

## MASTER 2 TERRE ET GEORESSOURCES

### Sujet de stage de recherche 2024-2025

# Métaux critiques en trace dans les minéraux majeurs - vers une exploration et exploitation durables des ressources minérales: étude de cas du thallium et de l'or dans la pyrite

Encadrants: Gleb Pokrovski (DR CNRS), GET, [gleb.pokrovski@get.omp.eu](mailto:gleb.pokrovski@get.omp.eu); [gleb.pokrovski@univ-tlse3.fr](mailto:gleb.pokrovski@univ-tlse3.fr); tél.: 0561332618;

co-encadrant externe: Kalin Kouzmanov (PR Univ. de Genève), [Kalin.Kouzmanov@unige.ch](mailto:Kalin.Kouzmanov@unige.ch)  
à partir du 01/01/2025 (ou même plus tôt) pour 6 mois

Laboratoire ou entreprise d'accueil: GET, Toulouse

#### Descriptif du projet (préciser les objectifs et les méthodes utilisées)

La demande sociétale croissante pour les métaux traces critiques (e.g., Co, In, Ge, Ga, Bi, Te, REE, PGE...), nécessaires aux technologies modernes et à la transition vers les énergies vertes, a généré un besoin criant d'approches plus efficaces pour l'exploration minière et l'identification de nouvelles sources économiques de tels métaux. En même temps, cette demande a engendré une préoccupation environnementale due à la libération grandissante des éléments toxiques dans la biosphère par les activités d'exploitation et de traitement des minerais. La plupart des métaux critiques chalcophiles proviennent des gisements hydrothermaux où la pyrite est le minerai le plus abondant. En effet, ce minéral sulfure ( $\text{FeS}_2$ ) le plus répandu sur Terre est l'hôte principal de la plupart de ces métaux et d'autres éléments mineurs qui les accompagnent étroitement (e.g., As, Au, Ag, Se, Cd, Hg, Tl). Tous ces éléments, qui sont en état de trace à l'échelle planétaire, avec des concentrations moyennes de l'ordre de ppb à ppm dans la croûte terrestre, peuvent fortement s'enrichir dans la pyrite, avec des facteurs d'enrichissement allant de mille à un million. Non seulement la pyrite émerge donc comme la source économique principale de ces métaux, mais aussi comme leur traceur géochimique. En effet, leurs signatures conservées dans le minéral représentent une source précieuse d'information sur les sources des métaux et fluides, les conditions de transport et précipitation, ou encore la séquence des phénomènes de minéralisation et l'évolution des systèmes hydrothermaux. Ainsi la connaissance fondamentale de leur distribution, concentration, statut redox, chimique et structural dans la pyrite et des mécanismes et facteurs menant à leur incorporation dans le minéral sont indispensables à la fois pour i) tracer les conditions de formation des minéralisations hydrothermales et ainsi améliorer l'exploration et ii) optimiser l'exploitation et l'extraction des métaux et la remédiation post-minière.

Jusqu'à présent, cette connaissance est restée très disparate faute d'outils adéquates en métallogénie pour l'étude d'éléments traces cachés dans les minéraux majeurs. Grace aux progrès inégaux d'outils interdisciplinaires, analytiques (e.g., microanalyse in-situ, spectroscopie synchrotron), expérimentaux (e.g., réacteurs hydrothermaux permettant de simuler la formation de gisement en laboratoire) et théoriques (modélisations moléculaires et physico-chimiques), il devient aujourd'hui possible de faire un grand pas vers la compréhension de la nature et du comportement des éléments traces dans la pyrite et d'autres minéraux majeurs et ainsi de valoriser cette nouvelle connaissance dans les

domaines fondamentaux (évolution de la Terre) et appliqués (économie et société). Le présent projet se focalise sur l'étude conjointe de l'or et du thallium dans la pyrite hydrothermale.

L'or est le roi de la métallogénie. Son état dans la pyrite a fait l'objet de maintes études empiriques (e.g., Reich et al., 2005), mais ce n'est que récemment que ses relations fondamentales physico-chimiques avec l'arsenic ont été révélées (Pokrovski et al., 2019, 2021). Ces études exploratoires nous serviront de base pour affiner et élargir le modèle d'incorporation de l'or dans la pyrite et mieux quantifier le contrôle de l'arsenic et d'autres éléments, comme le thallium, sur l'incorporation et le partage de l'or dans le système pyrite-fluide.

Bien que n'étant pas (encore) lui-même un élément économiquement 'critique', le thallium a été donc choisi dans cette étude pour les raisons suivantes. Premièrement, cet élément a émergé récemment comme traceur de l'or et des éléments critiques associés (e.g., Pt, Pd, Ge, Ga, Te, In) avec lesquels le Tl est étroitement corrélé dans les pyrites d'origine hydrothermale (e.g., D'Orazio et al., 2017; Georges et al., 2019) et de cette façon peut être utilisé comme élément marqueur des anomalies géochimiques associées aux gisements de la série porphyre-épithermale (e.g., Fitzpayne et al., 2018). Deuxièmement, le thallium, étant toxique, est considéré comme élément pénalisant pour le minerai ainsi réduisant significativement son prix (e.g., Deditius and Reich, 2016). Troisièmement, les activités minières croissantes mènent inévitablement, après extraction/traitement, à l'accumulation de pyrite thallifère dans les tailings et d'autres résidus miniers (e.g., Li et al., 2017; Liu et al., 2019). Cette pyrite peut donc présenter une menace pour l'environnement due à l'altération/oxydation en libérant le Tl qui se situe parmi les éléments les plus toxiques du tableau périodique (la concentration permise pour Tl dans l'eau potable, 2 µg/L, est similaire à celle de Hg (2 µg/L) et bien plus basse que celles de Cd (5 µg/L), As (10 µg/L), Pb (15 µg/L) ou Se (50 µg/L); Environmental Protection Agency, EPA). Enfin, le thallium, qui se présente dans les environnements terrestres principalement à deux degrés d'oxydation formels, +1 et +3, et se comporte en milieu hydrothermal de manière similaire à d'autres métaux chalcophiles et lithophiles (e.g., Cd, In, Ga, Hg, Au, Ag, Te...), pourrait servir d'analogue pour ces éléments dont certains sont critiques. Il est donc attendu que les données sur l'état et le partage du Tl dans le système pyrite-fluide hydrothermal qui seront obtenues dans ce travail pourront être transposées sur ceux-ci et d'autres éléments similaires.

Le présent sujet M2 a pour but d'étudier la spéciation du thallium et de l'or dans la pyrite et les processus de leur échange avec le fluide hydrothermal, via une étude combinée expérimentale, analytique et de modélisation. Ce sujet fait partie d'un plus grand projet en cours d'élaboration, en coll. avec l'Université de Genève (K. Kouzmanov), l'Institut Néel (J-L. Hazemann), et l'Université Laval (G. Beaudoin) sur les éléments critiques dans la pyrite hydrothermale, en combinant des approches naturalistes et expérimentales de haute pression et température, avec des méthodes de pointe micro-analytiques et de synchrotron.

L'équipe toulousaine se chargera, à l'aide de l'étudiant, de simuler expérimentalement, en laboratoire aux conditions contrôlées, les processus de formation de pyrites aurifères et thallifères et de les caractériser par diverses méthodes de micro-analyse (SEM, EPMA, LA-ICPMS, ICP-AES), ainsi que de déterminer, pour la première fois, les coefficients de partage de Tl et Au entre fluide et pyrite en conditions hydrothermales. L'équipe suisse sera en charge de la caractérisation de pyrites naturelles porteuses de Tl et d'Au, issues de divers gisements hydrothermaux. Les échantillons naturels et expérimentaux ainsi caractérisés seront analysés par spectroscopie d'absorption X haute résolution sur synchrotron (ESRF, Grenoble, coll. avec INEEL) qui est la méthode la plus directe permettant de connaître l'état redox et structural du Tl et de l'Au dans la pyrite. Une session de synchrotron est programmée fin février 2025. Durant le stage à Toulouse, l'étudiant interagira étroitement avec les équipes partenaires (Grenoble, Genève, Québec). De courtes visites en Suisse et au Canada pour certaines analyses complémentaires (LA-ICPMS, EPMA) pourraient également être envisagées.

A l'issue de ce projet interdisciplinaire, nous espérons répondre aux questions fondamentales suivantes:

- Quelle est la véritable nature chimique des métaux trace comme le thallium et l'or dans la pyrite, leur concentration et distribution, leur état redox et structural, leur partage pyrite-fluide?
- Les signatures de Tl dans la pyrite peuvent-elles aider à tracer les processus hydrothermaux qui contrôlent la concentration et distribution de l'or à différentes échelles, depuis le minerai jusqu'une province métallogénique?
- Comment le thallium et d'autres éléments similaires sont libérés de la pyrite lors de son évolution hypogène et son altération supergène et quel est l'impact post-mine potentiel de ses métaux sur l'environnement?

### Références à consulter avant de postuler à ce stage:

D'Orazio et al., *Miner Deposita*, 52:687–707 (2017).  
Fitzpayne et al., *Minerals* 8:548 (2018).  
George et al., *Ore Geol Rev*, 107:364–380 (2019).  
Li et al., *Environ Sci Pollut Res*, 24:12212–12219 (2017).  
Liu et al., *Environ Pollut*, 248:906–915 (2019).  
Deditius and Reich, *Amer Miner*, 101:1451–1459 (2016).  
Pokrovski et al., *PNAS*, 112:13484–13489 (2015).  
Pokrovski et al., *Ore Geol Rev*, 109:545–563 (2019).  
Pokrovski et al., *Geochem Persp Lett*, 17:39–44 (2021).  
Reich et al., *Geochim Cosmochim Acta*, 69:2781–2796 (2005).

### Compétences requises

Ce stage s'adresse à des candidats qui sont passionnés par la géochimie, les matériaux, les georressources, les fluides hydrothermaux et qui possèdent des bonnes bases de l'expérimentation en laboratoire. Les candidats doivent, également, avoir de bonnes connaissances en analyse chimique et minérale.

Les candidats intéressés doivent envoyer, à [gleb.pokrovski@get.omp.eu](mailto:gleb.pokrovski@get.omp.eu) avant le **26 octobre 2024**, les documents suivants: une lettre de motivation pour ce stage précis, un CV détaillé, des révéls de notes L3 et M1 et le mémoire de stade de M1 complet au format pdf. Des dossiers incomplets ne seront pas considérés.

### Financement et partenaires

Ce stage fait partie de projets entre le GET, l'Institut Néel et l'Université de Genève qui, dans un premier temps, incluront des échanges d'étudiants et de chercheurs entre la France et la Suisse et une expérience commune au synchrotron. Les moyens expérimentaux, analytiques et théoriques nécessaires à ce projet ont été récemment mis en œuvre dans le cadre de programmes ANR et Institut Carnot pour l'étude des métaux traces dans les minéraux majeurs (voir les références ci-dessus).