

# *Le SOUFRE et les MINÉRAUX SULFURÉS*

*Roger Guay, Ph.D., **Biogéomicrominérologue***

*Conseiller spécial*

*Club de minéralogie de Montréal*

# *Le SOUFRE et les MINÉRAUX SULFURÉS*

*Ce document a été conçu avec un objectif pédagogique bien défini auprès du grand public:*

Reconnaître que la « famille » des composés soufrés renferme un grand nombre d'espèces minérales dont l'importance économique est considérable. L'impact environnemental de leur transformation **BIOLOGIQUE** et **CHIMIQUE** affecte la qualité de la nature qui nous entoure !

# Qu'est ce qu'un **BIOGÉOMICROMINÉROLOGUE** ?

*C'est un mot inventé et difficile à prononcer d'un trait ;*

Il caractérise un chercheur qui s'intéresse à l'étude des phénomènes de *transformation biologique des minéraux*,

Il définit aussi un spécialiste qui tente d'établir un *diagnostic de problèmes* environnementaux qui ont comme origine commune l'activité des microorganismes,

C'est de plus un scientifique *multidisciplinaire* qui travaille à la recherche d'applications pratiques, dites *biotechnologiques*, en réponse à des phénomènes anarchiques, indésirables et parfois incontrôlés.

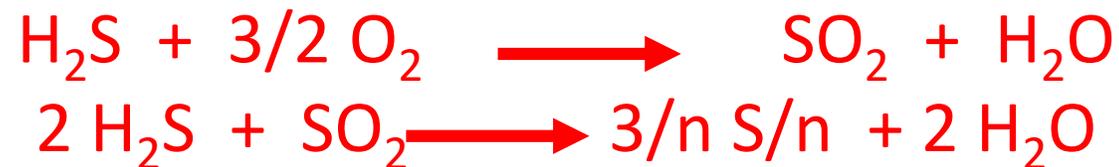
## *SOURCE de SOUFRE ÉLÉMENTAIRE*

Le SOUFRE est récupéré des « Sour Gas » ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ) présents dans le pétrole et le gaz naturel en utilisant un procédé chimique complexe (Procédé *FRASH*). Il est alors fondu en blocs qui sont empilés près de l'usine.

Le SOUFRE élémentaire ( $\text{S}$ ) se solidifie à la sortie des gaz des événements volcaniques ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ) et est recueilli par des travailleurs qui risquent leur vie à respirer ces gaz toxiques.

## *PROVENANCE du SOUFRE (S°) de RÉCUPÉRATION*

Le procédé Claus modifié est le fer de lance dans la récupération du soufre élémentaire, il est le principal procédé employé au niveau international. Au cours du procédé, les gaz acides sont partiellement oxydés en dioxyde de soufre,  $\text{SO}_2$ , composé qui réagit lui-même avec l'hydrogène sulfuré ( $\text{H}_2\text{S}$ ) et un catalyseur pour produire le soufre élémentaire ( $\text{S}^\circ$ ). La plupart des usines employant le procédé Claus ont deux ou trois étapes catalytiques et réalisent des rendements de récupération du soufre de 94 à 97%.



# SOUFRE ÉLÉMENTAIRE

Collection Roger Guay



*Soufre élémentaire (Bolivie)*

Photo: Christian Autotte

## Soufre

Groupe  
Éléments

Dureté



Densité  
2.1

Composition  
 $S_8$



Photo : Gracieuseté de FICM

### Importance de ce minéral :

Tous les êtres vivants ont besoin de soufre, il est également utilisé dans la fabrication de colorants, des détergents, des pigments, des médicaments ainsi que des explosifs



# *SOUFRE et ENVIRONNEMENT*

- Le soufre récupéré est moulé en blocs qui sont accumulés à proximité (quelques centaines de mètres) de ces usines. On a observé que les sols environnants et les eaux souterraines s'acidifiaient assez rapidement et qu'ils étaient colonisés par des microorganismes **THIO-OXYDANTS**, tout cela même dans un rayon de quelques kilomètres.
- Au Québec, ce phénomène a été à toutes fins pratiques ignoré jusqu'au jour où on a observé que certains sols adjacents aux usines de pâtes et papiers étaient eux aussi acidifiés. Cette pollution locale était provoquée par l'oxydation **microbiologique** du soufre élémentaire accumulé à l'air libre qu'on utilisait dans la fabrication des liqueurs au sulfite afin de « cuire » la pâte cellulosique. Lorsque les procédés thermochimiques ont progressivement été remplacés par des procédés thermomécaniques ne nécessitant plus de soufre, ces entreprises ont tout simplement fait enfouir ce « **MINÉRAL** » sur les terrains des usines et ont oublié leur présence. Ce n'est que quelques années plus tard à la faveur de l'érection de nouveaux bâtiments sur ces propriétés qu'on a noté une acidification significative (diminution de 2 à 4 unités de pH) des sols « contaminés » voire même dans certains cas, une attaque chimique du béton structurel des fondations.

## *Le SOUFRE ÉLÉMENTAIRE et les SULFURES MÉTALLIQUES SOURCES D'ÉNERGIE POUR DES MICROORGANISMES*

À la fin des années quarante, des chercheurs américains, Colmer et Hinkle, isolèrent des microorganismes (**bactéries**) qui avaient la propriété d'**oxyder** la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) que contenaient les charbonnages de la Pennsylvanie (USA). Ils la nommèrent *Ferrobacillus ferrooxidans* ( $\text{Fe}^{2+}$ ) à laquelle s'ajoutèrent plusieurs années plus tard *Acidithiobacillus ferrooxidans* ( $\text{S}^\circ$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ), *Acidithiobacillus thiooxidans* ( $\text{S}^\circ$ ) et *Acidithiobacillus thioparus* ( $\text{S}^\circ$ ). Depuis, la phylogénétique a brassé toute cette nomenclature !

*A.R Colmer, M.E Hinkle. The role of microorganisms in acid mine drainage.  
A Preliminary Report, Science, 106 (1947), pp. 253-256.*

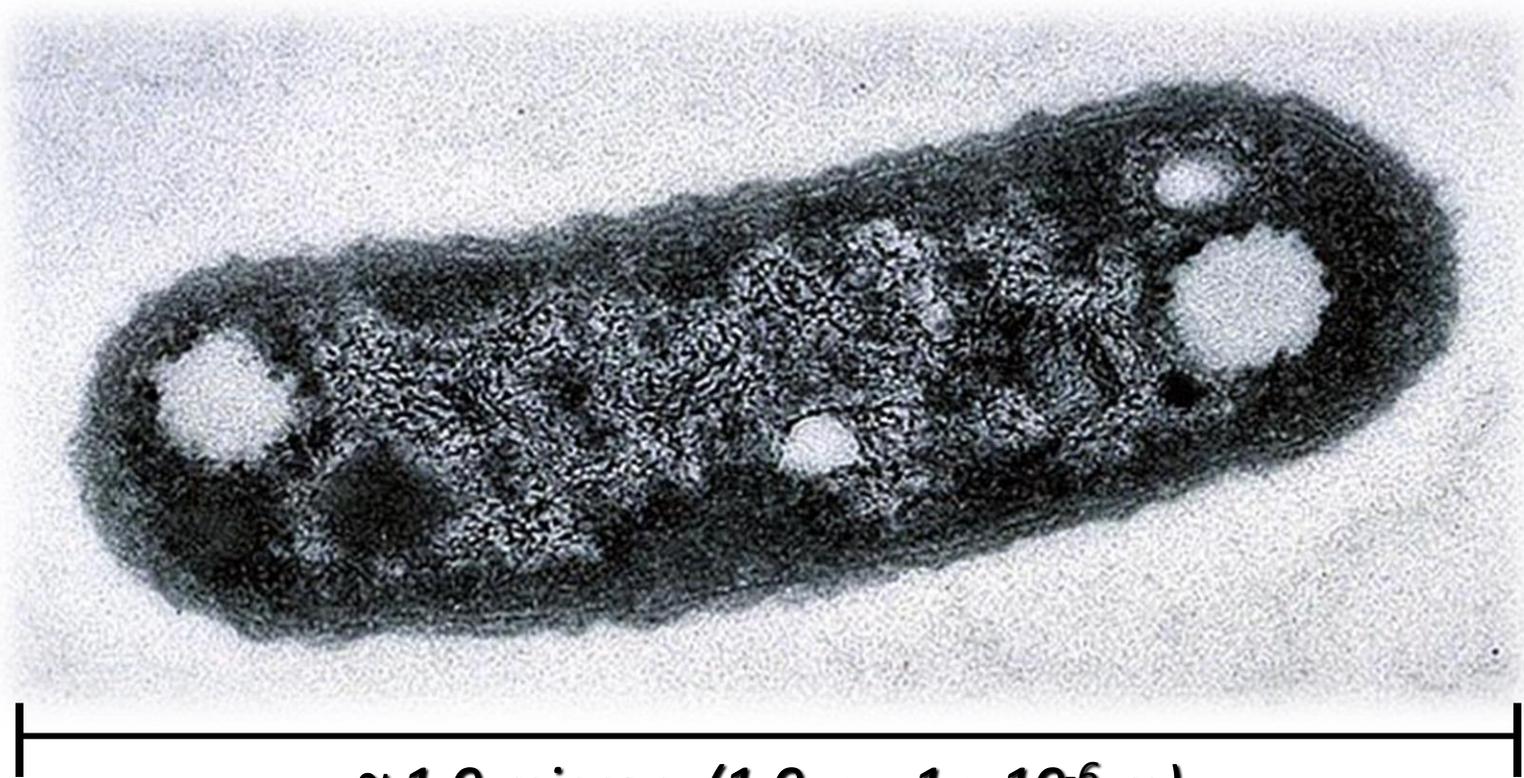
# *Acidithiobacillus ferrooxidans*

- Caractéristiques physiologiques
  - Oxyde *directement la portion sulfure*  $S^{2-}$  de la très vaste majorité des sulfures métalliques
  - Oxyde *directement la portion fer* de la pyrite ( $Fe^{2+}$ )
  - Oxydation *indirecte des sulfures* par les ions ferriques ( $Fe^{3+}$ ) générés par la bactérie lors de l'oxydation de l'ion ferreux ( $Fe^{2+}$ )
  - Offre une *résistance très élevée aux métaux lourds* solubilisés

***Attention, ce «catalyseur biologique» est un cas spécial: il se reproduit et se multiplie !!!!***

# La BACTÉRIE *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Collection Roger Guay



~ 1,0 micron ( $1,0 \mu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$ )

Photomicrographie en microscopie électronique à transmission

Photo: le regretté Dr Hans -W Ackermann  
Faculté de Médecine, Université Laval

# *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Collection Roger Guay

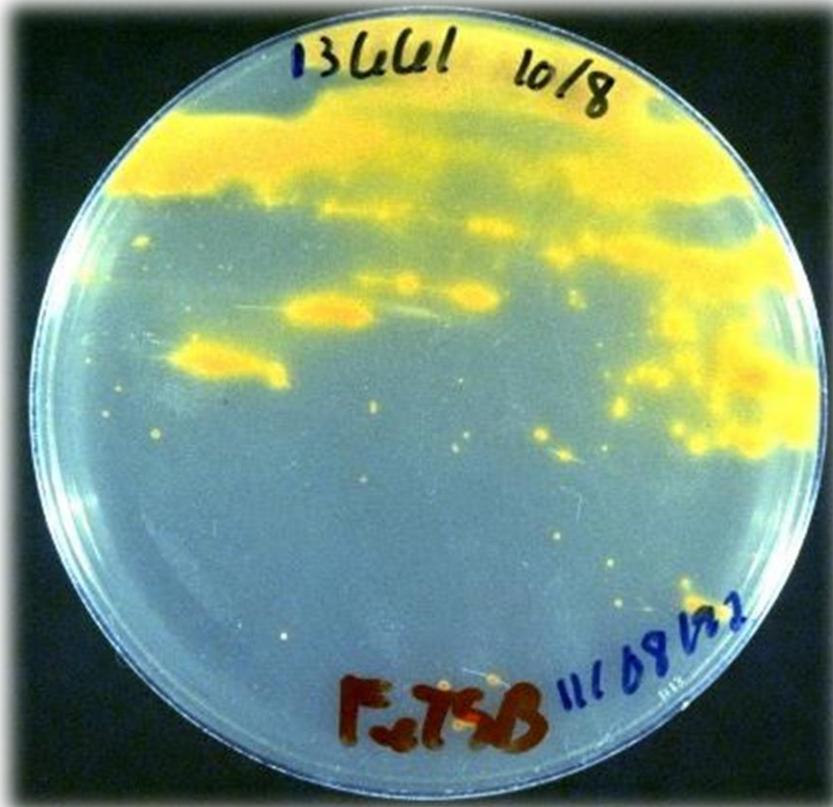


Photo Roger Guay

*Croissance en milieu solide*

Collection Roger Guay

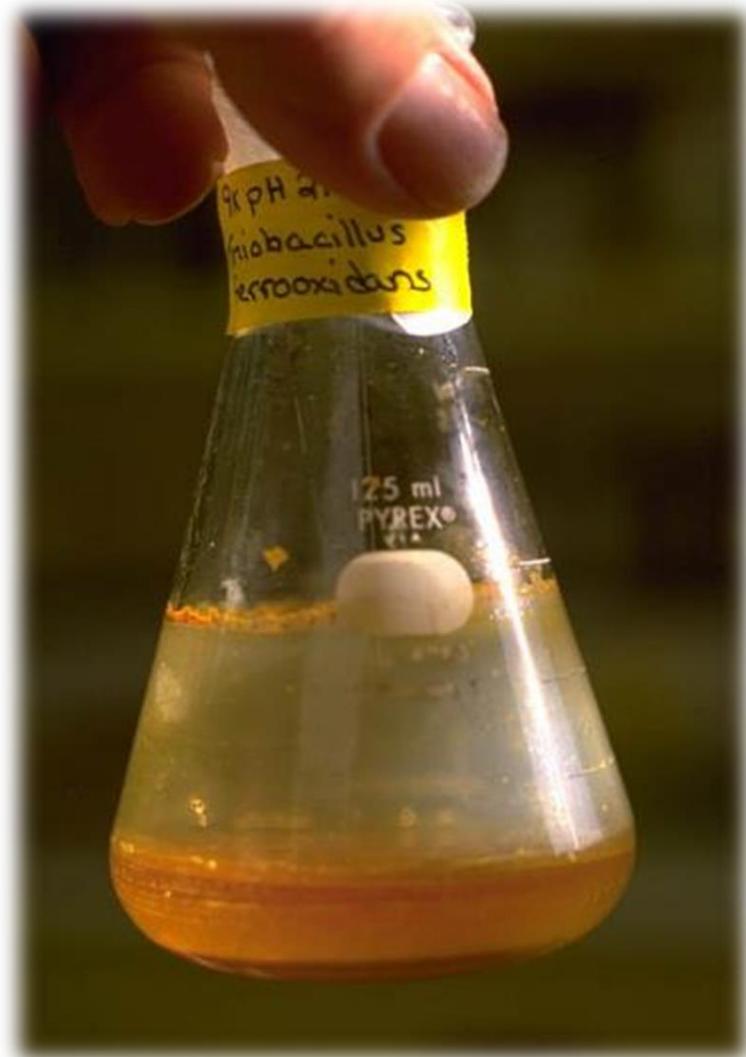


Photo Roger Guay

*Croissance en milieu liquide*

# *CYCLE du SOUFRE*

Les principales étapes du cycle du soufre sont :

1. **la minéralisation** du soufre organique en une forme inorganique : le sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ).
2. **l'oxydation** biologique des sulfures, du soufre élémentaire ( $S$ ) et solubilisation des sulfures métalliques en sulfates ( $SO_4^{2-}$ ).
3. **la réduction** biologique des sulfates en sulfures ( $S^{2-}$ ).
4. **l'immobilisation microbienne** des composés soufrés et leur incorporation dans une forme organique du soufre.

# *MINÉRAUX SULFURÉS TRANSFORMABLES par des MICROORGANISMES*

## Sulfures simples

Hydrogène sulfuré,  $\text{H}_2\text{S}$  (14) (gaz)  
Chalcocite,  $\text{Cu}_2\text{S}$  (5b)  
Covellite,  $\text{CuS}$  (5a)  
Galène,  $\text{PbS}$  (4)  
Pyrite,  $\text{FeS}_2$  (1)  
Pyrrhotite  $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$  (1)  
Molybdénite,  $\text{MoS}_2$  (6)  
Sphalérite,  $\text{ZnS}$  (3)  
Stibnite,  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  (7)  
Cuivre natif,  $\text{Cu}^\circ$  (5g)  
Alabandite,  $\text{MnS}$  (13)  
Bismuthinite,  $\text{Bi}_2\text{S}_3$  (16)

## Sulfures complexes

Arsénopyrite,  $\text{FeAsS}$  (2)  
Bornite,  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$  (5d)  
Bournonite,  $\text{PbCuSbS}_3$  (12)  
Carrolite,  $\text{Cu}(\text{Co,Ni})_2\text{S}_4$  (8)  
Chalcopyrite,  $\text{CuFeS}_2$  (5c)  
Énargite,  $\text{Cu}_3\text{AsS}_{4n}$  (10)  
Stannite,  $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$  (11)  
Tétrahédrite,  $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$  (5e)  
Tennantite,  $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$  (5f)  
Pentlandite,  $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$  (9)  
Zinkénite,  $\text{Pb}_6\text{Sb}_{14}\text{S}_{27}$  (15)

# RÉACTIVITÉ des SULFURES de FER (1)

Il existe plusieurs variétés de sulfures de fer, qui diffèrent les unes des autres par leur **stœchiométrie** (proportions relatives du fer et du soufre) et leurs propriétés, présentant certaines analogies avec les oxydes correspondants :

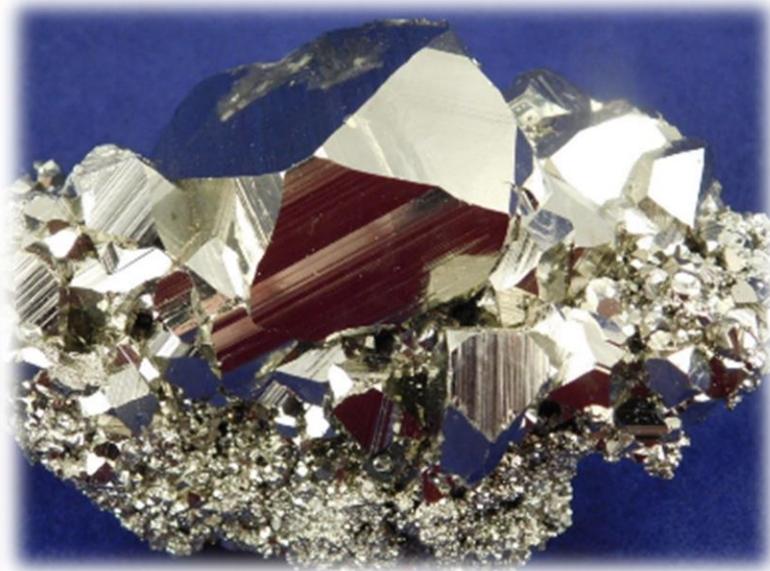
- La **Pyrrhotite**, un minéral **ferromagnétique**, comme le fer, de formule  $Fe_{1-x}S$  cristallisant dans le système monoclinique.
- La **Pyrite** et la **Marcassite**, des minéraux **diamagnétiques**, qui sont des disulfures de fer(II) de formule  $FeS_2$
- Le **Sulfure de fer(III)** de formule  $Fe_2S_3$ , est plutôt **instable** et tend à se dissocier en soufre et sulfure de fer(II).

**N .B. Les chiffres qui apparaissent au bout du titre des diapositives réfèrent au Tableau des minéraux sulfurés transformables par les microorganismes**

# COMMENT RECONNAÎTRE la PYRITE ? (1)



**Pseudomorphose** d'ammonite  
Fossile d'ammonite pyritisé



*Rhomboèdres de pyrite (Pérou)*

*Collection Roger Guay*

*Photos Christian Autotte*



*Pyrite cubique du Pérou*

# PHÉNOMÈNE de **PSEUDOMORPHOSE** MINÉRALE

- Commençons par une définition très simplifiée : Dans une *pseudomorphose* la forme du premier minéral est conservée, alors que le minéral initial a été remplacé.
- La modification des conditions physico-chimiques, entraîne une instabilité d'un minéral : il se transforme (en un ou plusieurs autres) ! Lorsque cette transformation s'effectue sans qu'il y ait modification de forme, on parle de **pseudomorphose** (du préfixe " pseudo ", et du grec *morphê* (μορφη), forme - le préfixe " pseudo ", tiré du grec (φειδζσ) *pseudès*, menteur - signifie, " à première vue, par erreur, prétendu, prétendument, soi-disant ").

## *AUTRES FORMES PLUS RARES de la PYRITE (1)*

**A-** Boule de pyrite (Chine) et **B-**  
concrétions de pyrite (Chine)



**A**

*Collection Roger Guay*



**B**

*Photos Christian Autotte*

**C-** Concrétion de pyrite en boule  
dans des schistes (Dunham, QC)



**C**

# *UTILISATION de la PYRITE*

- La pyrite demeure le minerai de base de la fabrication de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) par le procédé des chambres au plomb.
- Le récepteur radio à pyrite connu sous le nom de poste à pyrite (*radio-cristal*) est un récepteur radio à modulation d'amplitude extrêmement simple qui historiquement permit la réception des ondes radioélectriques pendant la seconde guerre mondiale. Les pensionnaires dans les institutions d'enseignement l'utilisaient pour écouter en secret les matchs de hockey au début des années 60. (*Je l'ai fait moi-même également !*)
- La pyrite sert aussi comme pierre à feu (mousquets).
- Son utilisation dans le remblai autour des fondations de diverses constructions, notamment au Québec et accidentellement comme composant pour le béton à Trois-Rivières, a été à l'origine de critiques en raison de l'affaiblissement des fondations dû aux fissures provoquées par gonflement. Ce gonflement est produit par la réaction de la pyrite avec l'eau, l'air et la chaux [ $Ca(OH)_2$ ] du béton.

## *Les côtés POSITIF et NÉGATIF de la PYRITE*

- On peut ranger l'utilisation positive des sulfures de fer dans les procédés de fabrication de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) et plusieurs autres procédés industriels.
- Par contre, on doit à l'oxydation microbienne et chimique de la Pyrite des rejets miniers issus des procédés de concentration de plusieurs minerais de Cuivre, de Zinc, de Nickel, des métaux de base, et aussi de la concentration des minerais aurifères (Or), la production de drainage minier (rocheux)acide.

## QUE PENSER de L'ARSÉNOPYRITE ( $\text{FeAsS}$ ) ? (2)

L'arsénopyrite est une espèce minérale composée d'arsénio-sulfure de fer de formule  $\text{FeAsS}$  avec des traces de : Ag, Au, Co, Sn, Ni, Sb, Bi, Cu, et Pb.

L'arsénopyrite aurifère est exploitée pour l'or. *Thiobacillus ferrooxidans* est une des seules bactéries capable d'oxyder l'arsénopyrite et libérer l'Or de sa gangue qui peut alors être récupéré par la **cyanuration**.

Collection Roger Guay



Photo Christian Autotte

Arsénopyrite (Chine)

# SKUTTERUDITE

La **SKUTTÉRUDITE** est une espèce minérale composée d'arséniure de cobalt et de nickel de formule  $(\text{Co,Ni})\text{As}_{3-x}$  avec des traces de S, Bi, Cu, Pb, Zn, Ag, Fe et Ni. Ce minerai le plus commun du cobalt, autrefois connu sous le nom de **smaltine**, était connu à Tunaberg en Suède, à Jachymov en Bohême tchèque, à Schneeberg en Saxe, à Andreasberg dans le Harz... et depuis les années 1930 à Bou Azzer dans l'Anti-Atlas au Maroc.

Collection Roger Guay



Photos Christian Autotte

*Skuttérudite, Maroc*

## QU'EST-CE QUE la SPHALÉRITE ? (3)

Le sulfure de zinc ( $ZnS$ ) cristallise en plusieurs types, les deux principaux étant la **SPHALÉRITE** et la **WURTZITE**. Bien que la formule idéale soit  $ZnS$ , la wurtzite est légèrement déficiente en soufre ( $ZnS_{1-x}$ ) et la sphalérite est légèrement déficiente en zinc ( $Zn_{1-x}S$ ). L'éclat résineux devient métallique quand le taux de fer augmente. La couleur varie d'incolore (sphalérite très pure) à jaune-brun ; avec du fer, elle devient noire. Le nom dérive du grec « *sphaleros* » = trompeur, en allusion à la possibilité de confusion avec la galène ( $PbS$ ). La variété **MARMATITE** a été décrite par Boussingault en 1829, comme espèce, déclassée en variété par l'IMA. (Syn. *christophite* ou *chrystophite* Breithaupt 1863) variété riche en fer (près de 26 %), Noire opaque, et à reflets métalliques.

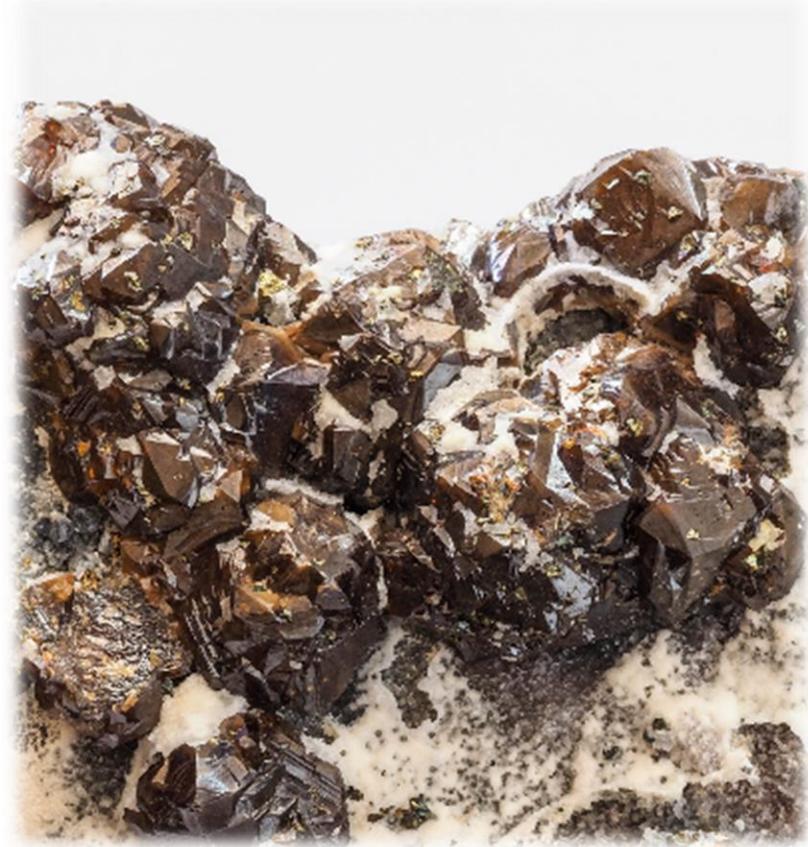
# *Des IMAGES de la SPHALÉRITE (3)*

*Collection Roger Guay*

*Photos Christian Autotte*



*Sphalérite noire cristallisée*



*Sphalérite mielleuse*

# *Des IMAGES de la SPHALÉRITE(3)*

*Photos Christian Autotte*

*Collection Roger Guay*



*Sphalérite(Cléiophane) cristaux sur druse de  
Quartz, Madan, Bulgarie*



*Cristal de Cléiophane,  
Bulgarie*



*Marmatite (Kosovo)*

# *La GALÈNE (4)*

La GALÈNE est une espèce minérale composée de sulfure de plomb de formule  $PbS$  avec des traces de Ag, Bi, Se, Te, Cu, Zn, Cd, Fe, As, Sb, Mo, Au. Ceci lui vaut une cohorte de variétés.

*Collection Roger Guay*



*Photo Christian Autotte*

*Galène, Joplin, Missouri (USA)*

## *COVELLITE (5a)*

- La **COVELLITE** est un minéral composé de sulfure de cuivre de formule  $\text{CuS}$  avec des traces de fer, sélénium, argent et plomb. La covellite est le premier supraconducteur naturel découvert. Elle se présente sous forme de cristaux hexagonaux tabulaires à aplatis.
- Elle est opaque et d'éclat métallique, sa couleur est un mélange de bleu indigo, violet, irisé, pourpré, noir et grisâtre. Son trait est gris, noir, bleu foncé ou gris de plomb.
- C'est un minéral très tendre, de dureté entre 1,50 et 2,00 sur l'échelle de Mohs.

## *CHALCOCITE (5b)*

La **CHALCOCITE** est un minéral décrit par James Dwight Dana en 1868 et nommé d'après la racine grecque χαλκός (*chalkos*) désignant le cuivre, sa formule est  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Minerai de cuivre (à 67 %). La chalcocite est le principal minerai de cuivre au monde. Le sélénium se substituant très facilement au soufre dans le réseau cristallin de la chalcocite, ce minéral est aussi une des principales sources de sélénium au monde. Les minerais de chalcocite sont donc les plus riches en cuivre à l'exploitation.

# COVELLITE (5a) et CHALCOCITE (5b)



Covellite

Collection Roger Guay



Chalcocite, Québec

Photo Christian Autotte

## *CHALCOPYRITE (5c) et BORNITE (5d)*

- La **CHALCOPYRITE** est une espèce minérale composée de sulfure double (35 % massique), de cuivre (34,5 %) et de fer (30,5 %), de formule  $\text{CuFeS}_2$ . Avec des traces de Ag;Au;In;Tl;Se;Te. Décrite par Henkel en 1725, le nom est inspiré du grec χαλκός (*chalkos*) pour cuivre et de pyrite.
- La **BORNITE** est une espèce minérale formée de sulfure de cuivre et de sulfure de fer de formule  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$  avec des traces d'argent, de germanium, de bismuth, d'indium et de plomb. Elle peut donner des cristaux jusqu'à 6 cm.

# CHALCOPYRITE (5c)

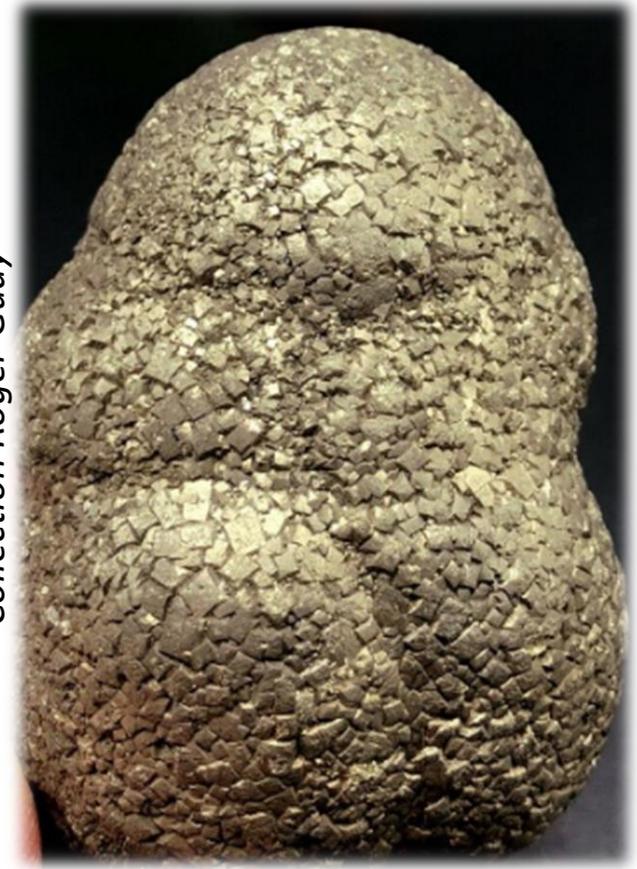
*Collection Roger Guay*



*Photo Christian Autotte*

*Chalcopyrite, gerbe de cristaux, Chine*

*Collection Roger Guay*



*Photo Christian Autotte*

*Nodule de mini-cubes de  
chalcopyrite, Chine*

# *BORNITE (5d)*

*Collection Roger Guay*



*Photo Christian Autotte*

*Bornite, Pologne*

# *TÉTRAÉDRITE (5e) et TENNANTITE (5f)*

La **TÉTRAÉDRITE** est une espèce minérale, connue comme l'antimoniosulfure de fer et de cuivre ou sulfoantimoniure naturel de cuivre et de fer, de formule chimique  $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ . La tétraédrite a été décrite par Wilhem Karl Ritter von Haikdinger en 1845. Le nom dérive du grec "tetraedron" = pyramide, en allusion à la forme tétraédrique des cristaux, c'est-à-dire expliqué par l'adjectif grec tetra, "quatre" et le substantif grec, edra "face".

La **TENNANTITE** est une espèce minérale correspondant à l'arséniosulfure naturel de cuivre et de fer de formule chimique  $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$  ou encore plus précisément  $\text{Cu}_6[\text{Cu}_4(\text{Fe,Zn})_2]\text{As}_4\text{S}_{13}$ .

# TÉTRAHÉDRITE (5e) et TENNANTITE (5f)

*Photos Christian Autotte*

*Collection Roger Guay*



*Tétrahédrite sur quartz - Kapnik (Roumanie)*

*Collection Roger Guay*



*Tennantite - Mine de Tsumeb (Namibie)*

# CUIVRE NATIF, Cu (5g)

*Photos Christian Autotte*

*Collection Roger Guay*



*Mine Caledonia, Michigan (USA)*

*Collection Roger Guay*



*Cuivre natif, échantillon glaciaire, Michigan (USA)*

## *La MOLYBDÉNITE (6)*

- La *MOLYBDÉNITE* est une espèce minérale formée de sulfure de molybdène de formule  $\text{MoS}_2$  avec des traces de rhodium, rhénium, argent, or et sélénium.
- La liaison intra-couche est essentiellement covalente tandis que l'inter-couche est normalement considérée comme de type Van der Waals, ce qui explique le clivage facile et la faible dureté : 1-1½. La couleur est gris-graphite.
- Les cristaux de molybdénite sont lamellaires {001}, flexibles et clivables dans ces plans ; ils ressemblent à des couches de papier d'aluminium. La molybdénite est le minéral de molybdène le plus important, utilisé comme lubrifiant solide (comme le graphite).

## La STIBINE (Antimoine)(7)

- La **STIBINE ou STIBNITE** est une espèce minérale (métalloïde) composée de trisulfure d'antimoine de formule idéale  $Sb_2S_3$  avec des traces de As ; Tl ; Fe ; Pb ; Cu ; Zn ; Co ; Ag ; Au ; Bi. La Stibnite forme une série avec la Bismuthinite. À l'état de poudre de Sb ou de divers composés purifiés, elle a longtemps été utilisée dans les **mascara** et peut donner un effet de scintillement aux **feux d'artifice**. C'est le principal minerai de l'antimoine, elle est utilisée dans la fabrication d'allumettes de sûreté, de pièces pyrotechniques et dans la vulcanisation du caoutchouc.
- Selon l'étymologie populaire, une légende explique l'origine de ce nom par une succession de décès survenus au Moyen Âge parmi des moines.
- La Stibine est un trisulfure d'antimoine dont la poudre noire intense était connue dans l'Antiquité pour souligner le contour des yeux ou comme fard à cils, ou encore comme médicament pour soigner/prévenir les infections oculaires.
- La bactérie **Stibiobacter senarmontii** arrive à dégrader ce minéral très réfractaire.

# MOLYBDÉNITE (6) et STIBINE (7)

*Photos Christian Autotte*

*Collection Roger Guay*



*Molybdénite, Preissac, Qc*

*Collection Roger Guay*



*Stibnite (Stibine), Chine*

## *CARROLITE (8) et PENTLANDITE (9)*

- La **CARROLITE** est une espèce minérale composé de cobalt, de cuivre, de nickel et de soufre de formule  $\text{Cu}(\text{Co},\text{Ni})_2\text{S}_4$ . On la trouve en cristaux isométriques semblables à ceux de la pyrite avec un atome de soufre remplacé quelques fois par un atome d'arsenic.
- La **PENTLANDITE** est un sulfure de fer et de nickel de formule  $(\text{Fe},\text{Ni})_9\text{S}_8$ , de système cristallin cubique, de dureté  $3 \frac{1}{2} - 4$  et de couleur jaune-bronze clair. La Mine Raglan exploite ce minerai au point le plus septentrional du Québec, près de Saluit au Nunavik.

# *CARROLITE (8) et PENTLANDITE (9)*

*Photos Christian Autotte*

*Collection Roger Guay*



*Carrolite, Katanga*

*Collection Roger Guay*



*Pentlandite, Nunavik, Qc, Canada*

## ÉNARGITE (10) et STANNITE (11)

- L'**ÉNARGITE** est une espèce minérale composée d'arsénio-sulfure de cuivre de formule  $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ . Ce minéral se présente fréquemment sous forme de cristaux et souvent aussi sous forme d'agrégats grenus. Généralement, il a un éclat métallique, mais cet éclat se perd avec le temps, à cause de l'oxydation, il peut alors s'iriser.
- La **STANNITE** est une espèce minérale composée de sulfure, de cuivre, fer et étain de formule  $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ , pouvant contenir des traces d'argent, zinc, germanium, cadmium et indium.

# ÉNARGITE (10) et STANNITE (11)

Photos Christian Autotte

Collection Roger Guay



Énergite, Montana (USA)

Collection Roger Guay



Stannite, Hunan (Chine)

# ***BOURNONITE (12)***

La **BOURNONITE** est un minéral composé de sulfure de plomb, de cuivre et d'antimoine dont la formule est  $\text{PbCuSbS}_3$ . Elle cristallise dans le système orthorhombique.

Ses cristaux sont souvent **maclés** (interpénétrés), de couleur gris acier à noire et opaques.

La Bournonite contient environ 42 % de plomb, 13 % de cuivre, 25 % d'antimoine et 20 % de soufre.

*Collection Roger Guay*



*Photo Christian Autotte*

*Bournonite et gerbe de Quartz, Hunan, Chine*

# ALABANDITE (MnS) (13)

**L'ALABANDITE** ou **alabandine** est un rare *sulfure de manganèse*. Il cristallise dans le système cubique et possède la composition chimique suivante:  $Mn^{2+}S$ . Il se développe le plus souvent en dépôts massifs ou granulaire, mais rarement en cristaux cubiques ou octaédriques d'un cm de côté.

Collection Roger Guay



Photo Christian Autotte

*Cristaux d'Alabandite avec Calcite, Mine Uchucchacua, Pérou*

# *L'HYDROGÈNE SULFURÉ ou SULFURE D'HYDROGÈNE, le H<sub>2</sub>S (14)*

- Un des derniers sulfures mais non le moindre: le SULFURE D'HYDROGÈNE, ou HYDROGÈNE SULFURÉ, est un composé chimique de formule H<sub>2</sub>S, constitué de soufre et d'hydrogène. **C'EST UN GAZ INFLAMMABLE, INCOLORE, À L'ODEUR NAUSÉABONDE D'ŒUF POURRI, TRÈS TOXIQUE**, faiblement soluble dans l'eau en donnant un acide faible, l'acide sulfurique. Il réagit avec les solutions aqueuses basiques et les **MÉTAUX** tels que l'argent ou l'acier, même inoxydable.
- Le sulfure d'hydrogène joue un rôle important en **BIOLOGIE**. Il est produit par la dégradation des protéines contenant du soufre et est responsable d'une grande partie de l'odeur fétide des excréments et des gaz, humains et animaux. Il peut résulter de décomposition bactérienne de la matière organique dans des environnements pauvres en oxygène.

# TOXICITÉ de l'HYDROGÈNE SULFURÉ

- Le **seuil de toxicité** du sulfure d'hydrogène est de  $14 \text{ mg/m}^3$ , tandis que son **seuil de perception olfactive** chez l'homme est de  $0,00066 \text{ mg/m}^3$  soit **(0,004 ppm)**, c'est-à-dire que notre système olfactif est capable de détecter cette substance en très faible quantité. Ceci nous permet d'être alerté avant une absorption pouvant être toxique, à condition que l'accroissement de la concentration de gaz ne soit pas instantanée (cas des poches de gaz dans les réseaux d'assainissement).
- Cependant, à partir d'un certain seuil, facile à atteindre (100 à 150 ppm), **le nerf olfactif est paralysé** et le sujet ne sent plus rien.

# ***TOXICITÉ du H<sub>2</sub>S pour l'HOMME***

- 4 ppm : Odeur modérée, facilement détectable (œufs pourris)
- 10 ppm : Irritation des yeux
- 27 ppm : Odeur désagréable
- 100 ppm : Toux, irritation des yeux, *perte de l'odorat* au bout de 2 à 15 minutes
- *200-300 ppm : Inflammation des yeux et irritation de l'appareil respiratoire au bout d'une heure*
- *500-700 ppm : Perte de conscience et mort éventuelle au bout de 30 à 60 minutes*
- *800-1 000 ppm : Perte de conscience rapide, arrêt de la respiration et mort*
- *> 1 000 ppm : Paralysie du diaphragme dès la première inhalation, asphyxie rapide*

# ZINKÉNITE (15)

La **ZINKÉNITE** est une espèce minérale composée de sulfure de plomb et d'antimoine de formule  $Pb_6Sb_{14}S_{27}$ , avec des traces de : Ag; Cu; Fe; As. Elle se rencontre dans les filons de moyen à basse température, associée au Quartz, Stibine, Arsénopyrite, Boulangérite, Jamesonite et à la Sphalérite.

*Collection Roger Guay*



*Photo Christian Autotte*

*Cristaux de Zinkénite, Mine San José, Bolivie*

# *BISMUTHINITE*

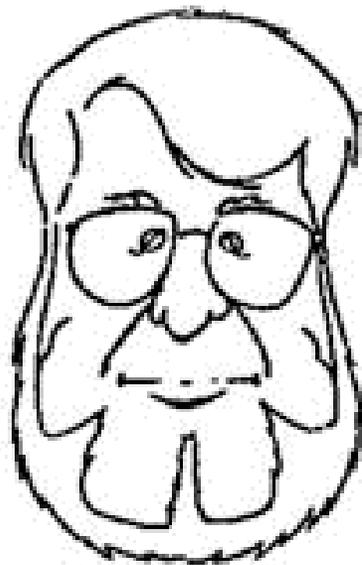
La *BISMUTHINITE* est une espèce minérale correspondant au trisulfure de dibismuth ou sesquisulfure de bismuth de formule  $\text{Bi}_2\text{S}_3$ . Ce minéral relativement rare, caractéristique de l'élément Bismuth, peut contenir des traces des éléments Pb, Cu, Fe, As, Sb, Se, Te. Elle est communément associée au bismuth natif, Bi, et à divers sulfures, dont certains lui sont apparentés comme la Stibnite ou Stibine  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  et l'Orpiment  $\text{As}_2\text{S}_3$ .



*Collection Roger Guay*

*Photo Christian Autotte*

*Bismuthinite, Saxe, Allemagne*



Collection Roger Guay, 1995

B.A. (U. Laval, 1967)  
B.Sc. Microbiologie, (U. Laval, 1971)  
M.Sc. Biochimie, (U. Laval, 1973)  
Ph.D. Microbiologie, (U. Laval, 1976)  
Professeur retraité, Faculté de Médecine Université  
Laval (1976 à 2004)  
V.P. Club de Minéralogie de Montréal (2007-2018)  
V.P. fondateur d'*Enviromine inc.* (1987-2015)

Parcours académique et  
professionnel d'un  
**BIOGÉOMCROMINÉROLOGUE**



## QUELQUES PUBLICATIONS SIGNIFICATIVES de L'AUTEUR en rapport avec le sujet

- Guay, R., M.Silver and A.E.Torma. 1977. Ferrous iron oxidation and uranium extraction by *Thiobacillus ferrooxidans* . Biotechnol.Bioeng., 19: 727-740.
- Torma, A.E. and R.Guay. 1976. Effect of particle size on biodegradation of a sphalerite concentrate. Naturaliste canadien, 103: 133-138.
- Torma, A.E., G.Gabra, R.Guay and M.Silver. 1976. Effect of surface active agents on biodegradation of chalcopyrite. Hydrometallurgy, 1: 301-309.
- Guay, R. and M.Silver. 1975. *Thiobacillus acidophilus sp.nov.* : Isolation and some physiological characteristics. Can.J.Microbiol., 21: 281-288.
- Guay, R. and M.Silver. 1980. Uranium biohydrometallurgy. Process Biochem., 16: 8-12.
- Chia, L.M., W.K.Choi, R.Guay and A.E.Torma. 1989. Electrochemical aspects of pyrite oxidation by *Thiobacillus ferrooxidans* during the leaching of a canadian uranium ore. Proc. Internat. Symp. Biohydrometallurgy. (CANMET, SP89-10).
- Guay, R., J.Ghosh and A.E.Torma. 1989. Kinetics of microbiological production of ferric ion for heap and dump leaching. In: Biotechnology in Minerals and Metal Processing, B.J.Scheiner, F.M.Doyle and S.K.Kawatra eds. Society of Mining Engineers, Inc., Littleton, Colorado, pp 95-106.

## QUELQUES PUBLICATIONS SIGNIFICATIVES de L'AUTEUR en rapport avec le sujet

- Ilgar, E., R.Guay and A.E.Torma. 1993. Kinetics of lithium extraction from spodumene by organic acids produced by *Aspergillus niger*. Biohydrometallurgical Technologies, Vol I: Bioleaching Processes, p 293-301. Torma, Wey & Lakshmanan, eds., TMS 1993.
- Guay, R. 1994. Transformations biologiques du soufre dans l'environnement. Chimiste, 9(2): 9-10.
- Guay, R., O.T.Inal, V.Toniazzo and C.Mustin. 1999. Chalcopyrite leaching by *Thiobacillus ferrooxidans*: effect of shock activation on chalcopyrite surface characteristics and copper solubilization. Biohydrometallurgy and the Environment Toward the Mining of the 21<sup>st</sup> Century. Part A: Bioleaching, Microbiology. R. Amils & A. Ballester, eds., Elsevier. pp. 327-336.
- Cantin, P., S.Dufresne, M.Bastien, A.Karam and R.Guay. 1999. Test method for determining the acid production potential of sulfur-treated soils. Effect of Mineral-Organic-Microorganism Interactions on Soil and Freshwater Environments, pp. 339-348. J.Berthelin *et al.*, eds. Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Cantin, P., A.Karam and R.Guay. 1999. Solubilization of phosphorus from apatite by sulfuric acid produced by the microbiological oxidation of sulfur. Effect of Mineral-Organic-Microorganism Interactions on Soil and Freshwater Environments, pp. 247-252. J.Berthelin *et al.*, eds. Kluwer Academic/Plenum Publishers.