyen de la Belgique. D'après Bultynck et al 1991.

## Synthèse géologique

La mine se trouve dans le Givétien.

La surface qui affleure est bien la formation de Trois Fontaines. Confirmation par les roches trouvées in situ mais des échantillons trouvés dans les haldes confirmeraient aussi les trois autres formations du Givétien (Fromelennes, Mont d'Haus et Terres d'Haus).

A ce stade, on peut certifier que la mine se trouve bien dans la formation de Trois Fontaines. Mais il reste la possibilité de contact avec la

formation des Terres d'Haus et du Mont d'Haus comme au niveau du Castel St Pierre et ce Castel est à un jet de pierre de la mine.

L'épaisseur de la formation de Trois Fontaines est assez conséquente, environ 70 à 80 m à Givet mais elle n'est plus que de 30 m à Beauraing. Nous savons que le puits a dépassé cette profondeur (estimation +/- 50 m) et il y a le pendage des roches qui est assez faible.

Autour de 1918 la famille Culot-Durbecq a entrepris une dernière tentative de réouverture de la galerie souterraine. Ils ont réouvert le vieux puits sans découvrir la veine. Dans une galerie

horizontale, ils ont trouvé une couche argileuse mince entre deux couches de calcaire. (De mijn van Beauraing, R De Nul, Geonieuws mars 2006) Les joints argileux sont fréquents dans la formation des Terres d'Haus.

La mine de Beauraing, (le puits), se trouve dans le Givétien et plus particulièrement dans la formation de Trois Fontaines. Il est certain que la formation des Terres d'Haus apparaît sporadiquement autour du puits et est au contact de la formation de Trois Fontaines ou que la profondeur du puits a dépassé la formation de Trois Fontaines.

Les renseignements et chiffres actuels ne permettent pas de confirmer une des hypothèses.

Pour en être certain, il faudrait pouvoir descendre dans le puits et analyser la roche présente dans les différentes galeries et aux différentes profondeurs.

Toutefois, une heureuse récolte de fossiles et une étude approfondie de ceux-ci nous permettent d'aller plus loin dans les formations géologiques présentes sur le site.

## Paléontologie

### Introduction

#### Comment déterminer un fossile?

##### Question simple mais réponse complexe.

Je vais commencer cette partie de l'étude paléontologique de la mine de Beauraing par une petite digression en posant une question simple.

Pourquoi vouloir systématiquement toujours donner un nom aux choses qui nous entourent?

Donner un nom, c'est établir une identité. C'est une façon de donner une "réalité" à quelqu'un ou à quelque chose. Autrement dit, si je détermine une chose et que je lui donne un nom, je concrétise sa définition. Tout devient une entité distincte, identifiée par son propre nom. Par cela vous lui désignez ses attributs spéciaux et vous la différenciez des autres choses en soulignant l'espace qui l'entoure.

Le pouvoir de donner un nom à quelque chose est un pouvoir de possession. Je donne un nom à

une chose, j'en connais ses attributs, je la possède, si pas physiquement, au moins mentalement.

#### Mais est-ce cela le plus important?

Je pense qu'il faudrait toujours avoir le courage de ne pas donner le nom des choses ou tout au moins de s'empêcher de commencer par donner le nom d'une plante, d'un oiseau, d'un insecte, d'un fossile. Ces noms que nous connaissons et avons beaucoup de mal à ne pas étaler. Car, dans le fond, c'est à nous-mêmes que nous faisons plaisir en nommant les choses! C'est une manière, inconsciente bien souvent, de montrer que l'on sait, que c'est "notre domaine", "notre rayon", bref que nous sommes les spécialistes. Rarement, la dénomination exhaustive rencontrera l'intérêt réel du public et surtout des enfants! Quel est pour eux l'intérêt du nom spécifique de "*Cerambyx cerdo*" (pour le Grand Capricorne du Chêne), de "*Desquamatia subzonata*" (pour un brachiopode de l'Eifelien), "*d'accenteur mouchet*" (pour un oiseau) ou que sais-je encore? De toute façon, 30 secondes plus tard, beaucoup l'auront oublié.

Dans le cas qui nous occupe, bien plus important est le lien qui va se créer entre les fossiles ayant vécu dans un même milieu : j'ai envie de parler ici de paléoécologie.

La détermination d'un fossile reste malgré tout le problème de base auquel tout paléontologue (amateur ou professionnel) est tôt ou tard confronté.

Pour certains fossiles, du premier coup d'œil, on sait de qui il s'agit tandis que pour d'autres (et ils sont nombreux !!), on ne trouve leur identité qu'après une longue enquête policière... et même après cette recherche minutieuse, on reste parfois bloqué devant une famille, un genre (si on a de la chance) et parfois même, frustration ultime, on reste avec un inconnu dans les mains.

Nous devons aussi être conscients que l'identification des fossiles devient de plus en plus compliquée au fur et à mesure qu'on s'éloigne des organismes récents (du "connu"). Les groupes éteints sont, naturellement, parmi les moins connus.

Notons aussi que certains fossiles (très typiques) ne se rencontrent que dans une seule couche. Si on connaît la couche et qu'on le découvre, on sait d'office de quel fossile il s'agit et si on trouve ce fossile, on sait d'office dans quelle couche on se situe. Ces fossiles sont dits "marqueurs de couches".



Fig. 21: *Calceola sandalina*. Coll. et photo : L. Van Bellingen.

C'est le cas de *Calceola sandalina*, petit corail solitaire muni d'un opercule, qui ne se trouve que dans le Dévonien, Eifelien, Formation de Couvin.

Avant de commencer, quelques considérations préliminaires sont à prendre en compte :

Ne pas s'intéresser à la couleur du fossile. En effet, le processus de fossilisation a transformé les parties dures de l'animal, en roche en recristallisant les minéraux présents dans les environs immédiats du fossile. Cette modification chimique a éliminé les couleurs d'origine et la minéralisation qui a suivi a pompé dans le milieu ambiant les minéraux pour former le fossile. Donc, la couleur du fossile sera en rapport avec son environnement immédiat (= roche encaissante).

Pour réussir à déterminer le fossile, nous aurons recours à des ouvrages de référence : livres, encyclopédies, répertoires, atlas... Des clés de détermination existent aussi, la plupart réalisées avec soin, par des gens très compétents, voire même par des spécialistes en la matière. Souvent, ces documents sont richement illustrés par des photos ou des dessins. Les illustrations (photos ou dessins) constituent une aide précieuse mais peuvent être insuffisantes ou ambiguës.

Les dessins sont souvent idéalisés et, dans la plupart des cas, présentent le fossile en position de vie. Ces images ne ressemblent pas forcément au fossile que vous voulez déterminer. En effet, votre fossile a été enfoui sous des centaines voire des milliers de mètres de sédiments. Il peut avoir

été écrasé par la pression. De plus, il a subi les affres des mouvements tectoniques qui ont pu le déformer à souhait.

Les photos présentent le fossile dans sa réalité. Selon les régions où ils ont été découverts, ils n'ont pas forcément subi un enfouissement identique et ils n'ont pas subi les mêmes mouvements tectoniques et donc n'ont pas été déformés de la même manière. La photo, si elle a le mérite de présenter le fossile dans sa réalité biologique, propose une image parfois bien éloignée du fossile que vous voulez déterminer.

Tout cela est magnifique mais bien souvent, l'amateur se retrouve avec différents livres qui proposent différentes photos et différents dessins d'une même espèce. Et bien souvent, on a bien du mal à se persuader que toutes ces photos et tous ces dessins ne sont en fait qu'une seule et même espèce. Les couleurs étant différentes, les déformations, les écrasements ayant pris des directions différentes, nous avons devant nous des fossiles qui ne semblent pas se ressembler et qui ne ressemblent pas vraiment à ce que nous avons découvert.

Donc et avant tout, c'est une description scientifique précise du fossile qui est toujours à la base de toute détermination.

## Méthodologie employée pour déterminer les fossiles présentés

### Je sais de quel fossile il s'agit.

Il est très commun et présent tout au long d'un étage, d'une série, d'une formation. Il s'agit de ...

Il est très commun et est connu pour être un fossile marqueur de couche. Il s'agit de.....

### Je ne connais pas ce fossile. L'enquête policière peut commencer...

Compilation de toutes les informations géologico-géographiques relatives au fossile découvert :

Détermination très précise du lieu géographique où a été récolté le fossile et notation de cet endroit sur une carte d'Etat-majior.

Mise de ce lieu en rapport avec la carte géologique et détermination de la couche géologique qui affleure à cet endroit.

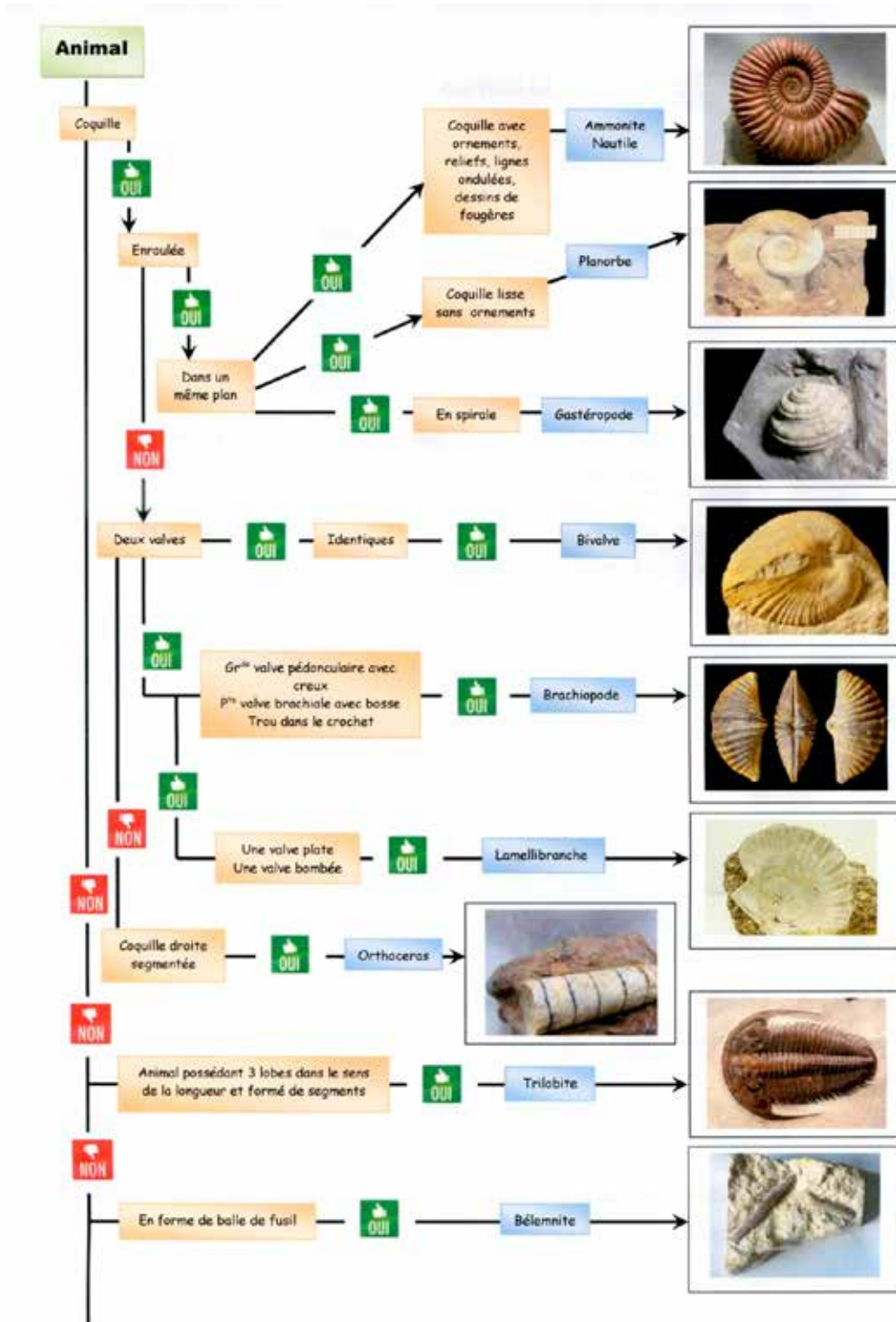
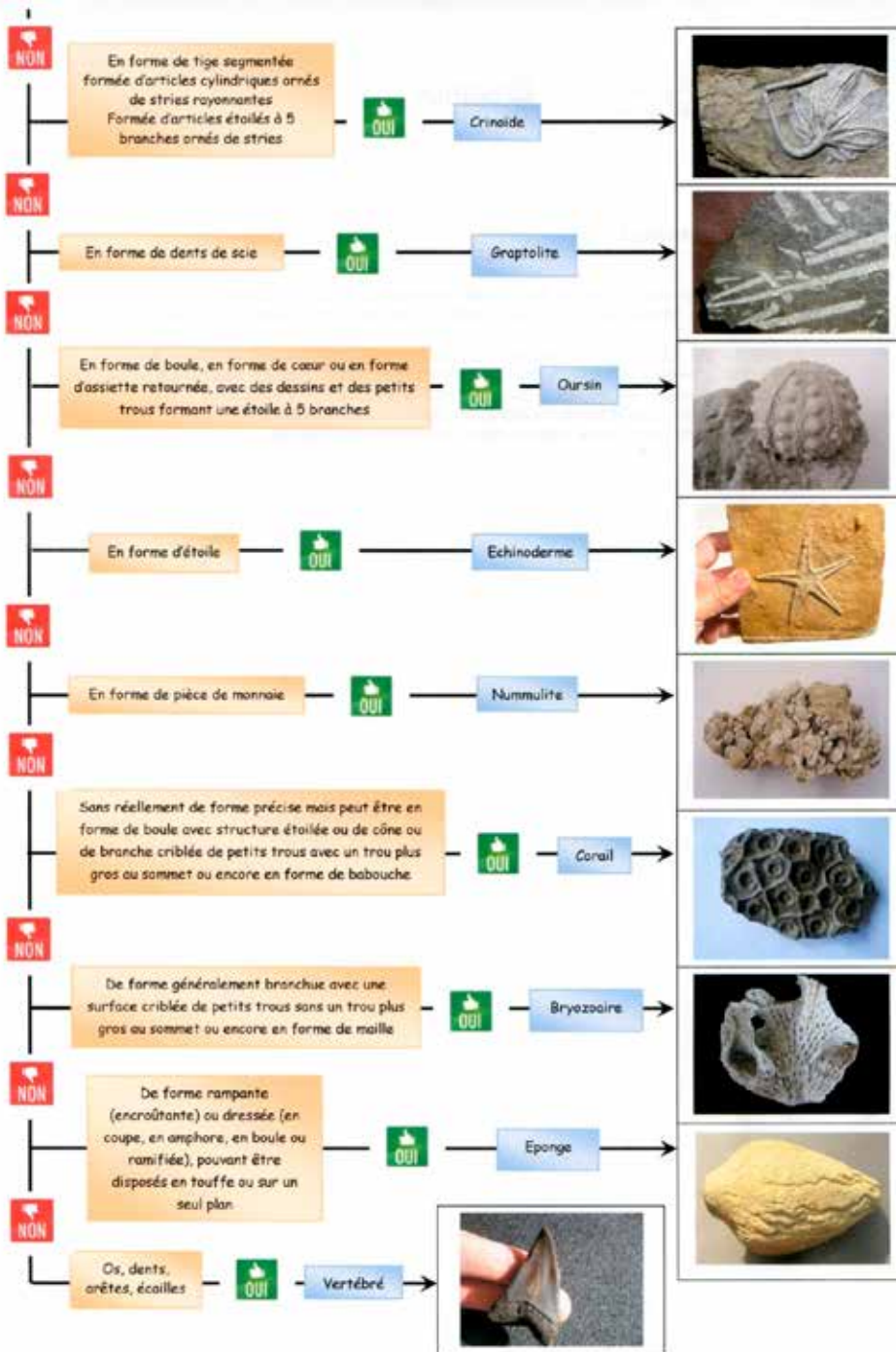


Fig. 22: Grille de détermination (Luc Van Bellingen).



Recherche dans la littérature de tout ce qui concerne cette couche géologique : type et description de la roche, âge, liste aussi exhaustive que possible et description des fossiles déjà découverts dans cette couche (ici mais aussi ailleurs, là où cette couche affleure dans la région).

Ces renseignements récoltés, nous pouvons passer à l'étape suivante : dégrossir le travail avec une clé de détermination.

Remarque : Cette grille ne s'applique qu'à la situation présentée. Pratiquement toute autre collection de fossiles nécessiterait une grille modifiée/adaptée.

Maintenant que nous connaissons :

Le lieu.

La position stratigraphique.

Grâce à la clé de détermination, le "groupe" auquel appartient le fossile, nous pouvons tenter de le déterminer.

La liste des fossiles découverts dans cette couche.

Nous pouvons tenter de comparer les descriptions avec notre fossile.

N'oublions pas d'utiliser toutes les sources de renseignements possibles :

Documents rédigés par des professionnels ou des amateurs comme, fascicules, dossiers, études, livres de vulgarisation, atlas de déter-

mination, guides géologiques... et ... ne boudons pas notre plaisir, Internet...). Il faut comparer les descriptions avec dessins, les photos avec le fossile trouvé.

Cette fois, on touche au but. Les alibis sont vérifiés un à un et les suspects innocentés les uns après les autres.

Enfin, après avoir éliminé tout ce qui était improbable, il va me rester, si j'ai de la chance, une seule possibilité dont la description, le dessin et la photo cadrent avec le fossile découvert. J'ai donc un nom de genre et si j'ai de la chance, un nom d'espèce. Le coupable est cerné et identifié.

## Fossiles découverts

Tous les fossiles décrits dans ce paragraphe ont été découverts dans les haldes de la mine.

### *Thamnopora cervicornis* (Blainville 1830) (Fig. 23-24)

#### Description

Corail colonial tabulé qui montre une forme de ramification arborescente en corne de cerf d'où son nom. Abondant dans le monde entier au cours du Dévonien il possède une structure ramifiée où ont vécu de nombreux petits polypes qui utilisaient leurs tentacules pour attraper et amener de petites particules de nourriture à leur bouche. Ces tentacules étaient disposés dans un anneau autour de la bouche. Chaque polype est logé dans un calice de 1 à 1,5 mm de diamètre avec des parois assez épaisses portant des pores. Les calices sont ouverts à angle droit à la surface de la colonie.

#### Appartenance stratigraphique

Givétien, Formation des Terres d'Haus (THR) : Calcaires argileux foncés qui semblent à première vue un peu gréseux ou finement dolomitiques et qui sont en réalité des calcaires à péloïdes parfois crinoïdiques avec *Spirifer mediotextus*, *Disphyllum*, *Cyathophyllum*.



Fig. 23: *Thamnopora cervicornis*. Coll L Van Bellinghen. Trait jaune = 1cm. Photo : G Ruelle.





Fig. 24: *Thamnopora cervicornis*, détail. Coll L Van Bellingen. Trait jaune = 1cm. Photo : F Van Troyen.



Fig. 25: *Favosites basalticus* Coll L Van Bellingen. Trait jaune = 1cm. Photo : F Van Troyen.

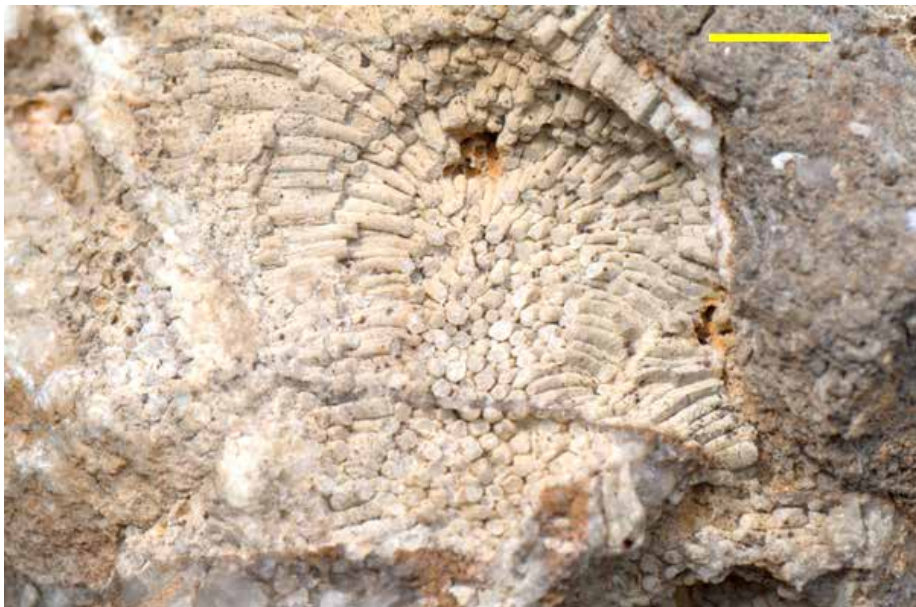


Fig. 26: *Favosites basalticus*, détail. Coll L Van Bellingen. Trait jaune = 1cm. Photo : F Van Troyen.

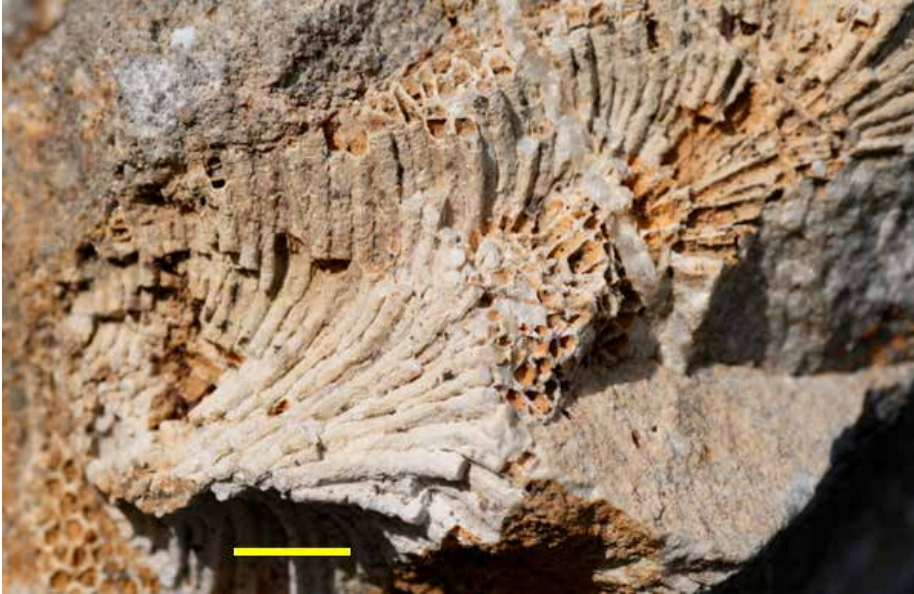


Fig. 27: *Favosites basalticus*, détail. Coll L Van Bellingen. Trait jaune = 1cm.  
Photo : F Van Troyen.

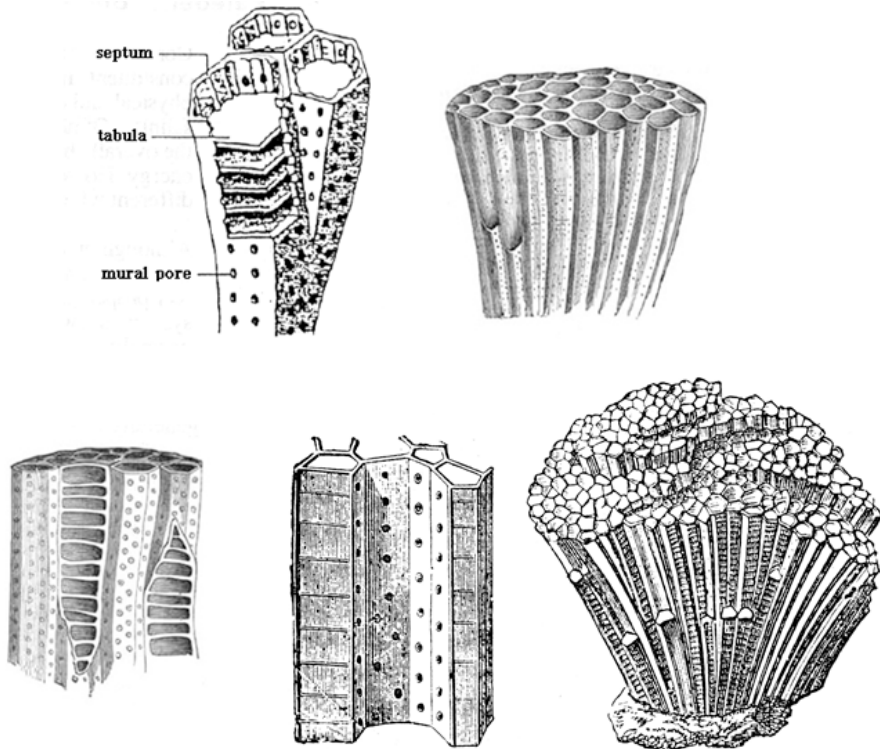


Fig. 28: Mix d'images provenant de "Common Devonian Fossils" Clipart. Source: Taylor, J. E. Geological Stories (London, England: Gibbings & Company, Limited, 1904).



Fig. 29: *Gyrophyllum* sp, Coll L Van Bellingen. Trait jaune = 1cm. Photo : F Van Troyen.



Fig. 30: *Gyrophyllum* sp, Coll L Van Bellingen. Trait jaune = 1cm. Photo : F Van Troyen.



Fig. 31: *Cystiphyllum vesiculosum*, Coll L Van Bellingen. Trait jaune = 1cm. Photo : F Van Troyen.

### ***Favosites basalticus* (Goldfuss 1826)**

(Fig. 25 - 28)

#### **Description :**

Corail colonial formant des colonies en masses arrondies. Polypier massif ou branchu, formé de polypières en colonnes, à section le plus souvent hexagonale, dont les parois sont percées de pores éloignés les uns des autres. Planchers horizontaux placés à des distances égales. Cloisons rudimentaires, remplacées par des stries longitudinales ou des séries d'épines.

Ressemble à s'y méprendre aux colonnes de basalte d'Auvergne ou d'Islande (d'où son nom *Favosites basalticus*).

#### **Appartenance stratigraphique**

Givétien, Formation des Terres d'Haus (THR) : Calcaires argileux foncés qui semblent à première vue, un peu gréseux ou finement dolomitiques et qui sont en réalité des calcaires à péloïdes parfois crinoïdiques avec *Spirifer mediotextus*, *Disphyllum*, *Cyathophyllum*.

### ***Gyrophyllum* sp.** (Fig. 29 - 30)

#### **Description**

11 espèces et sous espèces du genre *Disphyllum*, *Dohmophyllum*, *Heliophyllum*, *Gyrophyllum* et *Mesophyllum* ont été décrites dans le Dévonien européen et 7 d'entre elles sont spécifiques au Givétien.

Polypier simple, rugueux, cylindrique à subcylindrique, calice peu profond; cloisons bien exprimées, nombreuses, fines et longues atteignant le centre.

Malheureusement, n'ayant pas accès à l'entièreté du fossile, il ne nous est pas permis d'en déterminer l'espèce. Nous nous contenterons du genre. Ici, nous sommes en présence de quelques spécimens de *Gyrophyllum* sp.

#### **Appartenance stratigraphique**

Givétien, Formation des Terres d'Haus (THR) : Calcaires argileux foncés qui semblent à première vue, un peu gréseux ou finement dolomitiques et qui sont en réalité des calcaires à péloïdes parfois crinoïdiques avec *Spirifer mediotextus*, *Disphyllum*, *Cyathophyllum*.



Fig. 32: Empreinte de coquille indéterminée. Coll L Van Bellinghen. Trait jaune = 1cm. Photo : G Ruelle.

### ***Cystiphyllum vesiculosum* (Goldfuss 1826)**

(Fig. 31)

#### **Description**

Polypier simple, en forme de cône ou de corne ou subcylindrique avec calice profond à l'intérieur duquel les cloisons bien exprimées atteignant le centre et les formations endothèques vésiculeuses sont disposées verticalement et radialement, de sorte que les rangées les plus supérieures forment des bandes endothèques. L'extérieur montre des stries verticales et des stries horizontales de croissance.

#### **Appartenance stratigraphique**

Givétien, Formation des Terres d'Hairs (THR) : Calcaires argileux foncés qui semblent à première vue, un peu gréseux ou finement dolomitiques et qui sont en réalité des calcaires à péloïdes parfois crinoïdiques avec *Spirifer mediotextus*, *Disphyllum*, *Cyathophyllum*.



Fig. 33: Fragment de tige de crinoïde. Coll L Van Bellinghen. Trait jaune = 1cm. Photo : F Van Troyen.

## Empreinte de coquille (Fig. 32)

### Description

Que peut-on observer sur cette empreinte? Elle est de forme subcirculaire et porte des côtes radiales. Les animaux portant ce genre de caractéristiques à cette époque, sont les Bivalves et les Brachiopodes.

Parmi les brachiopodes on peut distinguer 4 groupes principaux : les Spiriféridés, les Atrypidés, les Orthidés et les Rhynchonellidés.

La plupart des Spiriféridés sont plus longs que larges et ont une forme élancée (tout le monde connaît le *Spirifer verneuilli*)... bien que certains d'entre-eux soient globuleux, de forme presque circulaire.

Les Atrypidés et les Orthidés pourraient coller à la description.

Les Rhynchonellidés que j'ai rencontrés jusqu'à présent étaient de taille plus modeste mais rien ne dit qu'un chercheur n'en ait pas trouvé de plus gros.

En conclusion, nous ne pouvons rien dire à propos de cette empreinte si ce n'est que ce peut être un bivalve ou un brachiopode.

### Appartenance stratigraphique

Givétien, Formation du Mont d'Hairs (MHR) : Calcaires biostromaux massifs à *Stringocephalus burtini*, *Alveolites*, *Favosites*, *Disphyllum*, *Cyathophyllum*

## Fragment de tige de crinoïde (Fig. 33-35)

### Description

Nous observons une superposition de disques appelés couramment "articles": les plaques columnales. Les plaques sont perforées en leur centre et l'ensemble de ces perforations donnent un canal axial dans lequel passe un axe nerveux. La tige est longue en général de quelques décimètres.

Il est très complexe, voire impossible de déterminer un crinoïde sur base d'une section de tige ou de bras car les descriptions se basent habituel-



**Fig. 34:** Fragment de tige de crinoïde. Coll L Van Bellingen. Trait jaune = 1cm.  
Photo : F Van Troyen.

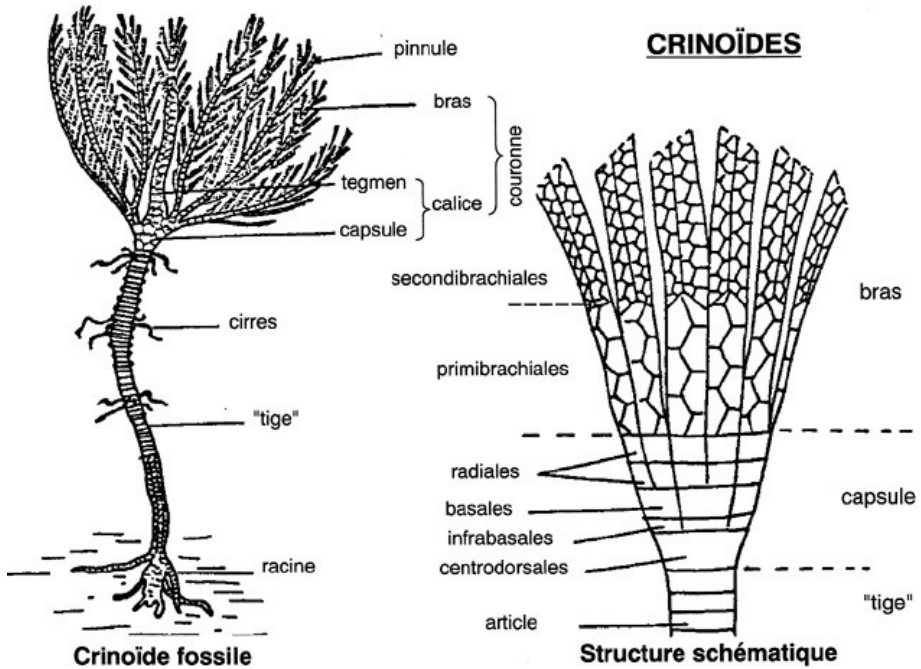


Fig. 35: Structure schématique d'un crinoïde <http://www.fossilraptor.be/crinoides>

lement sur les calices, les bouches, les anus et les systèmes d'ancrage.

En conclusion, nous dirons simplement que c'est un crinoïde indéterminé.

**Appartenance stratigraphique**

Givétien, Formation des Terres d'Hauts (THR) : Calcaires argileux foncés qui semblent à première vue, un peu gréseux ou finement dolomitiques et qui sont en réalité des calcaires à péloïdes parfois crinoïdiques avec *Spirifer sp*, *Disphyllum*, *Cyathophyllum*.

***Spirifer mediotextus* (Verneuil 1842)**  
(Fig. 36)

**Description**

Nous n'avons accès qu'à une valve et l'état de conservation n'est pas optimal. Néanmoins, nous pouvons observer une coquille de taille moyenne (jusqu'à 20 mm de long) à contour ovale rarement fort allongée transversalement, plutôt triangulaire à trapézoïdale. Bord cardinal droit, plus ou moins long. Area de la valve ventrale triangulaire, souvent ornées de lignes verticales

et horizontales. Crochet proéminent et incurvé. Le sillon et le pli sont modérément développés. L'intérieur du sillon est lisse tandis que le reste de la coquille est orné simplement de fines côtes radiales peu profondes.



Fig. 36: *Spirifer mediotextus*. Coll L Van Bellingen. Trait jaune = 1cm. Photo : G Ruelle.

### Appartenance stratigraphique

Givétien, Formation des Terres d'Hauts (THR) : Calcaires argileux foncés qui semblent à première vue un peu gréseux ou finement dolomitiques et qui sont en réalité des calcaires à péloïdes parfois crinoïdiques avec *Spirifer mediotextus*, *Disphyllum*, *Cyathophyllum*...

### Mais que s'est-il donc passé au Givétien ?

Au Dévonien Inférieur et probablement dès le sommet du Silurien, la mer reprend possession du domaine ardennais nivelé par l'érosion. Les différentes transgressions marines d'origine méridionale (Océan Rhéique) progressent vers le nord.

A l'aube du Dévonien Moyen, un régime transgressif plus homogène et constant s'installe. Les faciès terrigènes cèdent la place à des faciès argilo-calcaires et aux premiers calcaires construits. La mer progresse toujours vers le nord mais n'atteint pas encore le Parautochtone

brabançon qui reste un domaine continental. Nous sommes en présence d'une rampe à sédimentation mixte.

Ref : " Une introduction à la géologie de la Wallonie " F Boulvain, J-L Pingot 2015 (Fig. 37).

Le Givétien prolonge la deuxième grande pulsation transgressive dévonienne entamée au cours de l'Eifélien. La mer s'avance sur une plate-forme peu profonde. Le littoral gagne le Parautochtone brabançon.

Les apports terrigènes très réduits, d'origine septentrionale, indiquent que le Continent des Vieux Grès Rouges est pratiquement aplani. Cette transgression, tout comme la précédente, progresse en direction du NNE.

Après le comblement du lagon (récif-barrière) et le développement de vastes complexes marécageux à laminites algaires caractérisant le sommet de la Formation de Trois-Fontaines, la sédimentation reprend lors d'une hausse du niveau marin. Nous sommes en présence d'un climat tropical humide.

La Formation des Terres d'Hauts témoigne d'une ouverture du milieu et se caractérise par des

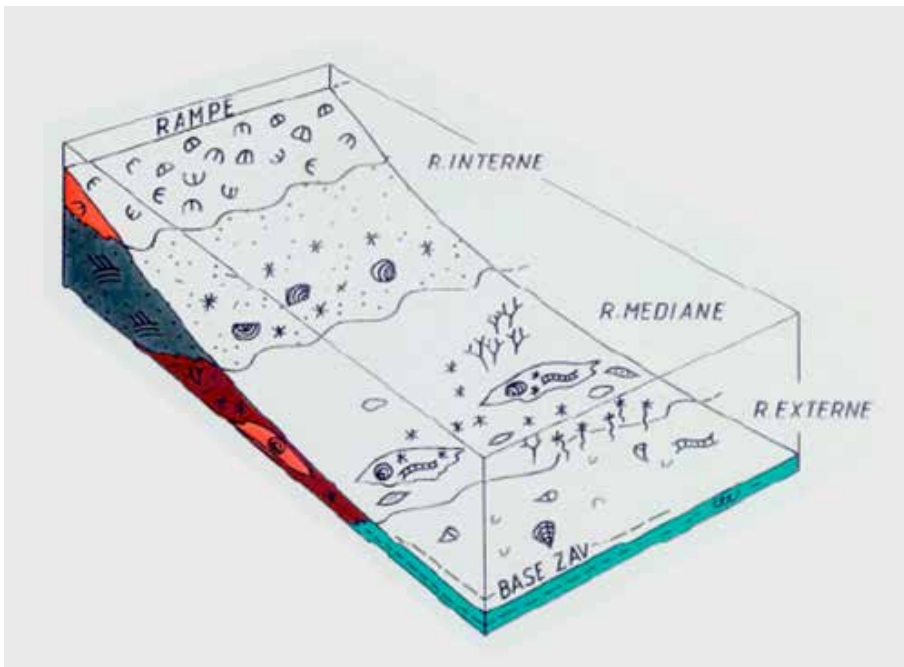


Fig. 37: D'une rampe à une plate-forme, à l'aube du Dévonien moyen. " Le Givétien franco-belge " A Preat 2006 Ed BRGM-SGF.





Fig. 38: D'une rampe à une plate-forme, au Givétien inférieur. " Le Givétien franco-belge " A Preat 2006 Ed BRGM-SGF.

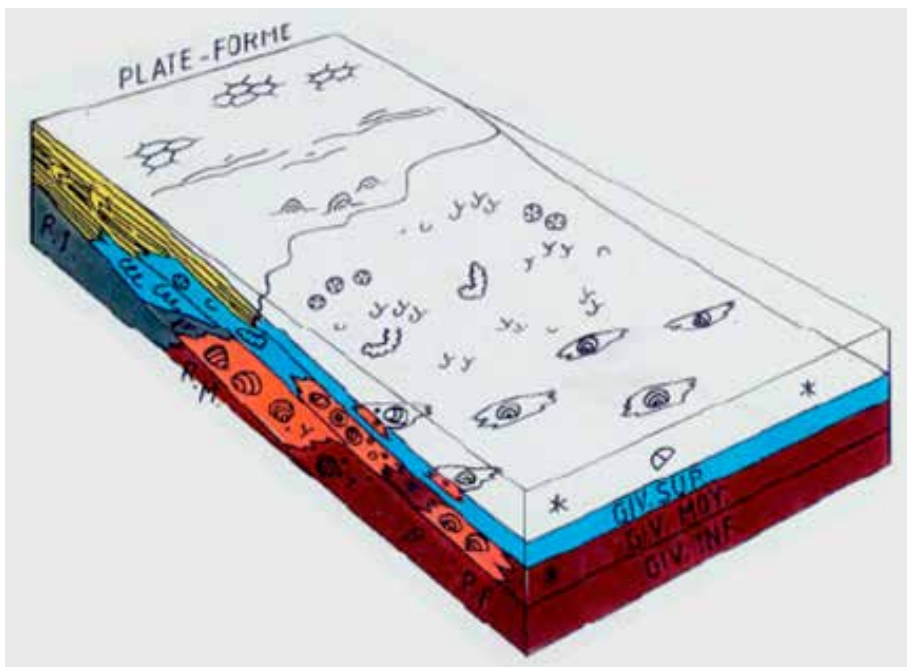


Fig. 39: D'une rampe à une plate-forme, au Givétien supérieur. " Le Givétien franco-belge " A Preat 2006 Ed BRGM-SGF.

calcaires argileux, à terriers horizontaux, riches par endroit en crinoïdes, brachiopodes (parfois concentrés par les tempêtes en " lumachelles "), gastéropodes et niveaux coralliens.

La Formation du Mont d'Hairs se caractérise par une alternance de niveaux à coraux et stromatopores correspondant à des coulées de débris issues d'une barrière récifale située plus au nord et de calcaires fins, suivis de calcaires de milieu plus confiné (riches notamment en gastéropodes).

Ref : " Une introduction à la géologie de la Wallonie " F Boulvain, J-L Pingot 2015 (Fig. 38).

Le Givétien terminal montre un épisode régressif mineur qui ramène les faciès littoraux vers le sud. Au cours de cette période, le climat subit une évolution marquée depuis des conditions tropicales humides vers un milieu semi-aride (Boulvain & Préat, 1987).

L'environnement le plus représentatif est celui d'un lagon. Dans ce milieu, pouvant être particulièrement abrité, les eaux sont alors sursalées et au niveau du fond, les végétaux (algues) sont réducteurs. Leur isolement de l'influence marine est insuffisamment durable pour que de véritables précipités salins s'y développent. En conséquence, aucun faciès évaporitique franc, ni aucune dolomie primaires n'ont pu être mis en évidence.

Ref : " Une introduction à la géologie de la Wallonie " F Boulvain, J-L Pingot 2015 (Fig. 39).

## Minéralogie

### Sphalérite (Fig. 40 - 45)

Très courante, elle est souvent cristallisée et imbriquée dans les veines de calcite qui parcourent le calcaire givétien. Certains cristaux sont très altérés et s'effondrent au moindre contact, d'autres sont de véritables cadeaux de dame nature. Des cristaux exceptionnels de plusieurs centimètres peuvent être trouvés. La couleur des cristaux est un brun lumineux, brun-jaunâtre, jaune, orange et même lie de vin pour les plus petits. Les plus gros cristaux sont noirs mais lorsqu'on les regarde de plus près, ils ne sont pas vraiment noirs mais plutôt sombres



Fig. 40: Mini cristaux de sphalérite et galène. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : G Ruelle.

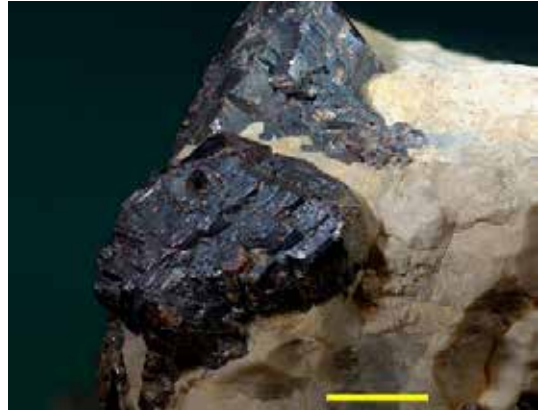


Fig. 41: Sphalérite. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : G Ruelle.

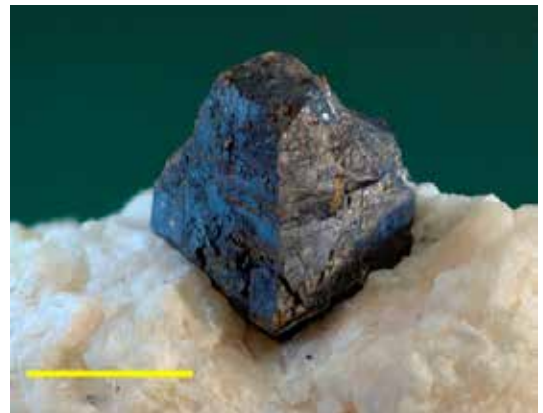


Fig. 42: Tétrahédre de sphalérite. Coll F Van Troyen. Trait jaune = 1cm. Photo : G Ruelle.



Fig. 43: Sphalérite "au cœur d'or". Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



Fig. 45: Sphalérite tétraédrique. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



Fig. 44: Sphalérite gemme. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.

et translucides. La plupart des cristaux "frais" ont un éclat résineux et brillent comme le diamant. La formule chimique de base est  $ZnS$ . Selon Dimanche et al. (1979), une analyse chimique de la sphalérite de Beuraing a donné les valeurs suivantes: Zn (60%), Fe (6,75%), Cd (0,85%). (Minéralisations plombo-zincifères belges Minéralogie-Gitologie-Minéralurgie F Dimanche, C Ek, J Frenay Annales de la Société Géologique de Belgique, T.102-1979, pp.417-429). C'est le fer qui donne la couleur jaune à brun à la sphalérite et à des concentrations très élevées elle devient même noire (variété marmatite) On peut donc dire que ces différentes sphalérites ont probablement différentes genèses dont certaines plus riches en fer. La sphalérite a une structure cubique. Presque

tous les cristaux de sphalérite de Beuraing forment des agrégats de cristaux complexes où il est difficile de reconnaître la forme de base des cristaux individuels. On trouve beaucoup de cristaux jumeaux et des agrégats qui présentent des déformations caractéristiques de la sphalérite avec des nervures et des surfaces qui donnent aux cristaux un aspect arrondi. Les formes les plus fréquentes sont des tétraèdres et des rhombodécaèdres aux combinaisons multiples.

### Galène (Fig. 46 - 52)

Pour une mine dite de plomb, celle-ci est assez rare. On la trouve en petits cubes et plus rarement en octaèdre. Quelques cristaux centi-



Fig. 46: Galène "flottante". Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



Fig. 47: Galène et sphalérite. Trait jaune = 1cm Coll et phot : F Van Troyen.

métriques ont été découverts mais cela reste exceptionnel ! On peut la trouver en association avec la calcite, la sphalérite et la smithsonite. Nous avons découvert sous les halde, au niveau du petit filon en place, des petits cristaux de type cubique, libres dans l'argile. Cristaux flottants ? Notre hypothèse, malheureusement non vérifiable pour le moment, est la suivante : Nous avons remarqué en nettoyant certains échantillons au Karcher que l'eau sous pression décollait certaines galènes au niveau de la couche d'hydrocérusite présente entre la gangue et la galène. Nous pensons donc que ces cristaux ont été arrachés à cause de la fragilité de la couche



Fig. 48: Galène cubique. Trait jaune = 1cm Coll F Van Troyen, photo G Ruelle.

d'hydrocérusite et qu'ils ont migré grâce aux fortes infiltrations d'eau. Ces cristaux se sont ensuite retrouvés piégés dans l'argile. Leur migration a été stoppée car l'argile ne laisse pas passer l'eau.

### Baryte (Fig. 53 - 56)

La présence de baryte n'est pas surprenante, car Denaeyer la mentionne comme " greffon " constitutionnel de la gangue dans l'un des récifs. Elle apparaît massive et fragile. Les formes cristallines sont très rares. Un échantillon de baryte crêtée a été découvert en association avec de la fluorite jaune. Elle est encore plus rare en cristaux lamellaires transparents. Un échantillon a été découvert en association avec la calcite.

### Fluorite (Fig. 57 - 60)

Très très rare, elle a été découverte en petits cubes parfaitement incolores et transparents. Quelques blocs ont permis la découverte de cubes jaunâtres en association avec la baryte et souvent avec des prismes de calcite. Le plus grand cube atteint presque le centimètre.

### Pyrite et Marcassite (Fig. 61 - 63)

La pyrite est très rare à Beauraing. Les cristaux sont encore petits et discrets, mais heureusement, il est facile de les identifier car elle se forme en petits cristaux cubiques.

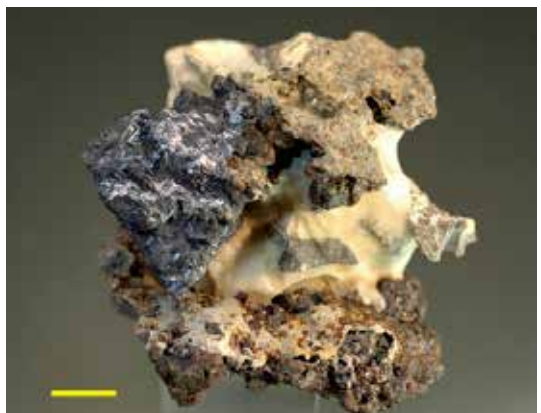


Fig. 49: Galène cubique. Trait jaune = 1cm Coll F Van Troyen, photo : G Ruelle.



Fig. 50: Galène cubique. Trait jaune Coll et photo : G Ruelle.



Fig. 51: Galène, baryte, fluorite et calcite. Trait jaune Coll MnhnL, photo : G Ruelle.



Fig. 53: Baryte crêtée et fluorite. Coll F Van Troyen, Trait jaune = 1cm. photo : G Ruelle.



Fig. 52: Galène octaédrique. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo : G Ruelle.



Fig. 54: Baryte crêtée, détail. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



**Fig. 55:** Calcite hexagonale sur baryte. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



**Fig. 56:** Calcite hexagonale sur baryte, détail. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



**Fig. 57:** Fluorite. Trait jaune = 1cm. Collet photo : F Van Troyen.

Elle se présente également en stalagmites recouvrant des cristaux de calcite, identifiée par M Blondieau par rx.

Il s'agit dans ce cas d'un mélange pyrite – marcassite où la pyrite prédomine.

## Calcite (Fig. 64 - 72)

C'est le minéral le plus abondant à Beuraing. Des scalénoèdres de 10 centimètres ont été découverts. On en trouve très souvent mais malheureusement, ils sont endommagés.

Des scalénoèdres de quelques centimètres sont courants. L'habitus rhomboédrique est très rare. Avec beaucoup de chance, on découvrira des



**Fig. 58:** Fluorite. Coll F Van Troyen, Trait jaune = 1cm. photo : G Ruelle.

calcites prismatiques. Le prisme hexagonal sera assez souvent associé à la fluorite.

Des formes arrondies sont présentes et relativement esthétiques.

## Quartz (Fig. 73)

Le quartz se forme en cristaux microscopiques dans la gangue ou au contact de la brèche. Compte tenu de la très petite taille des cristaux, il est difficile à distinguer. Si nous voulons vraiment voir des cristaux, un microscope avec un grossissement élevé est nécessaire. Il est assez fréquent de découvrir de petits cristaux rouges de sphalérite sur un tapis gris de quartz.



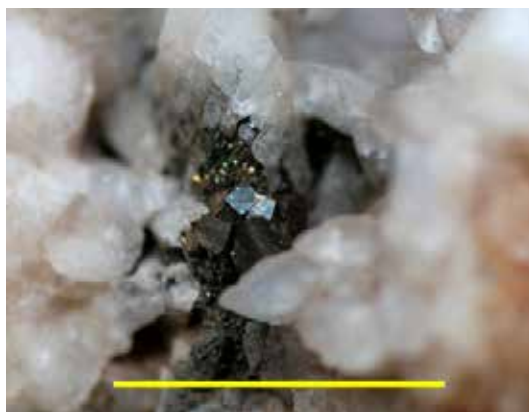
**Fig. 59:** Fluorite et calcite hexagonale. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo : G Ruelle.



**Fig. 60:** Fluorite incolore avec fantôme violet et calcite hexagonale. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



**Fig. 61:** Pyrite stalagmitique. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo : G Ruelle.



**Fig. 62:** Cubes de pyrite. Coll et photo : F Van Troyen.



**Fig. 63:** Cubes de pyrite. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



**Fig. 64:** Calcite scalénoédrique. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo : G Ruelle.



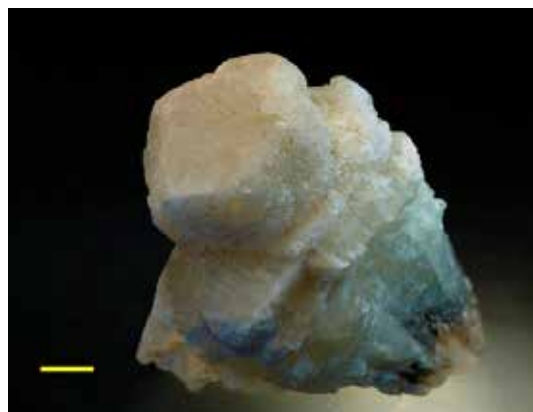
**Fig. 65:** Calcite rhomboédrique. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



**Fig. 66:** Calcite rhomboédrique. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo : G Ruelle.



**Fig. 67:** Calcite hexagonale. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo : G Ruelle.



**Fig. 68:** Calcite hexagonale. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo : G Ruelle.



**Fig. 69:** Calcite scalénoédrique. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo : G Ruelle.



**Fig. 70:** Calcite fantôme. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.





Fig. 71: Calcite hexagonale. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo : G Ruelle.



Fig. 72: Calcite scalénoédrique fantôme. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo : G Ruelle.



Fig. 73: Quartz. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



74: Smithsonite. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo : G Ruelle.

### "Sidérite"

Citée dans plusieurs littératures, elle n'est pas présente à Beauraing. Les taches brunes visibles dans le calcaire sont des inclusions d'argile.

### Smithsonite (Fig. 74 - 75)

La smithsonite, parfois appelée "pâte de zinc", se présente généralement en très petits globules dans la zone périphérique de la sphalérite. Ce carbonate de zinc est commun sur les haldes de la mine de Beauraing.

### Hydrocérusite (Fig. 76 - 78)

Il s'agit de la deuxième occurrence en Belgique. Jusqu'à présent, elle n'avait été recensée qu'à La

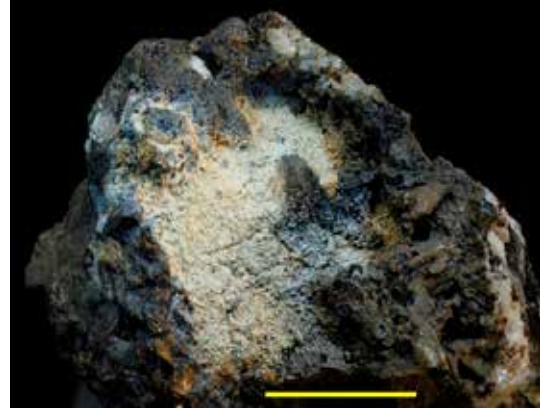
Roche-en-Ardenne. Le minéral doit certainement se trouver dans de nombreux gîtes Pb-Zn mais passe facilement inaperçu.

Ici, à Beauraing, les enduits blancs sur la galène sont assez spectaculaires.

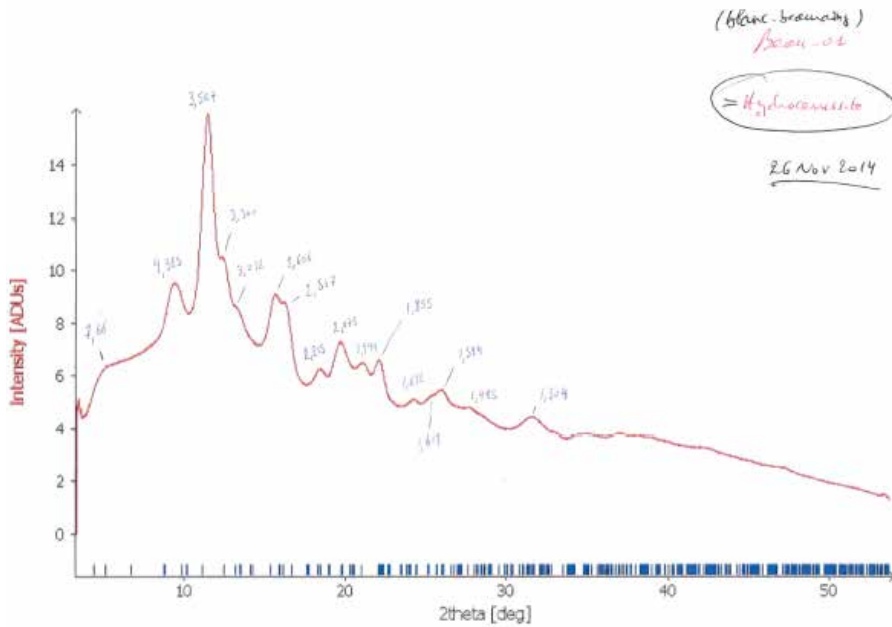
Michel Blondieau en a fait l'analyse en utilisant le diffractomètre à 4 cercles (Labo minéralogie ULB) permettant de faire des analyses par diffraction des RX quand on n'a pas beaucoup de matière. On remarquera sur les figures 77 et 78 que les positions des pics de l'hydrocérusite sont équivalents, par contre les intensités sont différentes. Cela s'explique par la mauvaise cristallisation de l'espèce.



**Fig. 75:** Smithsonite, détail. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



**Fig. 76:** Hydrocérusite. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo: G Ruelle.



**Fig. 77:**

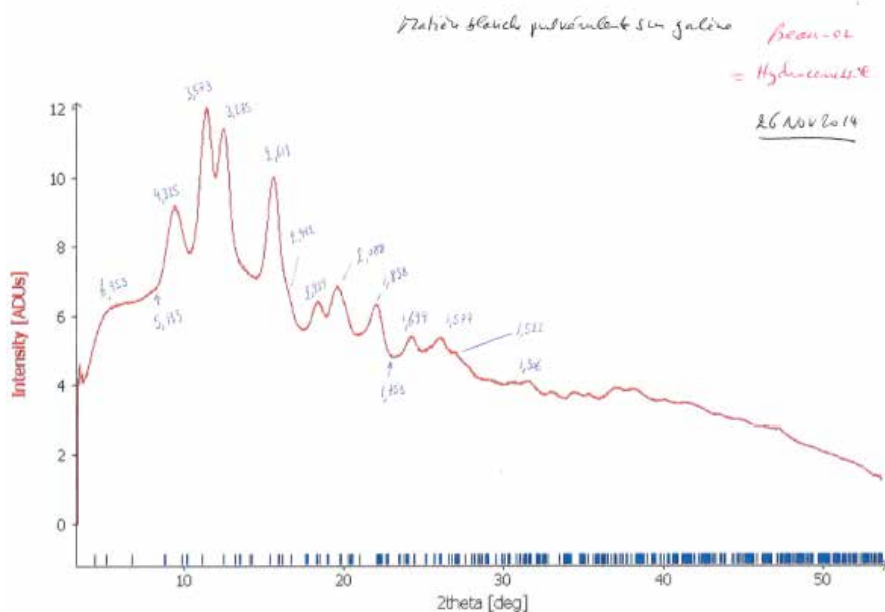


Fig. 78:

### Malachite (Fig. 79)

Très rare, On la trouve dans les blocs de calcite où elle a pris la place de la chalcopryrite, la malachite étant un produit d'oxydation de la chalcopryrite. La malachite est souvent simplement noyée dans la calcite et il n'y a aucune mention de la formation de cristaux. Heureusement, la couleur verte des taches dans la calcite trahit la présence de ce minéral. À ce jour, il n'existe aucun autre minéral vert trouvé dans cette localité.



Fig. 79: Malachite. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo : G Ruelle.

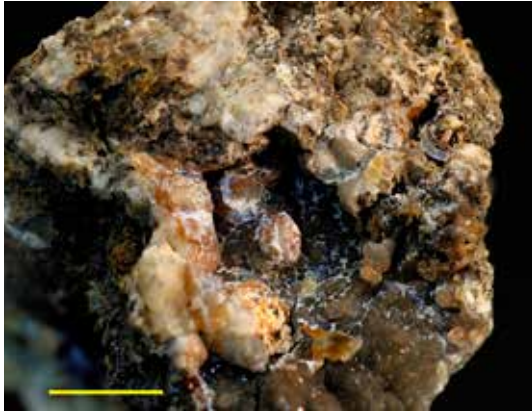
### Hydrozincite (Fig.80 - 81)

Rare, elle se présente en enduit blanchâtre à brunâtre. Elle a été identifiée par M Blondieau.

**Les minéraux suivants :** Cérusite, Chalcopryrite, Goethite, Muscovite, Soufre, Hémimorphite et Aragonite ont été signalés par R De Nul dans "De mijn van Beauraing, Namur, België " Geonieuws Mineralogische Kring Antwerpen V.Z.W 2006. Nous n'avons pas eu l'occasion de les observer.

### Nature du filon et minéralisation

En 1925, M-E.Denaeyer publie un article intitulé : "Sur un filon de galène et de blende dans le calcaire givétien de Beauraing (Namur)". Il donne ses conclusions après un examen approfondi de cette mine. En voici un extrait:



**Fig. 80:** Hydrozincite sur smithsonite. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo : G ruelle.



**Fig. 81:** Hydrozincite. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.

"Au Sud-ouest de Beauraing, sur le plateau entre la route de Javingue au nord, et la route de Givet au sud, on trouve ici et là, au milieu des zones de culture actuelles des zones avec une végétation affaiblie. Ces lieux sont parsemés de morceaux de calcaire qui, après un examen plus approfondi, montrent des inclusions de sphalérite et de galène. La recherche des anciennes mines, (en 1925, elles étaient toujours là) a donné des échantillons sur lesquels des géodes contiennent de la calcite cristallisée en scalénoèdres laiteux. La gangue entourant les vestiges des géodes est un calcaire gréseux, qui, pour la cristallisation de la sphalérite forme un point d'appui intéressant. Les études microscopiques de la surface des pierres à chaux dans les carrières environnantes conduit à la conclusion que les roches ont été initialement formées par un limon calcaire avec le quartz comme ciment et avec une forte teneur en matière organique."

Les gisements plombo-zincifères du Dévonien reliés au synclinorium de Dinant ont été étudiés par le passé et ont fait l'objet d'analyses poussées notamment par Cauet, Dejonghe et Letolle(1996).

Ces filons, d'après la littérature publiée, sont des filons bréchiques de remplissage de failles formées lors de l'orogénèse varisque (hercynienne). Ils se concentrent dans la partie Sud du synclinorium de Dinant, dans le Frasnien et le Givétien.

Il est intéressant de confronter ces conclusions avec les observations effectuées sur le terrain à la fois à partir des échantillons prélevés dans les haldes existantes et également de l'examen d'un petit filon secondaire découvert en place sous les mêmes haldes.

## Observations (haldes)

La roche locale de surface est un calcaire à grains fins, érodé, typique du Givétien (Fig. 82).

**Nos observations nous permettent de dire que :** les fragments de roche encaissante ou d'éponte présentent au moins deux aspects au contact de la gangue du filon: soit un bord net sans transformation de la roche mère (Fig. 83), soit une métasomatose assez importante avec disparition des fossiles existants et imprégnation de petits cristaux de galène (Fig. 84).

Absence de salbande, ceci est confirmé par l'examen du petit filon secondaire (voir ci-dessous, observations filon secondaire).

La gangue est assez épaisse, environ 20 cm, en partant de l'éponte jusqu'à la partie médiane du filon. Elle est constituée de calcite massive fibroradiée surmontée de scalénoèdres ou de prismes hexagonaux de calcite (Fig. 85).

Cette calcite fibroradiée contient parfois des zones brunâtres. Une dissolution à chaud dans l'acide chlorhydrique dilué et test qualitatif pour  $Fe^{3+}$  montrent que l'on est en présence de calcite chargée de matière argileuse insoluble et non de sidérite ou de calcite ferrugineuse.

Des fragments montrent nettement la présence de brèche avec ciment de calcite dans laquelle se trouve principalement de la sphalérite et plus rarement de la galène (Fig. 86 et 87).



**Fig. 82:** Roche encaissante de surface (érodée). Trait jaune = 1cm. Photo : G Ruelle.

La galène, assez rare en comparaison avec la sphalérite récoltée, cristallise à la fois : dans les zones d'éponte ayant subi une métasomatose (Fig. 84), entre la roche encaissante et la gangue (Fig. 88), dans la gangue de calcite même (Fig. 89), sur la calcite scalénoédrique (peu fréquent) du centre du filon (Fig. 90) et enfin sur la sphalérite (très rare) (Fig. 91). Il y a donc plusieurs phases dans la genèse de la galène dont une tardive.

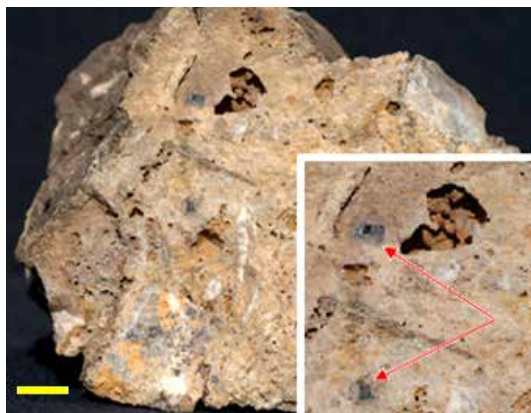
Les fragments de roche constituant la brèche ont subi une certaine jaspérisation (silicification), moins poussée que celle que l'on peut rencontrer dans les gisements de fluorite du Givétien mais présente malgré tout. Après attaque avec HCl dilué on met en évidence une couche de quartz microscopique de teinte gris-bleuté entre la roche et la sphalérite et on observe une dissolution partielle des fragments de la dite roche (Fig. 92).

La sphalérite très abondante dans les haldes, forme des ensembles compacts avec calcite qui après dissolution de celle-ci présentent un aspect très esthétique (Fig. 93).

La présence de marcassite, de pyrite et/ou de minéraux oxydés du fer est pratiquement nulle.



**Fig. 83:** Contact franc entre gangue et éponte. Trait jaune = 1cm. Colle et photo : F Van Troyen.



**Fig. 84:** Eponte transformée avec imprégnation de petits cristaux de galène. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



**Fig. 85:** Gangue de calcite fibroradiée et scalénoédres. Cube de galène de 15mm. Trait jaune = 1cm. Coll MnhnL, photo : G Ruelle.



Fig. 86: Brèche avec sphalérite. Trait jaune = 1cm. Collet photo : F Van Troyen.

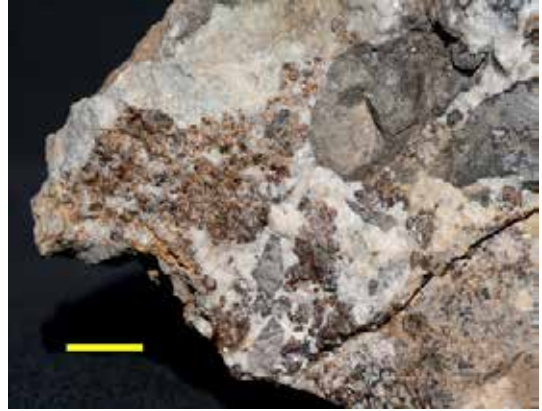


Fig. 87: Brèche avec sphalérite, détail. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



Fig. 88: Galène entre la roche encaissante et la gangue. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.

### Observations (filon secondaire)

Le filon secondaire a été trouvé à 1 m de profondeur sous 60 cm de haldes, 20 cm de couche d'humus antérieure et 20 cm de roche encaissante. Cette dernière est un peu noduleuse, stratifiée, avec présence d'argile entre les strates.

La puissance du filon est de 25 cm. Il est constitué de calcite massive et scalénoédrique. Le contact avec l'éponte est franc et on n'observe pas de salbande. Jusqu'à présent, après une découverte d'environ 60 cm, un échantillon (géode) avec deux cristaux de galène et un liseré de sphalérite au contact de l'éponte a été trouvé (Fig. 94). Aucune trace, pour le moment, de brèche.



Fig. 89: Galène dans la gangue de calcite. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.

### Paragenèse et confirmation de la nature du filon

La silicification s'est produite lors des premières circulations hydrothermales, on ne retrouve pas de cristaux de quartz sur la sphalérite, la galène ou la calcite des géodes.

Il semble que la galène se soit formée à des moments différents, en fonction des conditions existantes (température-pression-liquide hydrothermal) avec :



**Fig. 90:** Galène sur la calcite scalénoédrique. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



**Fig. 91:** Galène sur la sphalérite. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



**Fig. 92:** Sphalérite après dissolution complète de la calcite. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



**Fig. 93:** Sphalérite après dissolution partielle de la calcite. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo : G Ruelle.

- 1) formation dans l'éponte (migration limitée),
- 2) au contact de l'éponte avec cristallisation subséquente de calcite,
- 3) dans la calcite massive, (Fig. 95)
- 4) dans les vides résiduels (géodes).

La cristallisation de la sphalérite s'est également échelonnée dans le temps : au contact des épontes (rare) (Fig. 96), dans les zones à caractère bréchi que (fréquent) (Fig. 87), simultanément avec la calcite massive (non fibroradiée) (fréquent) (Fig. 97).

La cristallisation de la calcite s'est déroulée en au moins deux phases avec d'abord une calcite fibroradiée contenant ou pas de la matière argileuse et ensuite, surmontant la première, des scalénoèdres ou des prismes hexagonaux.

Certains scalénoèdres sont fantômes, preuve de changements temporels dans le liquide hydrothermal.

En fin de formation de la calcite massive on observe la cristallisation de fluorite en petit cubes jaunes. De la baryte a également été repérée mais en fragments isolés. On ne peut donc déterminer sa place dans la paragenèse.

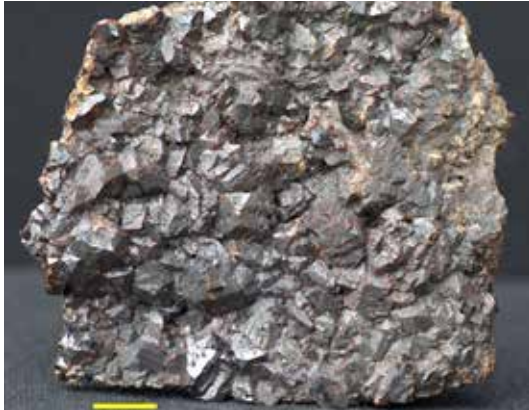
Après mise en place des minéraux de base (galène et sphalérite), on observe la formation d'hydro-



**Fig. 94:** Géode de calcite avec cristaux de galène et liseré de sphalérite au contact de l'éponte. Trait jaune = 1cm Coll et photo : G Ruelle.



**Fig. 95:** Galène dans calcite massive. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo : G Ruelle.



**Fig. 96:** Sphalérite au contact des épontes. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



**Fig. 97:** Sphalérite dans la calcite massive. Trait jaune = 1cm. Coll et photo : F Van Troyen.



**Fig. 98:** Calcite, 4 générations dont deux phases principales. Trait jaune = 1cm. Coll F Van Troyen, photo : G Ruelle.

cérusite (fréquente), de cérusite (rare), de smithsonite (rare)

On peut citer également les minéraux suivants déterminés au microscope binoculaire par M Michel Blondieau : Hydrozincite, Malachite, Pyrite...

Le gisement n'est pas un gisement de substitution ou d'imprégnation mais bien de nature filonienne partiellement bréchique. Cependant cette brèche initiale formée lors de la fracturation du massif calcaire n'est pas également répartie. Certaines parties de gangue ne contiennent aucun fragment de roche. Le filon secondaire découvert ne présente, jusqu'à présent, aucun caractère bréchique.



Sa nature hydrothermale est évidente, sans doute de type épithermal (températures des couches profondes de la terre sont comprises entre 50 et 200 degrés celsius) ou leptothermal. [Entre épithermal et mésothermal ( $T^\circ$  entre 150 et 300 degrés celsius)]

## Conclusion

Notre conclusion se trouve confortée par le travail d' A Herbosch, S Cauet, A Preat ULB effectué en 1983 et intitulé :

" Recherche de métallotectes de nature géochimique pour la prospection des gîtes Pb-Zn belges.

Partie I : Géochimie isotopique du S et du Pb.  
Partie II : Sédimentologie et lithogéochimie : exemple du Givétien du bord Sud du synclinorium de Dinant."

Cette étude tente d'identifier la source des métaux formant les amas de sulfures du synclinorium de Dinant en se basant sur les rapports isotopiques du Pb, notamment le rapport des isotopes 206 et 204 qui donnent pour Beauraing par exemple une valeur d' environ 18.28.

En fonction de la désintégration de l'uranium et du thorium qui peuvent déboucher sur la formation d'isotopes du plomb et connaissant la durée de demi-vie de ces éléments radioactifs, on mesure la teneur résiduelle en uranium et thorium des roches encaissantes et du minerai pour avoir une idée de la source primaire radioactive du plomb. Dans l'étude en question les analyses donnent une extrapolation d' environ 3 milliards d'années, donc largement précambrienne mais avec une mise en place définitive des filons de plomb/zinc entre le Permien et le Trias.

Afin de confirmer cela les auteurs ont trouvé intéressant de vérifier la teneur en isotopes du plomb et de l'uranium des roches sédimentaires (encaissantes) dans lesquelles sont situés les filons et de se demander si le plomb présent est propre au sédiment, donc s'il a été inclus dans le sédiment même lors de sa formation au fond de la mer de l'époque, ou s'il résulte d'une auréole de contact due à la diffusion du plomb du filon dans la roche formée.

Les analyses montrent qu'il y a probablement une filiation entre les rapports isotopiques du plomb présent dans les filons du Givétien **moyen**

**et supérieur** et les roches encaissantes qui les contiennent.

Les auteurs essaient de confirmer ou d'infirmer cela en mesurant la teneur en plomb dans les pyrites formées en même temps que les sédiments (réduction des sulfates de l'eau de mer par les bactéries anaérobies et formation subséquente de sulfures). Ces pyrites contiennent en moyenne de l'ordre de 100 ppm de plomb et quelques ppm d'uranium résiduel.

Des analyses, il ressort que le plomb des pyrites contenues dans les roches encaissantes givésiennes de Beauraing, étage qui nous intéresse, est plus radiogénique que celui des filons mêmes. (Rapport isotopes 206/204 de l'ordre de 18.35) Il en déduit que la source de plomb des dits filons ne provient pas de la roche encaissante hôte.

Il envisage plusieurs hypothèses de mobilisation du plomb et de sa concentration amenant à la formation de filons : sécrétions latérales en provenance de la roche hôte, circulation d'eau météorique, circulation d'eau pressurisée lors de la diagenèse de la roche mais aucune hypothèse n'est vraiment probante. Il en déduit que plusieurs phénomènes différents à des moments différents ont contribué à la formation des filons.

L'auteur considère alors les informations qu'il pourrait obtenir en étudiant les rapports isotopiques ( $\delta 34$ ) du soufre (le  $\delta 34$  est le rapport du % en isotope 34 sur le % en isotope 32 du soufre).

Pour ce faire, il a analysé le soufre d'une série de sulfures (pour Beauraing, ledit rapport pour la galène est de 7.9) et l'évolution de ces rapports entre galène sphalérite et marcassite. Cette étude permet d'avoir une idée de la température des liquides minéralisateurs.

L'étude montre que la minéralisation de la galène filonienne belge présente dans les roches dévoniennes moyennes et supérieures et carbonifères inférieures résulte d'un même processus métallogénique à grande échelle, excepté pour le Givétien inférieur (Beauraing) du bassin de Dinant.

Il existe une filiation entre le plomb des filons et celui contenu dans la roche hôte (peu probant pour le Givétien de Beauraing).

La température de formation des sulfures de ces filons y compris Beauraing est inférieure à 250°C.

Pour le Givétien inférieur, formation de Trois-Fontaines et formation du Mont d'Hairs de Resteigne (filon BGPC de la carrière de Resteigne) les auteurs arrivent à la conclusion qu'il n'est pas possible que les sulfures formés aient pour origine la roche encaissante par sécrétions latérales, ce qui milite en faveur d'une formation épigénétique hydrothermale provenant des profondeurs du massif. Ils en déduisent que tous les autres filons du bord sud du bassin de Dinant et ne présentant pas de filiation roche encaissante/filon (dont Beauraing) ont une origine du même type que celle de Resteigne.

## Sources

- Abbé De Leuze (1891) "Beauraing et son Château" Namur.
- Bock L, Willam C, Hallet V (2009) " Patrimoine géologique, géomorphologique et pédologique en province de Namur ". German Soil Science Society, Fondation Gouverneur René Close.
- Bonniver J, Rekk S, hallet V (2013), Notice explicative, carte hydrogéologique " Rochefort-Nassogne 59 3/4 " Service géologique de Wallonie, DGARNE.
- Boulvain F, Pingot J-L (2015), " Géologie de la Wallonie " Université de Liège.
- Boulvain F, Preat A (1986) " Les calcaires laminaires du Givétien supérieur du bord sud du bassin de Dinant : Témoin d'une évolution paléoclimatique " Annales de la Société Géologique de Belgique T109.
- Cauet S, Dejonghe L, Letolle R (1986) " Géochimie isotopique du soufre des gites plombo-zincifères belges ". Annales de la Société Géologique de Belgique T109.
- DemaiFFE D, Dejonghe L (1990.) " Géochimie isotopique du strontium des barites, anhydrites, calcites et fluorites de Belgique ". Annales de la Société Géologique de Belgique T113.
- Denaeyer M.E (1925), "Sur un filon de galène et de blende dans le calcaire givétien de Beauraing (Namur)", Bulletin de la Société Belge de Géologie 35, 83-85.
- De Nul R (2006), "De mijn van Beauraing, Namur, België" - Geonieuws Mineralogische Kring Antwerpen V.Z.W.
- Dimanche F, Ek C, Frenay J (1979) " Minéralisations plombo-zincifères belges, minéralogie, gitologie, minéralurgie ". Annales de la Société Géologique de Belgique T102.
- Dumoulin V, Blockmans S (2013), Notice explicative, carte géologique " Felenne-Vencimont 58 7/8 " Service géologique de Wallonie, DGARNE.
- Escargotite (2014) " Trésors du Namurois " Exposition Namur.
- Hatert F, Deliens M, Fransolet A-M, Van Der Meersche E (2002), "Les minéraux de Belgique 2" Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique.
- Herbosch A, Cauet S, Preat A (1983) " Recherche de métallotectes de nature géochimique pour la prospection des gites Pb-Zn belges " Service Géologique de Belgique.
- Lemonne E, Dumoulin V (1998), Notice explicative, carte géologique " Agimont-Beauraing 58 3/4 " Service géologique de Wallonie, DGARNE.
- Le Mayeur J (1830) " La Gloire Belgique " Poème national. Ed Vanlinthout et Vandenzande (pp 473).
- Nogarede P, Rekk S, Hallet V (2007), Notice explicative, carte hydrogéologique " Agimont-Beauraing 58 3/4 " Service géologique de Wallonie, DGARNE.
- PLURIS ASBL (2010), Commune de Beauraing, " Schéma de structure communal "
- Preat A (2006) " Le Givétien franco-belge " Ed BRGM-SGF.
- Raguin E (1961) " Géologie des gites minéraux ". Ed Masson et Cie (pp 686).
- Ruelle G, Président, "Escargotite" Namur.
- Van Bellingen Luc, Fossiliraptor <http://www.fossiliraptor.be>
- Wikipédia, l'encyclopédie libre <http://www.wikipedia.org>

## Remerciements

Blockmans Sabine, géologue, Facultés Universitaires Notre dame de la Paix à Namur.

Blondieau Michel.

Goemaere Eric, géologue, Service géologique de Belgique.

Phillipo Simon, géologue, Conservateur des collections minéralogiques du Musée National d'Histoire Naturelle de Luxembourg.

Ruscart Patricia, biologiste, Service géologique de Wallonie.

---

# **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**

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

Copyright of a published paper, including illustrations, becomes the property of the publisher. Requests to reproduce material from FERRANTIA should be addressed to the editor.

## **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:

## **FERRANTIA**

*Travaux scientifiques du Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg*

25, rue Munster

L-2160 Luxembourg

## **Format**

Manuscripts must be submitted as paper copy in triplicate in A4 format, preferably double-spaced, with margins of at least 3 cm and all pages numbered.

If possible, an electronic version of the text may also be sent as unformatted Word document (PC or MAC) (font Times New Roman, 10 pt). Tables (Word, Excel) and figures (300 dpi in the page size of the journal) may also be sent electronically.

## **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 sub-generic 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 photographs 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.

Schwane 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
number 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](mailto: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. 1<sup>ère</sup> partie (Rhopalocera, Hesperiiidae). 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 occurrences 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 *Simonicerias* 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.
- 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 - Stolzenbourg, 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.

## 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.

- 55 Proceedings of the first conference on faunistics and zoogeography of European Trichoptera. Luxembourg 2<sup>nd</sup> - 4<sup>th</sup> 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 3<sup>rd</sup> international symposium Coleoid Cephalopods Through Time. Luxembourg 8<sup>th</sup> - 11<sup>th</sup> 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 Luxembourg, Roland Proess (Hrsg.), 2016.
- 76 Die Rüsselkäferfauna (Coleoptera, Curculionoidea) der Silikatmagerrasen im nördlichen Luxembourg. Carlo Braunert, 2017.
- 77 Inventaire minéralogique du Luxembourg et de la région: Goesdorf et Beauraing, Simon Filippo (éditeur), 2018.





