

# Microscopie corrélative et traitement d'images pour la réalisation de cartographies minéralogiques automatisées

Eric PIRARD

Hassan BOUZAHZAH

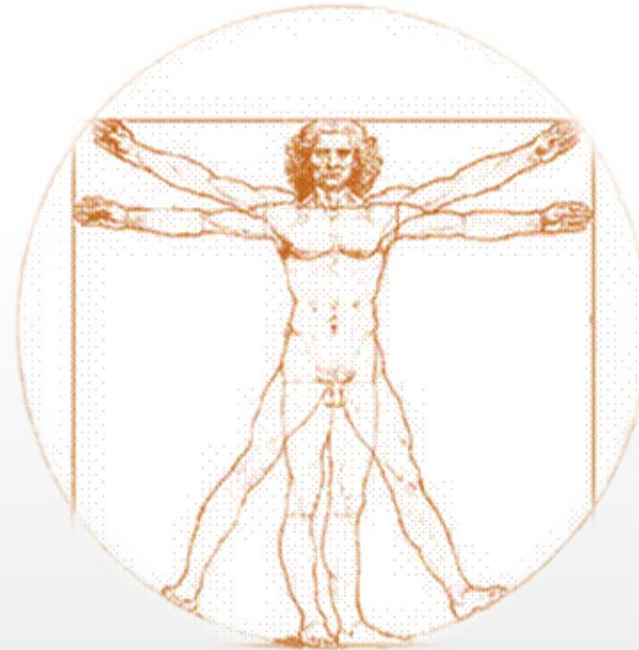
---

# Comprendre notre environnement

# Comprendre notre environnement

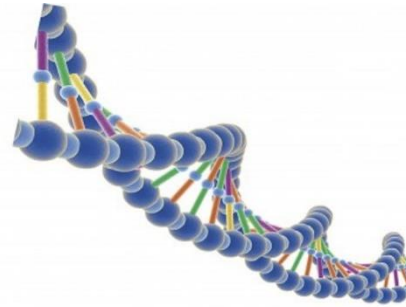
---

- Qu'est-ce ?
  - O 65 %
  - C 18 %
  - H 10 %
  - N 3 %
  - Ca 1,4 %
  - P 1,1 %



# Comprendre notre environnement

- Les bases moléculaires (nucléotides) de notre ADN
  - Adenine  $C_5H_5N_5$
  - Thymine  $C_5H_6N_2O_2$
  - Cytosine  $C_4H_5N_3O$
  - Guanine  $C_5H_5N_5O$

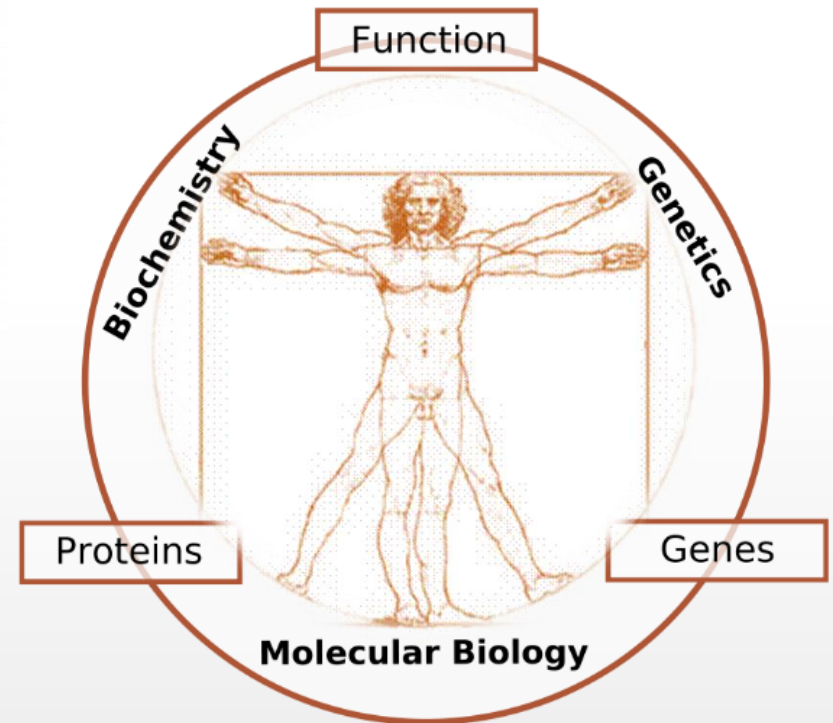


## MOLECULAR BIOLOGY

*...not so much a technique as an approach*

*... with the leading idea of searching below the large-scale manifestations of classical biology...*

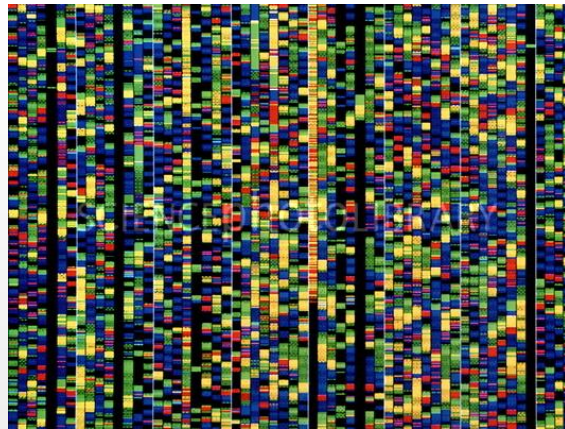
© Wikipedia



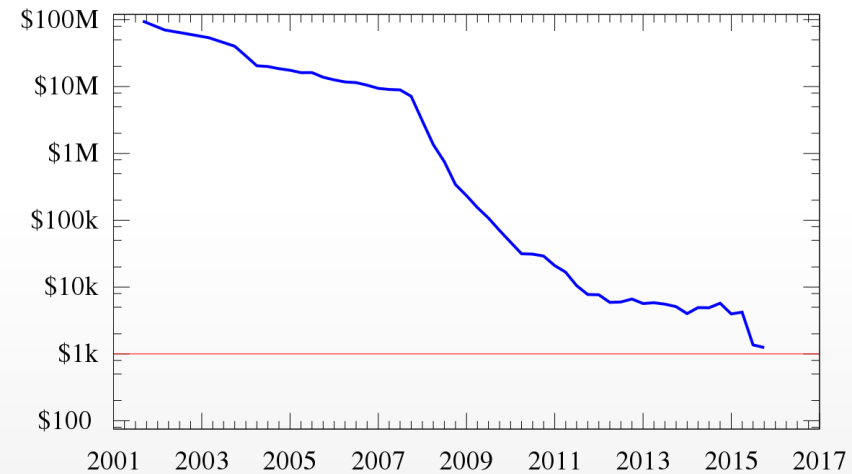
# Comprendre notre environnement

- Séquençage du Génome Humain
  - 22 000 gènes
  - 3,4 milliards de paires de nucléotides

DNA sequencing is the process of determining the precise order of nucleotides within a DNA molecule.



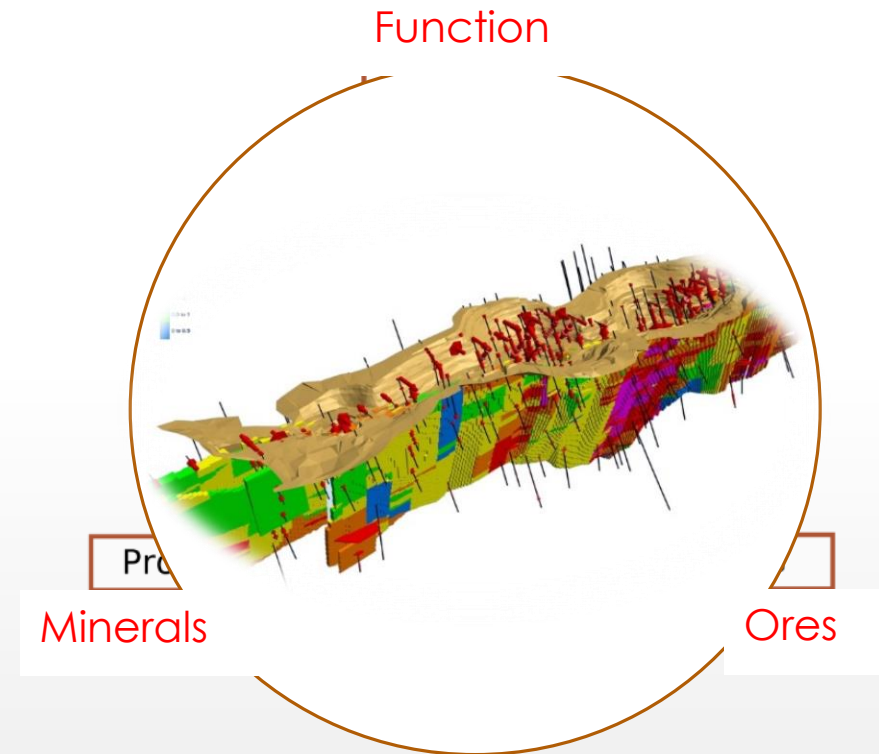
Cost to sequence a human genome (USD)



Total cost of sequencing a human genome over time as calculated by the NHGRI

# Géologie Moléculaire

- Molecular Geology
  - Fast and Accurate Mineral Identification
    - Valuable Minerals
    - Gangue Minerals
    - Elemental Department
- Sequencing Ores
  - Fully Automated Quantitative Analysis
    - Modal Analysis (% mass)
    - Porosity and fractures
    - Grain/Crystal size
    - Grain shape
    - Microtextures
- Predicting functionality
  - Process Oriented Modelling - Indices
    - ✓ Breakability, Floatability,...
    - ✓ Leachability, Thermal expansion,...



---

# Cartographies Minéralogiques

*I have a dream...*

# Cartographies Minéralogiques

---

- La minéralogie comme outil prédictif en métallurgie extractive (géométaballurgie)
  - 2Mt de scories ottomanes @ 0,38 % Co
    - Quelles perspectives de valorisation ?



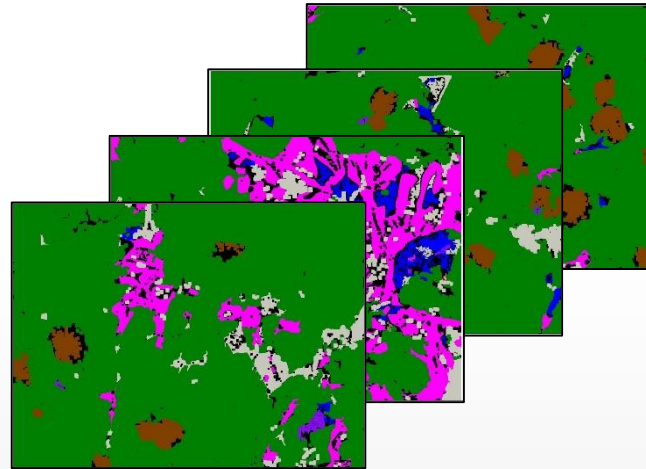
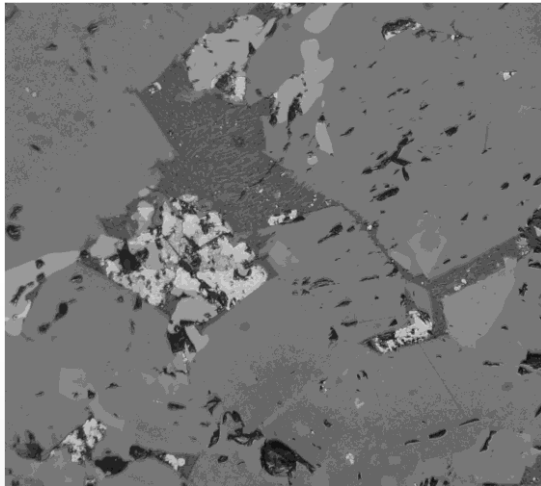
## Analyse Chimique (% Poids)

<b>FeO</b>	<b>59.7 %</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>23.5 %</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>11.6 %</b>
<b>S</b>	<b>1.8 %</b>
<b>Cu</b>	<b>0.76 %</b>
<b>Co</b>	<b>0.38 %</b>



# Cartographies Minéralogiques

- Analyse modale par microscopie en lumière réfléchie
  - Segmentation basée sur la réflectance moyenne (niveaux de gris)



Mineral	% Wt	Co %	Co Dpt%
Fayalite	65.54	0.54	<b>81.28</b>
Wüstite	5.97	0.15	6.00
Hercynite	17.92	0.67	9.24
Leucite	5.43	0.01	0.07
Pyrrhotite	3.93	0.34	3.11
Cu Sulfides	1.20	0.10	0.30

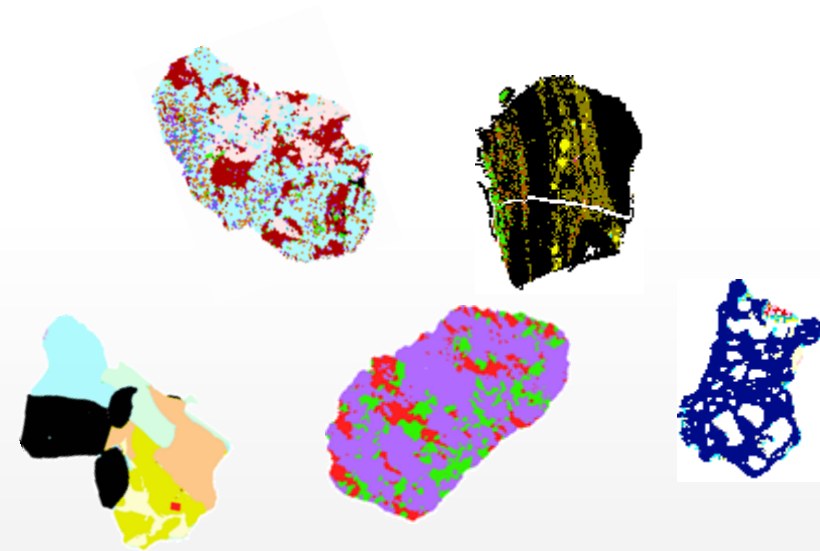
**HOPELESS...**

*Pirard, E. (1991). Quantitative mineralogical analysis of Cobalt and Copper distribution in historical slags from Küre (Turkey). Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 84(946), 87-91*

# Cartographies Minéralogiques

---

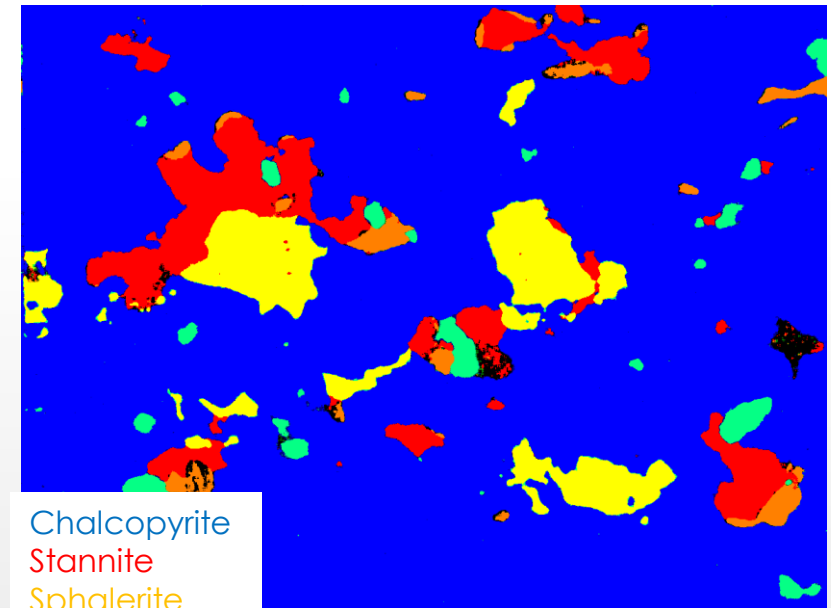
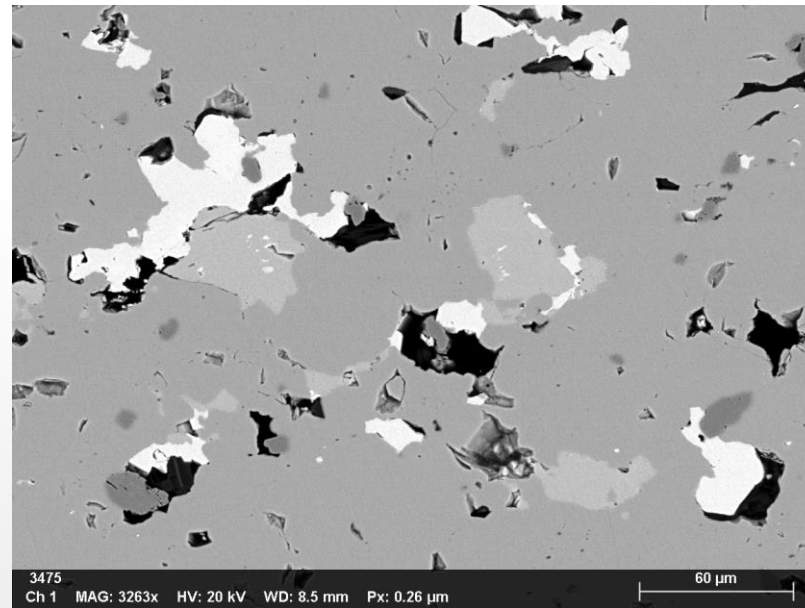
- 35 ans de développements ... et de stagnations
  - « Automated Mineralogy »
    - QEM SCAN; MLA;...



Result of EDX mapping © QEM SCAN

# Cartographies Minéralogiques

- En 2019
  - ZEISS MINERALOGIC
    - Sigma300 FEG SEM + Micro-analyse EDX à haute cadence (2 x 30mm<sup>2</sup> Brüker)
      - ✓ 3000 cts / pixel => step 5 µm => 30' à 1h / image



Chalcopyrite  
Stannite  
Sphalerite  
Pyrite  
Quartz  
Al-Si

# Cartographies Minéralogiques

- On peut mieux faire...
  - En quelques secondes tout est là!

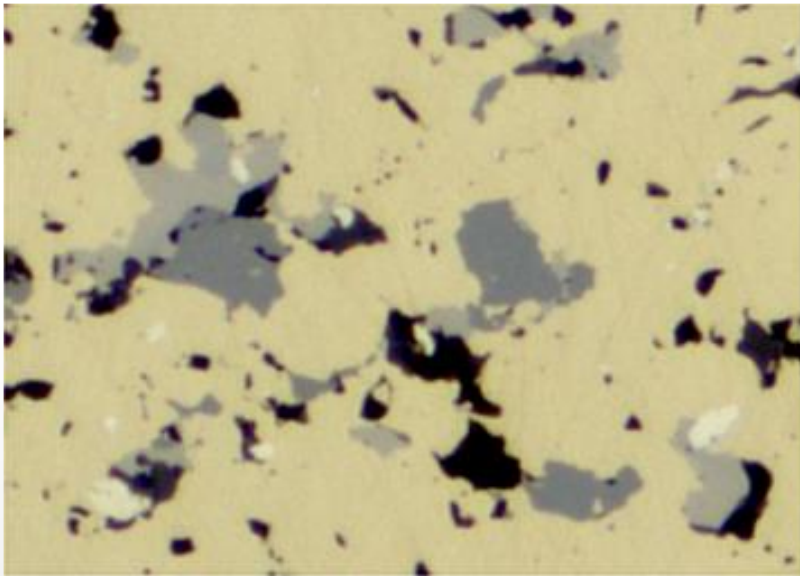


Image RGB en lumière réfléchie

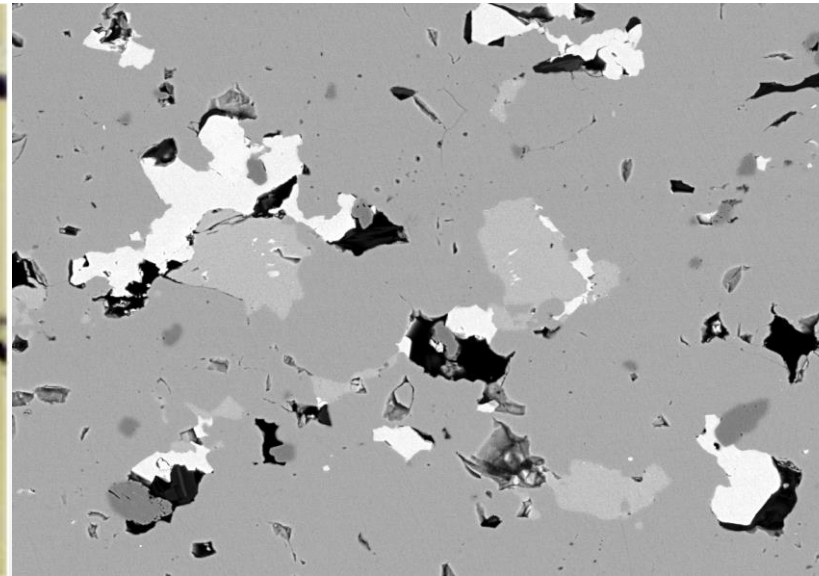
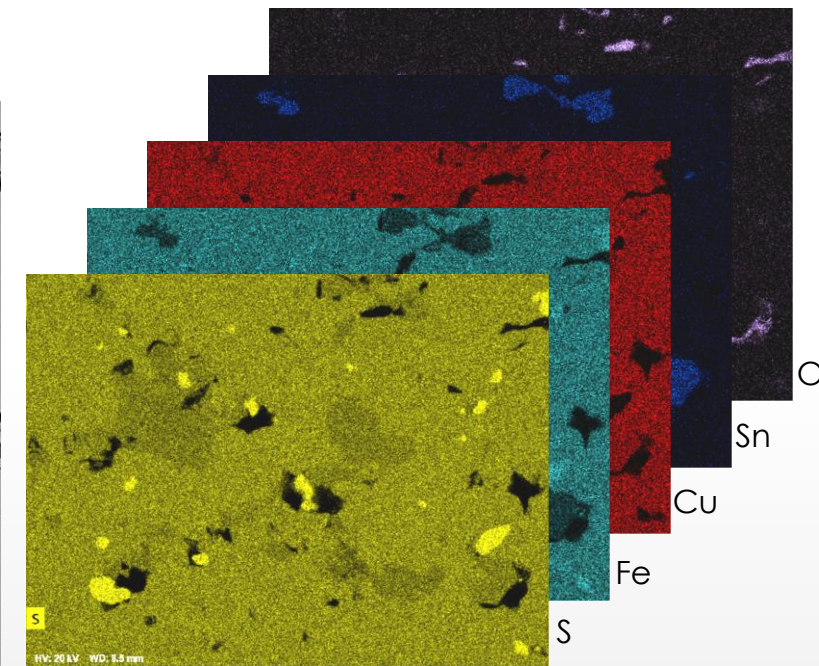


Image BSE (électrons rétrodiffusés)



Hit maps EDX (50 secs)



---

# Microscopie Corrélatrice

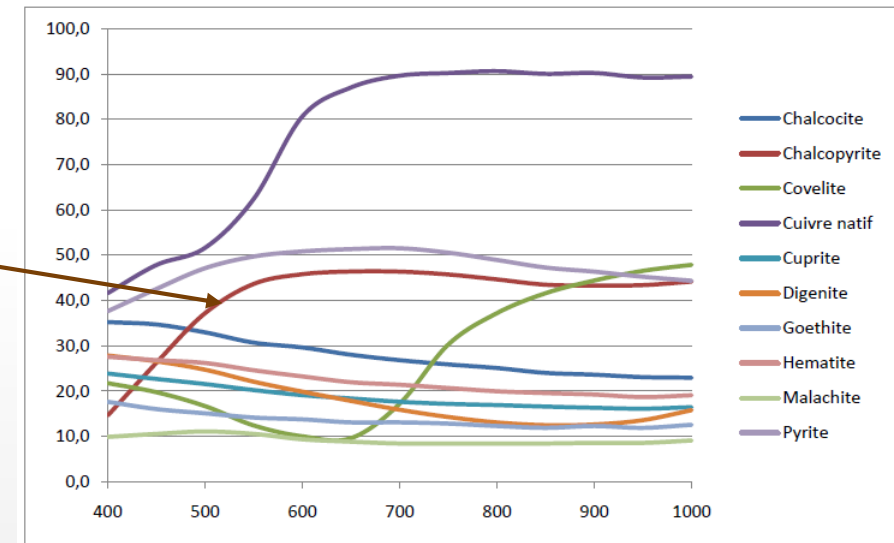
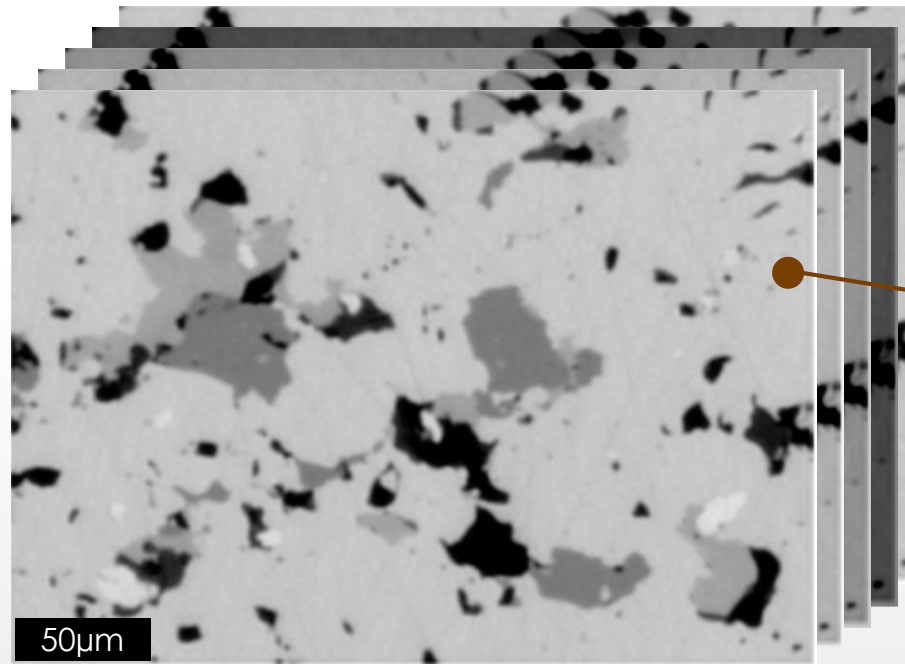
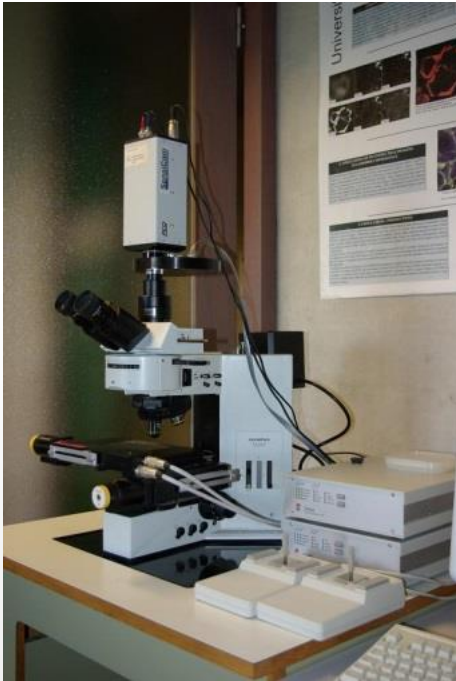
*I have a plan...*

# Microscopie Photonique



UPM Politecnica de Madrid  
Université de Liège  
TSL Labs  
First Quantum (CLC)  
KGHM

- Acquisition Multispectrale en Lumière Réfléchiée
  - **AMCO** - Automated Mineral Characterization of Ores

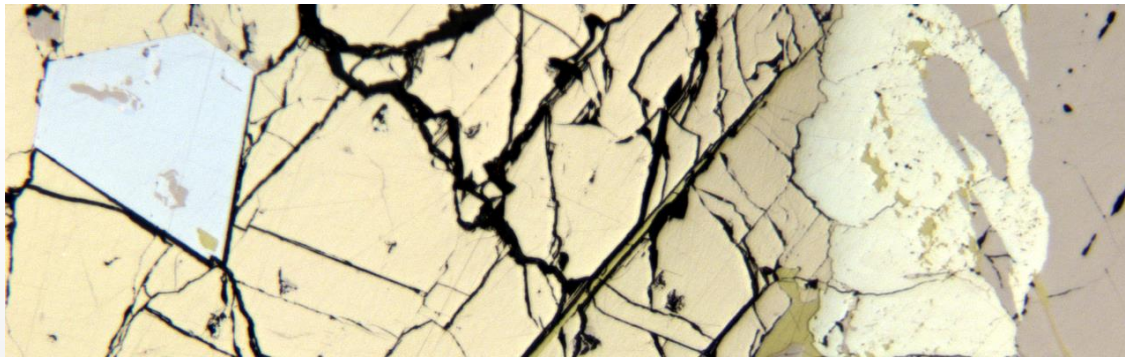


Base de données de la réflectance spéculaire des principaux minéraux opaques (400nm-1000nm)

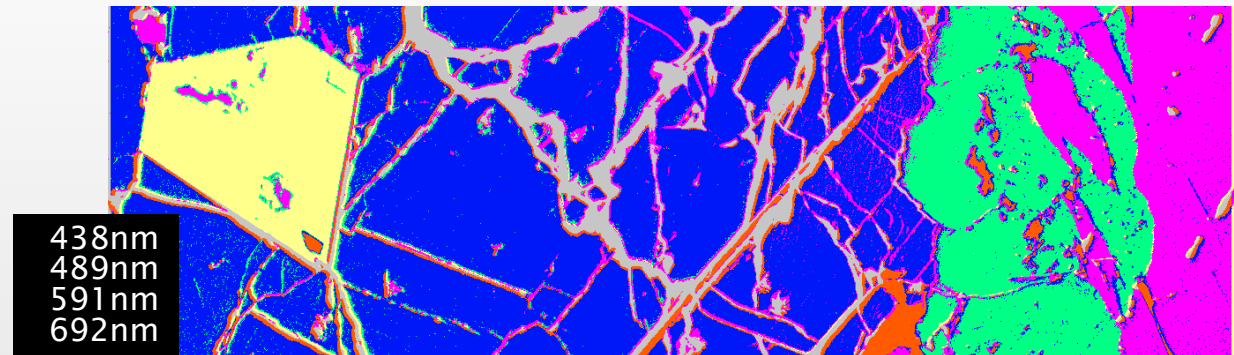
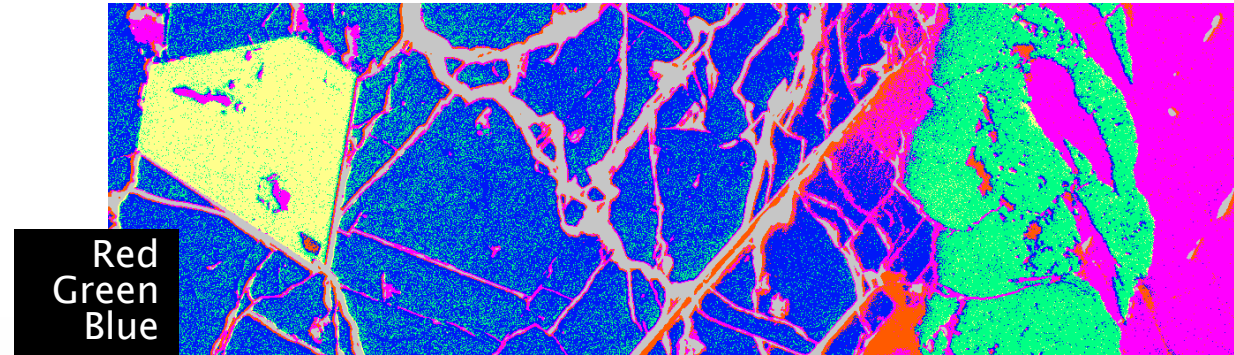
Imagerie calibrée utilisant une gamme de filtres interférentiels (400 nm – 1000 nm)

# Microscopie Photonique

- Acquisition Multispectrale en Lumière Réfléchiée
  - **AMCO** - Automated Mineral Characterization of Ores
  - Classification supervisée (Maximum Likelihood)

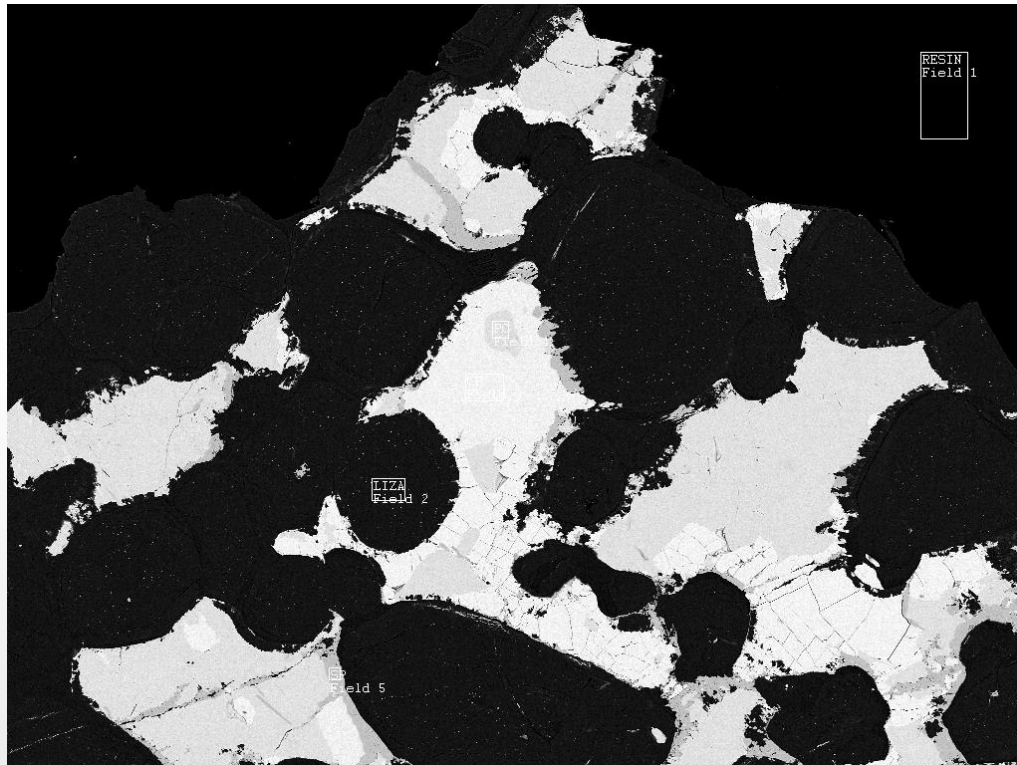


Imagerie couleur (RGB) vs. multispectrale



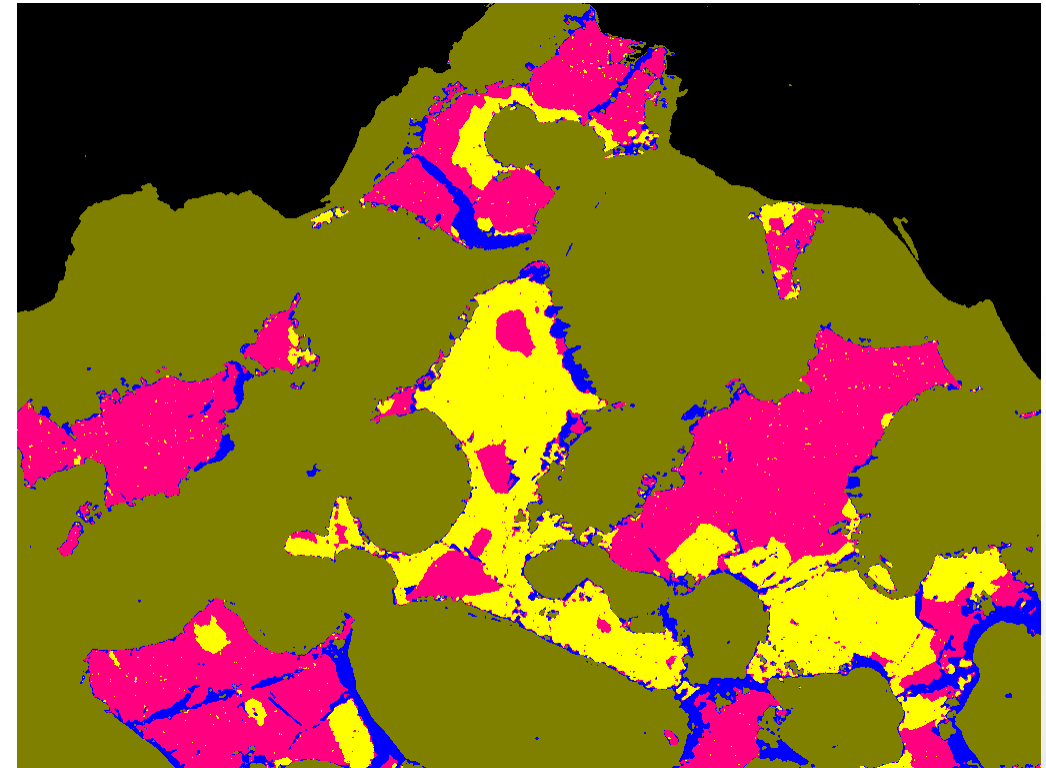
# Microscopie Electronique

- Imagerie en Electrons Rétrodiffusés (BSE)
  - Préparation d'échantillons (carbon black)
  - Filtrage médian et classificateur spectro-spatial



Classes

- background
- RESIN
- LIZA
- CP
- PO
- SP

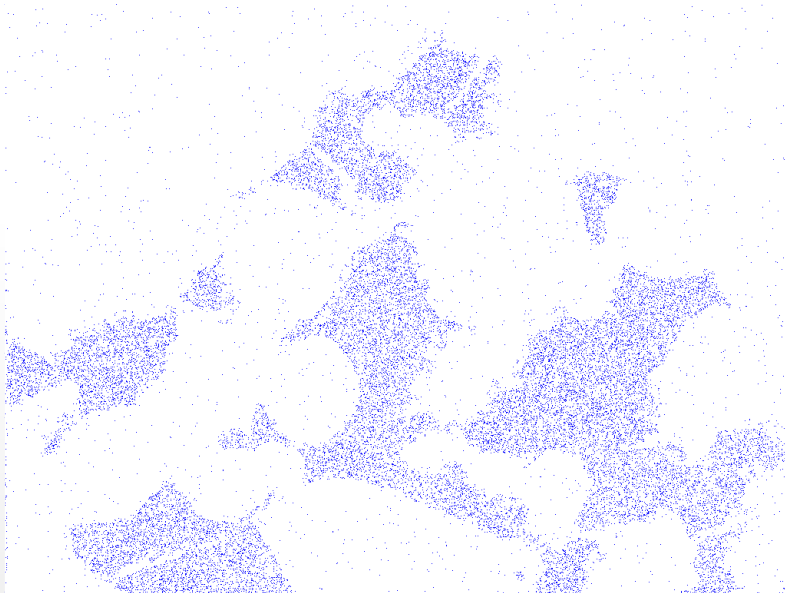




# Microscopie Electronique

---

- Cartographie EDX rapide (Heat Maps)
  - *Cycle de balayage de 10 à 50 sec*



Soufre (10 secs)



Soufre (30 secs)

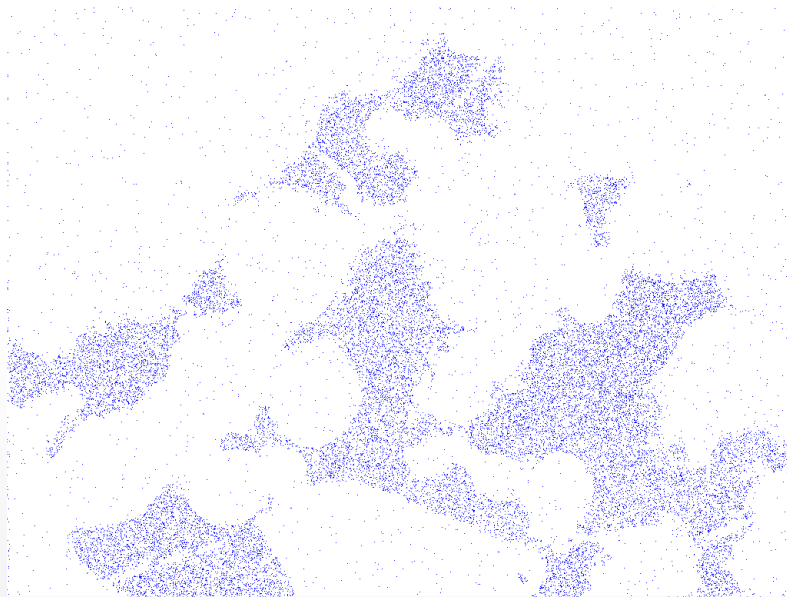


Soufre (50 secs)

# Microscopie Electronique

---

- Masque élémentaire @ 20  $\mu$ sec / pixel
  - Ouverture/Hole-Fill/Fermeture



Cartographie du Soufre à 20  $\mu$ sec/pixel  
(20 secs / image)



Masque des phases sulfurées en 20 sec

# Microscopie Electronique

- Masque des phases majeures @ 20  $\mu$ sec / pixel
  - Fe-Ni-S; Fe-Cu-S et Fe-S



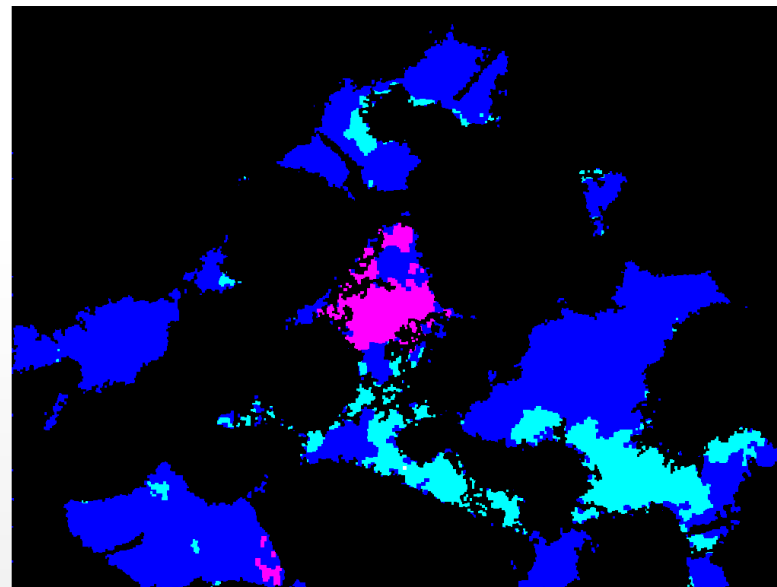
S



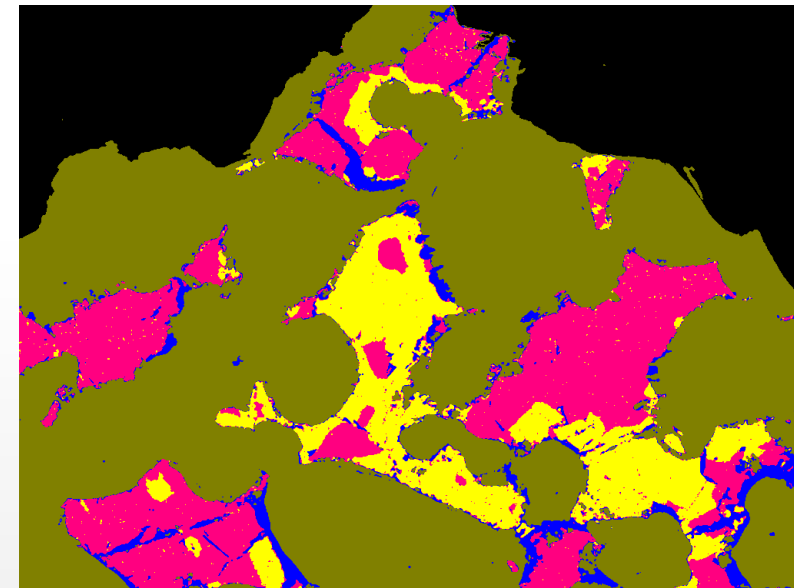
Cu



Fe



« germes » des phases FeNiS(bleu);  
FeCuS(rose); FeS(cyan)



Classification issue de la seule BSE

# Microscopie Electronique

- Identification minéralogique
  - Qualité de la signature en fonction du nb coups

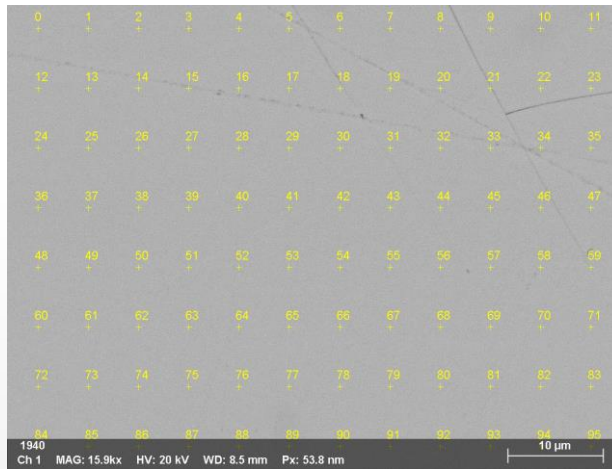
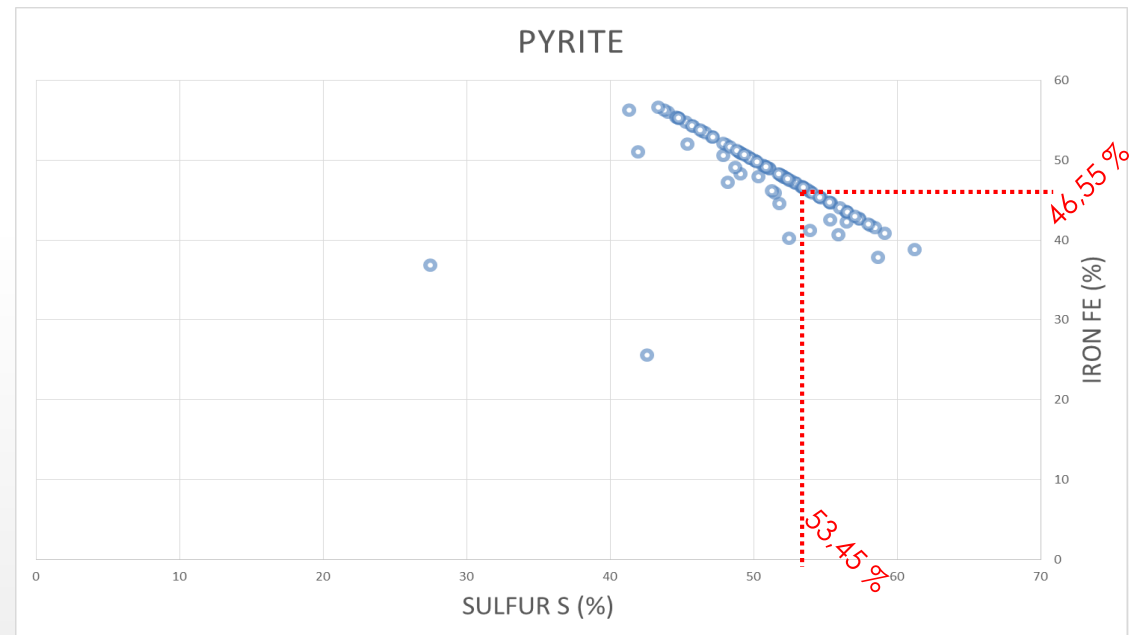


Image d'un cristal de pyrite avec une grille de 96 points d'analyses



Signature des 96 analyses EDX du cristal de pyrite à **1000cts**  
Zeiss FEG Sigma 500 + Bruker 30 mm<sup>2</sup> + Esprit

# Microscopie Electronique

- Identification minéralogique
  - Qualité de la signature en fonction du nb coups

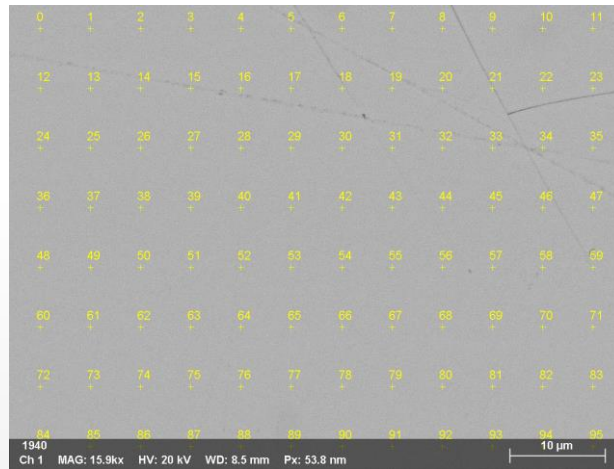
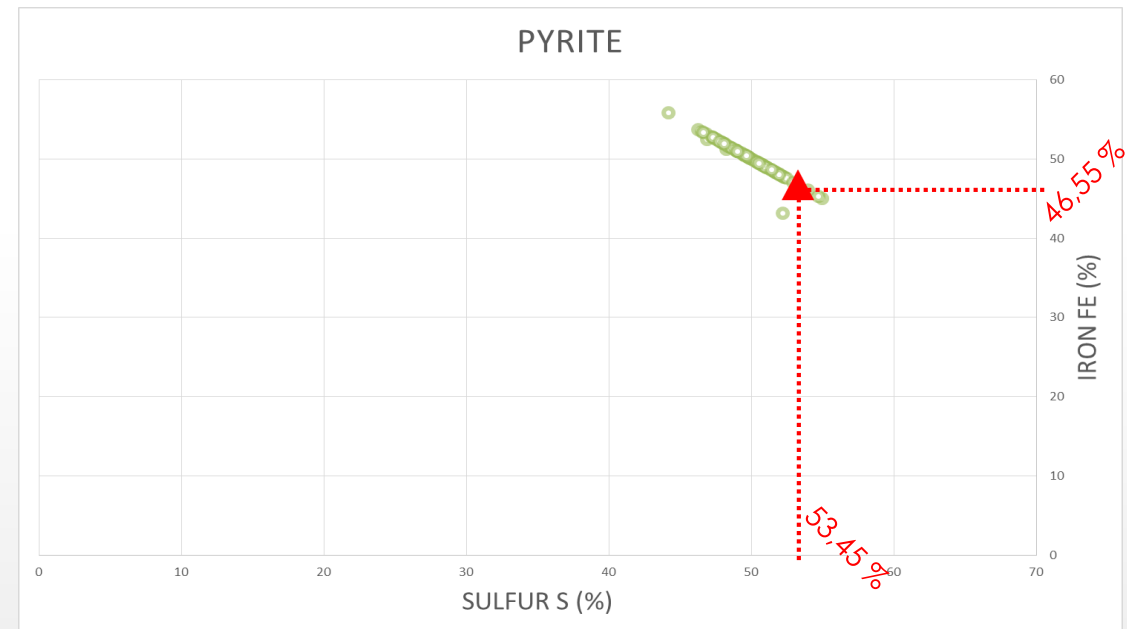


Image d'un cristal de pyrite avec une grille de 96 points d'analyses



Signature des 96 analyses EDX du cristal de pyrite à **6000cts**  
Zeiss FEG Sigma 500 + Bruker 30 mm<sup>2</sup> + Esprit

# Microscopie Electronique

- Identification minéralogique
  - Qualité de la signature en fonction du nb coups

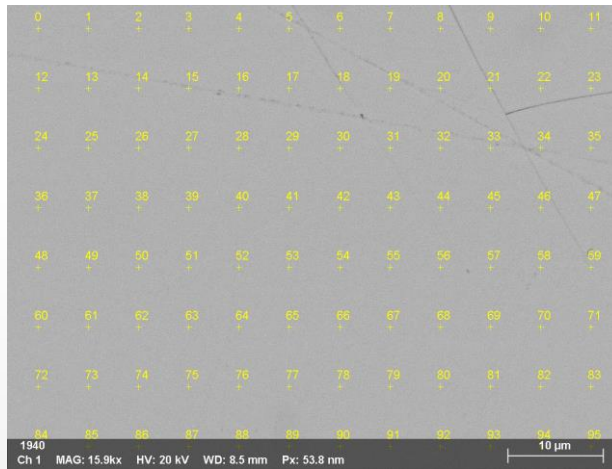
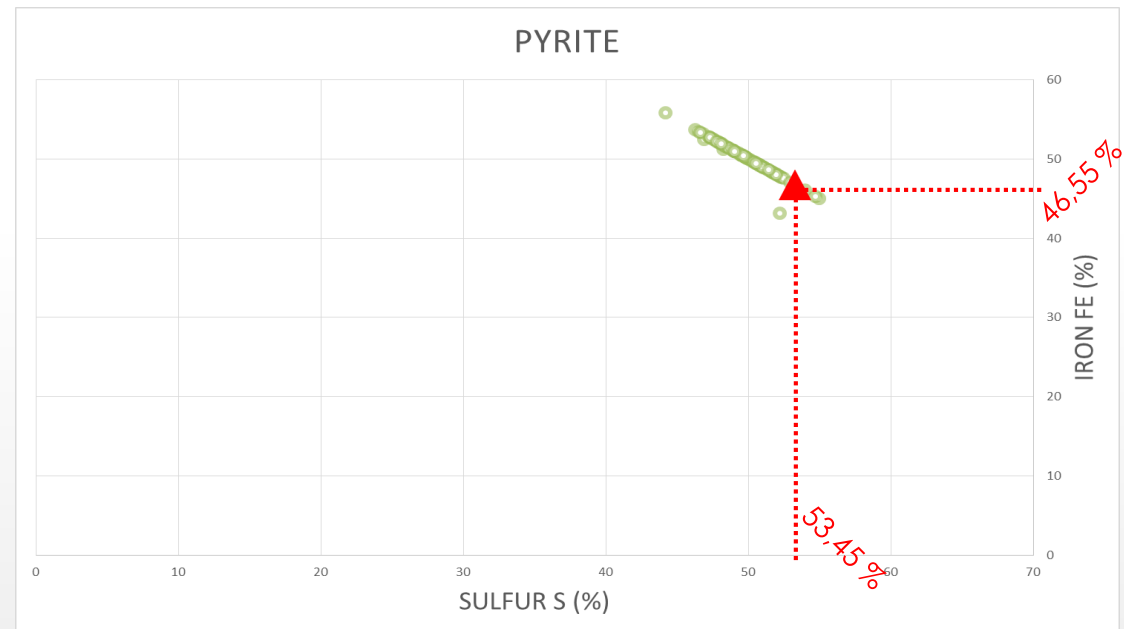


Image d'un cristal de pyrite avec une grille de 96 points d'analyses



Signature des 96 analyses EDX du cristal de pyrite à **6000cts**  
Zeiss FEG Sigma 500 + Bruker 30 mm<sup>2</sup> + Esprit

# Microscopie Electronique

- Identification minéralogique
  - Discrimination entre deux sulfures de Fer ( $\text{FeS}$  et  $\text{FeS}_2$ ) en fonction du nb coups

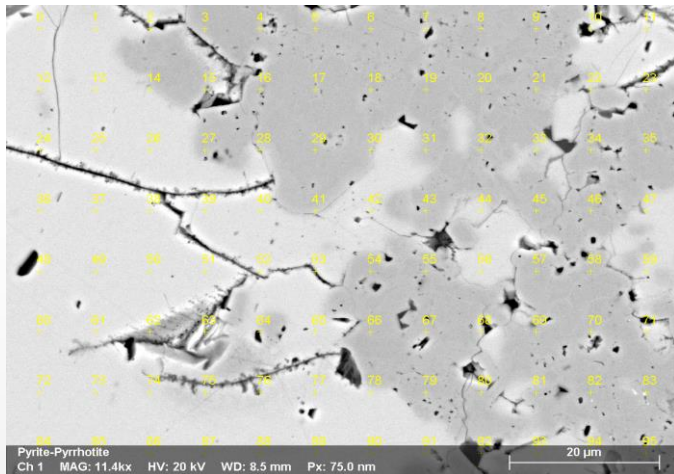
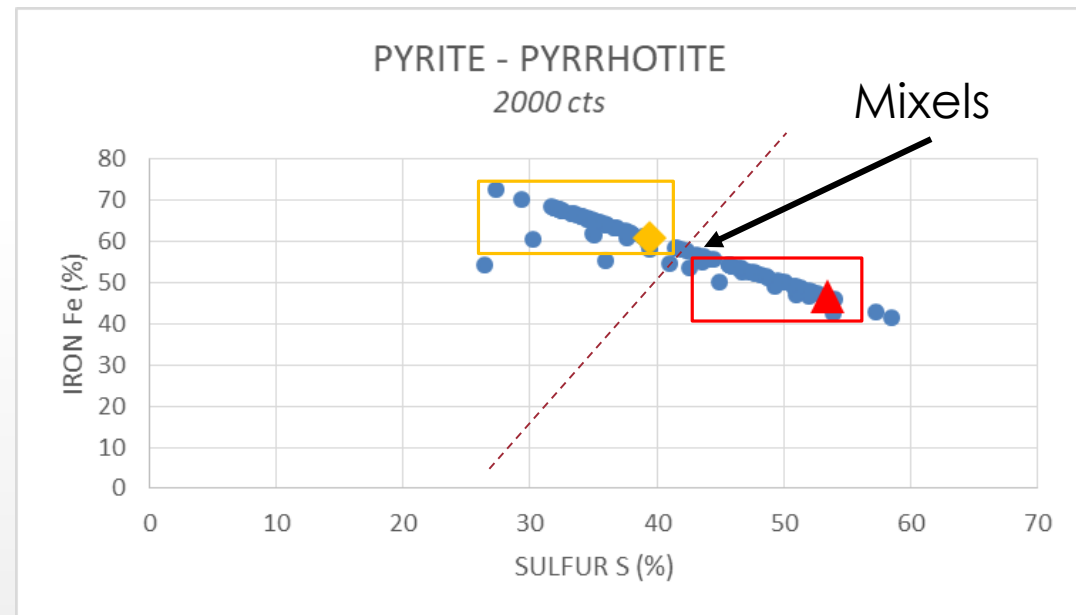


Image of a pyrite-pyrrhotite intergrowth with a grid of 96 EDX probes



Signature des 96 analyses EDX du mélange Pyrite-Pyrrhotite à **2000cts**  
Zeiss FEG Sigma 500 + Bruker 30 mm<sup>2</sup> + Esprit



# Conclusions

- La cartographie minéralogique
  - Est une réalité
  - Requiert une vraie expertise minéralogique (supervision)
  - Reste chronophage et par conséquent peu représentative
- Les pistes d'amélioration passent par
  - L'utilisation du potentiel d'une vraie microscopie corrélative
  - Le développement de stratégies intelligentes (multi-échelles)
  - L'utilisation d'algorithmes de classification multivariés
  - La mise au point d'une vraie intelligence minéralogique artificielle (deep learning)

