



HAL
open science

Les systèmes hydrothermaux aurifères : des archives géologiques de l'évolution du système Terre et des défis pour l'exploration minérale

Anne-Sylvie André-Mayer, Aurélien Eglinger, Arnaud Fontaine, Vincent Combes, Julien Perret, Nicolas Thebaud, Célestine Berthier, Rémi Bosc, Julien Feneyrol, Alain Chauvet, et al.

► To cite this version:

Anne-Sylvie André-Mayer, Aurélien Eglinger, Arnaud Fontaine, Vincent Combes, Julien Perret, et al.. Les systèmes hydrothermaux aurifères : des archives géologiques de l'évolution du système Terre et des défis pour l'exploration minérale. *Géologues*, 2024, pp.26-33. hal-04801029

HAL Id: hal-04801029

<https://hal.science/hal-04801029v1>

Submitted on 29 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les systèmes hydrothermaux aurifères : des archives géologiques de l'évolution du système Terre et des défis pour l'exploration minérale

Anne-Sylvie André-Mayer¹, Aurélien Eglinger^{1*}, Arnaud Fontaine², Vincent Combes³, Julien Perret⁴, Nicolas Thébaud⁴, Célestine Berthier^{1,2}, Rémi Bosc², Julien Feneyrol², Alain Chauvet⁵, Blandine Gourcerol⁶, Quentin Masurel⁴, Lucas Marulier¹, Alix Hauteville^{1,7}, Valentine Charvet¹, Guilhem Barthes¹, Nicolas Mériaud⁸, Virginie Masson², Christophe Bonnetti², Mark Jessell⁴

Les systèmes hydrothermaux aurifères représentent des archives géologiques se formant dans différents contextes géodynamiques et à différents niveaux crustaux. Les gisements, qui matérialisent des fortes anomalies géochimiques en or et métaux associés, permettent de tracer des processus géologiques très variés, à différentes échelles de temps et d'espace. Conceptualiser de nouveaux modèles métallogéniques innovants pour les systèmes hydrothermaux aurifères optimise la découverte de gisements métalliques, qui permettront à leur tour d'affiner notre compréhension des processus engagés dans leur formation. Un partenariat fertile entre recherche scientifique et industrie minière est ainsi stratégique pour identifier les verrous scientifiques et optimiser l'exploration minérale.

Introduction

Optimiser la compréhension des systèmes métallogéniques...

Les gisements métalliques représentent des anomalies géochimiques, géométriques et structurales résultant d'une variété de processus géologiques. Les gisements représentent donc des concentrations de métaux dans un volume réduit en comparaison de celui de la croûte terrestre, même s'ils sont le produit final de processus qui peuvent impliquer l'ensemble de la lithosphère. Il est ainsi nécessaire d'opérer un zoom-dézoom spatial et temporel pour étudier les conditions favorables à leur genèse, de l'échelle nanométrique à l'échelle lithosphérique, de l'échelle instantanée à l'échelle d'un ou plusieurs cycles orogéniques : on parle alors de système métallogénique. Cette notion a été historiquement développée par l'école française (Launay 1913), de par l'emprise coloniale leur donnant accès à des échelles de comparaison régionale à continentale, puis par l'école soviétique (Bilibin, 1955), de par l'étendue de l'ensemble du bloc soviétique. À l'heure actuelle, le concept de système métallogénique (Wyborn et al., 1994; McCuaig et Hronsky, 2014) est défini par une approche systémique, multi-échelle et pluridisciplinaire intégrant l'ensemble des facteurs géologiques contrôlant la formation et la préservation des gisements (Fig. 1). L'intérêt de cette approche conceptuelle réside dans sa capacité à prédire les relations génétiques potentielles entre différents types de gisements.

Figure 1. Illustration d'un système métallogénique aurifère de type or orogénique (Eglinger et al., 2023, modifié d'après Hronsky and McCuaig, 2014) intégrant (1) l'architecture géologique, (2) la(les) source(s) du métal cible, (3) les processus géologiques favorisant le transport des fluides et des métaux, ainsi que le piégeage des métaux et (4) les modalités de préservation d'un gisement et ses modifications post-dépôt.

...pour permettre l'innovation en exploration minérale - "In mining, is bigger always better?"

¹ GeoRessources, UMR 7359 Université de Lorraine-CNRS, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy - anne-sylvie.andre@univ-lorraine.fr *Actuellement à InnovExplo 859, Boulevard J.P. Vincent, suite 2013, Loungueil, Québec J4G 1R3, Canada

² Arethuse Geology, 29 allées St Jean ARTEPARC FUYEAU, BAT. C, 13710 Fuveau

³ ANK Geoconsulting, Cayenne, French Guiana

⁴ Centre for Exploration Targeting, School of Earth Sciences, University of Western Australia, 35 Stirling Highway, Crawley, WA 6009, Australie

⁵ Géosciences Montpellier, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier 34095

⁶ Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 3 Avenue C. Guillemin, 45100 Orléans

⁷ Deccan Gold Mines Ltd, India

⁸ SQM Australia, Level 19, 109 St Georges Terrace, Perth, WA 6000, Australie

Mieux contraindre les systèmes métallogéniques optimise les phases d'exploration et les coûts pour l'industrie minière. L'exploration minière cible en effet des environnements géologiques suffisamment enrichis en un élément métallique ou un minéral particulier (c.à.d. la teneur) et de volume minéralisé suffisant (c.à.d. le tonnage) pour être économiques. Plus la teneur est élevée, plus le tonnage est important, et plus le profit potentiel d'un gisement sera élevé. Le défi durant une phase d'exploration minière est de passer de ressources à réserves minérales. Les réserves représentent la partie économiquement exploitable d'une ressource minière mesurée et/ou indiquée ; elles sont régies par des normes (PERC pour l'Europe, JORC pour l'Australie et NI-43-101 pour le Canada), et s'appuient sur des études notamment géologiques, géostatistiques qui doivent démontrer que l'extraction minière est raisonnablement justifiée économiquement au moment de la déclaration.

Les réserves de minerai en or constituent donc un volume de roche extractible à une teneur spécifique, économique à un instant donné. Cette teneur spécifique, nommée teneur de coupure, correspond à la teneur minimale au-dessus de laquelle la minéralisation est économiquement exploitable. La valeur de cette teneur de coupure est dépendante de plusieurs paramètres à la fois géologique (type de gisement, expression minéralogique de l'or, etc.), géostatistiques mais aussi économique (e.g., prix de l'or, coûts de la production, type de méthodes de minage, design des excavations, contexte géopolitique, principe de l'offre et de la demande, etc...). Une partie de ces paramètres est donc variable dans le temps. C'est pourquoi les réserves de minerai en or qui en résultent peuvent fluctuer au cours du temps. Les réserves en or s'expriment en grammes par tonne (g/t) ou en partie par million (ppm) et par une masse totale de métal contenu dans le minerai exprimée en tonnes ou en once troy (ozt)*.

**l'once de Troyes (ou once troy) est une unité de mesure de masse fréquemment utilisées dans les pays anglo-saxons et au niveau international pour les métaux précieux comme l'or. Une once troy équivaut à 31,1 g.*

Les deux extrêmes en termes de format d'exploitation minière sont donc :

- des gisements à fort tonnage (même si faible teneur) permettant de bénéficier d'économies d'échelle lors de l'exploitation minière réduisant les coûts et d'une durée de vie des mines justifiant des dépenses en capital élevées requises pour la construction d'infrastructures (usine de traitement, etc...), ainsi que d'une réduction de l'impact environnemental (par unité de produit). Ces gisements à fort tonnage sont caractéristiques des mines de fer et de cuivre généralement exploitées à ciel ouvert.
- des gisements haute teneur (même si faible tonnage) nécessitant des méthodes d'exploitation souvent en souterrain, plus précises et donc plus coûteuses mais minimisant la dilution du métal ciblé de par leur faible tonnage, et se concentrant sur des processus de traitement d'un minerai de haute teneur. Ce type d'exploitation a prédominé dans l'histoire de l'exploitation des gisements aurifères.

Il est particulièrement intéressant d'observer l'évolution dans le temps des teneurs/tonnages des gisements aurifères (Fig. 2). Cette tendance minière à explorer/exploiter des gisements de plus en plus basses teneurs, notamment liée aux découvertes passées de la majorité des gisements de hautes teneurs qui se sont donc raréfiés, permet ainsi l'accès à de nouvelles catégories d'anomalies géochimiques, ouvrant des possibilités accrues de compréhension des systèmes métallogéniques aurifères.

Figure 2. Évolution dans le temps des teneur/tonnage des gisements aurifères exprimant nettement une tendance vers des gisements de plus fort tonnage et de plus faible teneur depuis 30 ans (Données issues de Dubé et Gosselin, 2007; Goldfarb and Groves, 2015; Goldfarb et al., 2017).

Systèmes métallogéniques et systèmes hydrothermaux

Les gisements métalliques, archives géologiques de l'évolution de notre système Terre

La distribution des gisements métalliques n'est pas aléatoire dans l'espace et le temps (Kerrick et al., 2005; Cawood and Hawkesworth, 2015). Les modalités de genèse des gisements métalliques sont complexes et souvent épisodiques impliquant une compréhension fine de l'évolution globale du système Terre à différentes échelles de temps et d'espace. Et inversement, la compréhension de ce que représentent les mécanismes de dépôts des gisements est un apport conséquent sur la compréhension de notre système Terre. Les gisements de fer rubanés de type Lac Supérieur, datant majoritairement du Paléoproterozoïque, forment d'énormes gisements de fer, parfois minéralisés en or, dont la formation est en lien avec un événement majeur de notre système Terre : la Grande Oxydation ou Grande Oxygénation, période de transition entre une atmosphère non oxygénée à une atmosphère oxygénée.

Les gisements hydrothermaux : une large palette de contextes géologiques et de niveaux structuraux

Une majorité des gisements métalliques exploités actuellement dans la croûte terrestre se sont formés par hydrothermalisme dans une large gamme d'environnements tectoniques, de niveaux crustaux, de conditions pression-température, et de nature des fluides chargés en métaux (Fig. 3). Beaucoup de travaux scientifiques ont porté sur une meilleure compréhension des systèmes hydrothermaux. L'exhaustivité des références est impossible à fournir ici, les trois éditions de Barnes (1967, 1979, 1997) illustrent l'avancée continue des connaissances concernant la géochimie des systèmes hydrothermaux. Elles peuvent être complétées par les travaux portant sur les enjeux de calage temporel des processus hydrothermaux (Stein, 2014 et références associées ; Bernet et al., 2019), la considération des contraintes structurales (Chauvet, 2019; Blenkinsop et al., 2020; Perret et al., 2020, 2022) et l'intégration dans la tectonique globale (Kerrick et al., 2005; Goldfarb et al., 2011; Groves et al., 2007; Bierlein et al., 2009; Goldfarb et al., 2010 ; Cawood and Hawkesworth, 2015) pour aboutir à l'établissement de systèmes métallogéniques (McCuaig et Hronsky, 2014). Ces systèmes hydrothermaux reflètent ainsi la géodynamique globale de la Terre depuis sa création il y a 4,54 milliards d'années jusqu'à nos jours. Cette dynamique est toujours active au vu des sources thermales observables dans des environnements géologiques variés (e.g. Japon, Nouvelle-Zélande, Amérique du Sud).

Les gisements aurifères : des témoins de systèmes hydrothermaux par excellence !

Une mobilisation et un transport de l'or dans la croûte dominés par des processus hydrothermaux

Mobiliser dans la croûte terrestre un des métaux le plus inerte du tableau périodique est un beau challenge qui a été relevé par les fluides hydrothermaux (nous mettrons ici de côté les processus sédimentaires dans cet article conduisant à la formation de paléo-placers, sans oublier cependant que ce dernier modèle est responsable du plus gros gisement d'or du monde, l'or du Witwatersrand en Afrique du Sud). En effet, les caractéristiques géochimiques de l'or (sidérophile, compatible) limitent son enrichissement dans la croûte continentale lors de la différenciation de la planète Terre (Wood et al., 2006; Frimmel, 2008, 2018). Les modèles actuels considèrent que l'or est essentiellement transporté sous forme de fluides hydrothermaux dans la croûte, principalement par le biais de ligands sulfurés et chlorurés (Pokrovski et al., 2015; et références associées), ou éventuellement par le biais de suspension sous forme colloïdale de nanoparticules métalliques proposée comme alternative récente par Petrella et al. (2022). La déstabilisation de fluides hydrothermaux aurifères, permettant le dépôt de l'or qu'ils contiennent, peut être reliée à différents processus géologiques tels que des interactions fluides-roches, de fortes variations de pression ou de température, ou un mélange de fluides, etc...

Figure 3. a. Relations entre les grandes catégories de gisements hydrothermaux, la nature des fluides géologiques impliqués et les niveaux crustaux de mise en place (modifié d'après Robb, 2005 et Dubé et Gosselin, 2015). b. Diagramme schématisant les environnements géodynamiques des gisements d'or de type porphyre, VMS et or orogénique (modifié d'après Kirkby et al., 2022).

Les gisements hydrothermaux aurifères : Choisis ton clan !

Les systèmes hydrothermaux aurifères fossiles se forment à différentes étapes d'un cycle orogénique, depuis la phase d'ouverture océanique, jusqu'à la phase tardi-collisionnelle (Fig. 3, Sillitoe, 2020 ; Huston et al., 2023). L'environnement géodynamique (en lien avec l'étape du cycle orogénique) et la profondeur de mise en place sont deux critères conjoints permettant de catégoriser les principaux systèmes hydrothermaux aurifères, fossiles à actuels, issus de sources de fluides, de métaux et des processus géologiques sensiblement différents (Poulsen et al., 2000; Dubé et Gosselin, 2007):

- Les Sulfures Massifs Volcanogènes (SMV) témoignent de systèmes hydrothermaux associés à des environnements volcaniques de fonds marins actuels, ou fossilisés dans des environnements volcaniques plus anciens où les roches sont déformées et métamorphosées, enregistrant parfois la superposition d'événements aurifères plus tardifs (Dubé et al., 2007; Hannington, 2014).
- Les gisements de type porphyre Cu±Mo±Au et épithermal Au-Ag se forment à partir de fluides de haute température (300-700 °C) associés à des contextes d'arcs volcaniques insulaires et continentaux, et liés spatialement et génétiquement à des systèmes magmato-hydrothermaux générés par la mise en place d'intrusions porphyriques se mettant en place à des profondeurs de 1 à 6 km (Seedorff et al., 2008; Sillitoe, 2010; 2020; Richards, 2013).

- Les gisements d'or orogéniques, aussi appelés mésothermaux, sont associés à des systèmes hydrothermaux qui se développent dans des contextes collisionnels, à des niveaux crustaux profonds, avec un fort contrôle structural. À l'inverse du consensus fort sur les modalités et contextes de formation des gisements de type VMS et porphyre-épithermal, la diversité des encaissants et sous-types de gisements orogéniques laissent encore beaucoup de débats ouverts, notamment sur la durée d'activité d'un tel système, les facteurs de fertilité, les conditions de mobilisation de l'or, les sources de fluides et les niveaux crustaux véritablement favorables pour ces types de gisement. Les gisements orogéniques archéens sont très nombreux et avec des teneurs en or élevées, mais des gisements protérozoïques et paléozoïques ont également été exploités. De nouvelles provinces orogéniques ont émergées ces vingt dernières années, notamment des provinces protérozoïques telles que le craton ouest-africain et le bouclier arabo-nubien (Goldfarb et al., 2017; Perret et al., 2020; Perret, 2021; Eglinger et al. 2023.), essentiellement en lien avec la diminution de la teneur de coupure des exploitations en or.

La compréhension des systèmes métallogéniques hydrothermaux aurifères : des réels défis

L'or, un élément chimique en faible teneur dans la croûte terrestre

Le premier de ces défis est la nature chimique même de l'élément or. Son numéro atomique, ainsi que son caractère sidérophile (affinité pour le fer) en font un élément chimique présent en infime proportion dans la croûte terrestre. La majeure partie de l'or est considérée comme étant restée dans le noyau terrestre au cours de la différenciation terrestre précoce (Wood et al., 2006). Le Clarke de l'or, à savoir sa teneur moyenne dans la croûte, est très faible (environ 1,5 ppb à 3 ppb, Taylor et McLennan, 1985; Rudnick et Gao, 2005). Les teneurs des gisements d'or actuellement exploités (à partir de 0,4 ppm = 0,4 g/t) témoignent de processus géologiques permettant la concentration de cet élément par un facteur d'environ 1000. Cependant, même avec des teneurs exacerbées (entre 0,4 à 10 ppm), la concentration d'or reste faible et difficile à tracer. De plus, à l'exception de celles associées aux études métallogéniques ou d'exploration minière, les analyses géochimiques des roches crustales ne quantifient pas l'or de manière systématique, compliquant la compréhension du cycle de l'or dans le temps et dans l'espace.

Une fertilisation en or de la croûte essentiellement précambrienne ?

Le deuxième défi est de nouveau intimement lié à la nature chimique de l'élément or et à son caractère sidérophile et compatible. Un schéma global de différenciation de notre planète Terre et de formation de notre croûte terrestre va traduire une évolution globale d'une croûte que nous pouvons caricaturer de « immature et juvénile » à l'Archéen à une croûte « mature et différenciée » au Phanérozoïque.

Les plus anciens gisements d'or de type orogénique connus sont hébergés par des ceintures de roches vertes paléo- à mésoarchéennes, comme les gisements de Bamboo Creek ou Warrawoona datés à 3,4 Ga, ou de Talga Talga daté à 3,2 Ga dans le craton de Pilbara, en Australie occidentale (Huston et al., 2002; 2023), et les gisements de 3,08 à 3,04 Ga à Barberton (Dziggel et al., 2010) dans le craton de Kaapvaal, en Afrique du Sud. Leur tonnage en or est cependant relativement insignifiant (moins de 400 tonnes d'or ont été extraites jusqu'à présent à Barberton). La question se pose alors de savoir si la rareté des gisements d'or avant 3 Ga est un artefact de préservation de ces vieilles roches et/ou le témoin de processus géologiques éo- à mésoarchéens sensiblement différents, aboutissant à la formation irrégulière de gisements durant cette période comme suggéré par Huston et al. (2023). Les travaux s'appuyant sur de la géochimie isotopique montrent ainsi qu'au sein d'un même craton, il y a de fortes disparités dans la production de matériel crustal juvénile (Champion et Sheraton, 1997 ; Schreefel et al. 2024).

Après 3 Ga, le système semble devenir moins aléatoire, et les interactions manteau-croûte sont rythmées par le cycle de Wilson, produisant des cycles métallogéniques relativement reproductibles, surtout à partir du Phanérozoïque avec, dans des contextes de marges convergentes, la succession chronologique de gisements de type VMS, porphyres cuprifères, nickel magmatique, or orogénique, porphyre alcalins à cuivre-or, puis intrusions granitiques évoluant de cortège métalliques à W-Sn-Mo-Au à des intrusions peralumineuses à Li-Ta-Cs. Le Protérozoïque semble ainsi correspondre à une période de transition (Eglinger et al., 2017, Goldfarb et al., 2017 ; Eglinger et al., 2023) marquant un avant et un après où les gisements aurifères se forment systématiquement en contexte collisionnel. Cette utilisation de données économiques, à savoir la présence ou l'absence d'anomalies géochimiques aurifères que représentent les gisements exploités, pour discuter de processus géologiques à grande échelle de temps est bien sûr discutable. Il est tentant de s'en servir pour discuter des changements séculaires de la planète Terre, notamment l'évolution de la température du manteau ou l'évolution des processus

tectoniques de l'Archéen au Phanérozoïque. Cet enthousiasme est néanmoins à pondérer avec la tendance à exploiter des gisements de teneurs de plus en plus faibles (Fig. 2), nous obligeant à différencier la notion de fertilité d'un segment de croûte versus l'efficacité des processus hydrothermaux (à partir d'une potentielle fertilité aurifère identique en absolu) pour mobiliser puis déposer l'or à des teneurs élevées.

Des systèmes hydrothermaux variés, complexes et souvent polyphasés

Des systèmes économiques hydrothermaux souvent précambriens

Les gisements hydrothermaux aurifères, comme tout objet géologique, seront d'autant moins préservés qu'ils sont anciens, qu'ils se forment dans les premières étapes d'un cycle orogénique, et/ou qu'ils se forment en sub-surface. Or, les gisements aurifères hydrothermaux actuellement exploités sont majoritairement précambriens. Déformation, métamorphisme, hydrothermalisme, altération météorique, érosion, etc...peuvent ainsi à la fois obscurcir voire oblitérer leurs caractéristiques primaires, mais également diluer, ou à l'extrême détruire le gisement initial.

Ainsi, les gisements de type SMV observés dans le craton archéen du Supérieur en Abitibi, dans le craton paléoprotérozoïque ouest-africain, ou dans le bouclier néoprotérozoïque arabo-nubien, représentent des reliques géologiques rares, du fait de leur âge précambrien, de leur mise en place dans des environnements de sub-surface et dans les premiers stades d'un cycle orogénique. Les raisons de leur préservation au cours du temps sont ainsi à comprendre et nécessite de déconvoluer le système métallogénique associé à leur mise en place, ainsi que de contraindre l'ensemble des phénomènes géologiques subis par le segment de croûte qui les héberge depuis leur formation.

Des systèmes hydrothermaux polyphasés

L'hydrothermalisme permet de lessiver, transporter puis déposer des métaux à différents niveaux crustaux de notre croûte terrestre. Tout phénomène d'hydrothermalisme va provoquer de l'altération hydrothermale. Ces altérations hydrothermales sont précieuses pour caractériser des gisements. Présentant des caractéristiques propres selon les typologies de gisement, elles permettent souvent de contraindre le style de minéralisations. Bien plus larges que l'objet minéralisé par leur zone d'influence, elles permettent d'optimiser l'exploration minérale depuis leur marge distale à faible teneur jusqu'aux zones proximales les plus enrichies (Leshner et al., 2018 ; Vasipoulos et al., 2021).

Lors d'un cycle orogénique, plusieurs phases d'hydrothermalisme peuvent évidemment affecter un même segment de croûte en lien avec les processus tectono-métamorphiques et magmatiques (déformation et variations des conditions de pression et de température). Ainsi, tout comme pour les autres processus géologiques, la succession d'événements hydrothermaux peut oblitérer les caractéristiques primaires tout comme la géométrie finale d'un gisement aurifère hydrothermal. Mais, de fait, elle peut également aboutir à la superposition de différents systèmes hydrothermaux, possédant potentiellement des caractéristiques différentes incluant une variabilité de leur fertilité en or, ce qui rend difficile la détermination et la hiérarchisation des critères d'exploration. La figure 4 matérialise ainsi la superposition spatiale de systèmes hydrothermaux, fréquemment observées dans des gisements hydrothermaux aurifères. Les différentes phases minérales hydrothermales (silicates, sulfures, etc.) témoignent, de par leurs textures et leurs cristallogénies notamment, de la superposition dans le temps et l'espace d'événements hydrothermaux de différentes compositions.

Datation relative et absolue, clef de compréhension des systèmes métallogéniques aurifères

Contraindre géochronologiquement des phases hydrothermales permet de discuter de leur lien génétique avec des événements géologiques à plus large échelle spatiale, même en présence d'un polyphasage de la minéralisation hydrothermale. La répartition des âges des gisements est couramment utilisée pour déchiffrer les modèles séculaires de cycle tectonique liés à l'assemblage et à la dispersion périodique des continents (Kerrick et al., 2005). L'amélioration de la robustesse et de la précision des méthodes géochronologiques, le progrès des techniques de micro-échantillonnage et/ou de séparation minérale, les nouveaux développements permettant des analyses *in situ* ou sur mono-minéral en utilisant un large panel de systèmes isotopiques désormais applicables sur les phases hydrothermales, ainsi que la capacité d'analyse accrue des laboratoires, permettent de générer des données géochronologiques quasi systématiquement sur les systèmes hydrothermaux minéralisés (Stein 2014; Bernet et al., 2019; et références associées). Il est ainsi possible de discuter à la fois du cycle orogénique à considérer dans

la formation d'un gisement, mais également de distinguer plusieurs événements à l'intérieur même d'un cycle orogénique (Stein, 2004 ; Le Mignot et al., 2017).

Figure 4. Illustration du polyphasage hydrothermal fréquemment observé dans les gisements aurifères. **À gauche.** Gisement aurifère de Wassa (Ghana, Perrouy et al., 2015). Un premier événement hydrothermal est souligné par les veines de sulfures affectées par une déformation ductile (2164 ± 14 Ma), le deuxième s'exprime par la veine de quartz-carbonate résultat d'une déformation cassante (2055 ± 18 Ma) (Re-Os sur Py, Le Mignot et al. 2017). Une altération proximale riche en sulfures est visible autour de cette veine de quartz. **Au milieu et à droite.** Gisement aurifère de Fétékro (Côte d'Ivoire) marqué par différentes générations de minéraux hydrothermaux (biotite et chlorite) différenciables de par leurs textures et la variabilité de leurs teneurs en Fe et Mg (Hauteville et al., en révision). La largeur des échantillons de carottes de forage est de 5 cm.

Une dynamique de recherche partenariale industrie-académie

Des projets de recherche partenariale portent actuellement sur le craton ouest-africain, le bouclier arabo-nubien et le bouclier guyanais, avec comme ambition d'augmenter la connaissance géoscientifique des systèmes hydrothermaux aurifères précambriens pour innover conjointement dans la compréhension de systèmes métallogéniques et en exploration minérale.

Le projet scientifique international WAXI (West African eXploration Initiative) est un ambitieux programme de recherche et de formation basé sur la coopération entre différents acteurs du secteur minier d'Afrique de l'Ouest : institutions de recherche, services géologiques, gouvernements et compagnies minières. Initié en 2006, ce projet a permis d'améliorer significativement la connaissance géoscientifique du craton ouest-africain en croisant de nombreuses disciplines géologiques pour fournir notamment des synthèses métallogéniques sur les systèmes aurifères du craton-ouest africain intégrées dans le temps et dans l'espace (Goldfarb et al., 2017; Thébaud et al., 2020; Masurel et al., 2022 ; Eglinger et al., 2023). Ce projet est piloté par le Centre for Exploration Targeting de l'Université d'Australie Occidentale (CET-UWA) via AMIRA. Il se focalise dans sa quatrième phase (2022-2025) sur (1) l'amélioration de la connaissance géoscientifique de la partie archéenne du craton ouest-africain, (2) la compréhension de la transition archéen-protérozoïque, et (3) l'intégration de bassins sédimentaires peu profonds enrichis en or de type Tarkwa dans l'évolution géodynamique (Fig. 5).

Inspiré par la dynamique du projet WAXI, le programme **SAXI (South American eXploration Initiative)** vise à augmenter la connaissance géoscientifique dans l'objectif d'améliorer le potentiel d'exploration minérale. Ce programme de recherche intégré, à l'image du projet WAXI, collecte actuellement des données à l'échelle du bouclier guyanais qui s'étend sur cinq pays du nord-est de l'Amérique du Sud (Venezuela, Guyana, Suriname, Guyane et Brésil), et représente l'extension géologique du craton ouest-africain.

Face aux enjeux actuels d'approvisionnement en ressources métalliques, **le LabCom ANR THEIA (2024-2028)** - du nom de la déesse de la mythologie grecque qui aurait créé tous les métaux précieux - a été inauguré en décembre 2023. Ce **Laboratoire Commun**, soutenu par le pôle de compétitivité Avenia, a l'ambition d'un dialogue fertile entre monde industriel tourné vers l'exploration minérale (la PME Arethuse Geology) et un centre de recherche académique (le laboratoire GeoRessources sous double tutelle Université de Lorraine-CNRS et labellisé par l'institut CARNOT). La création de ce LabCom THEIA sur une durée de 5 ans permet de stabiliser une trajectoire commune d'innovation à une échelle pertinente pour la recherche scientifique. L'objectif de ce LabCom THEIA est double : (1) mieux comprendre la genèse des gisements précambriens d'Afrique et d'Arabie pour mieux prédire leur existence, et (2) préparer les outils de l'exploration minérale de demain, afin de rester prédictif et de permettre à l'industrie de conserver une avancée géoscientifique et technologique.

Le Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR) exploratoire Sous-Sol (2023-2029), piloté par le CNRS et le BRGM, vise à définir les conditions d'utilisation responsable et durable du sous-sol en fonction de différents scénarios d'évolution économique, énergétique et technologique, en prenant en compte les trajectoires socio-techniques. Du stockage à la production d'énergie, de l'exploitation minière à l'enfouissement de CO₂, ce projet travaille sur les potentiels, les risques associés et la légitimité de ces promesses souterraines au travers d'une large communauté de chercheurs en sciences de la Terre et de l'environnement, en sciences sociales, environnementales, économiques et juridiques et d'une communauté encore plus large impliquant, autour

de ces enjeux, citoyens, décideurs et industriels. Un des cibles géologiques du PEPR Sous-Sol est le territoire guyanais qui héberge de nombreux systèmes hydrothermaux aurifères précambriens.

Figure 5. Localisation des terrains précambriens riches en systèmes hydrothermaux aurifères étudiés au sein des projets WAXI, SAXI, LabCom ANR THEIA, et PEPR Sous-Sol.

Bibliographie - Mettre les cinq références clefs, le reste sera sur site internet.

Bierlein, F.P., Groves, D.I., Cawood, P.A., 2009. Metallogeny of accretionary orogens - The connection between lithospheric processes and metal endowment. *Ore Geology Reviews*, 36, 282-292.

Dubé, B. and Gosselin, P., 2007. Greenstone-hosted quartz-carbonate vein deposits, In: *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*, W.D. Goodfellow (ed.) Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 5, 49-73.

Masurel, Q., Eglinger, A., Thébaud, N., Allibone, A., André-Mayer, A.S., McFarlane, H., Miller, J., Jessell, M., Aillères, L., Vanderhaeghe, O., Salvi, S., Baratoux, L., Perrouty, S., Begg, G., Fougereuse, D., Hayman, P., Ousmane, W., Tshibubudze, A., Parra-Avila, L., Kouamelan, A., Ofori, P., 2022. Paleoproterozoic gold events in the southern West African Craton: review and synopsis. *Mineralium Deposita*, 57, 513-537.

McCuaig, T.C., Hronsky, J.M., 2014. The mineral system concept: the key to exploration targeting. *Society of Economic Geologist, Special Publication*, 18, 153–175.

Sillitoe, R. H., 2020. Gold Deposit Types: An Overview. In: Sillitoe, R.H., Goldfabrd, R.J., Robert, F., Simmons, S.F. (eds) *Geology of the World's Major Gold Deposits and Provinces*. *Reviews in Economic Geology*. Society of Economic Geologists, 1-28.

- Bilibin, Yu.A., 1968. *Metallogenic Provinces and Metallogenic Epochs*, E.A. Alexandrov, trans., Queen's College Press, Flushing N.Y., prefaces and 1-35.
- Barnes, H.L., 1967, 1979, 1997. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. Wiley publications, New York.
- Bernet, B., Piraquive, A., Urueñ, C., López-Isaza, J.A., Bermúdez, M.A., Zuluaga, C., Amaya, S., Villamizar, N., 2019. Multidisciplinary petro-geo-thermochronological approach to ore deposit exploration. *Ore Geology Reviews*, 112, 103017
- Blenkinsop, T.G., Oliver, N.H.S., Dirks, P.G.H.M., Nugus, M., Tripp, G. and Sanislav, I.V., 2020. Structural geology applied to the evaluation of hydrothermal gold deposits. In: Rowland, J.V. and Rhys, D.A. (eds) *Applied Structural Geology of Ore-forming Hydrothermal Systems*, *Reviews in Economic Geology*. Society of Economic Geologists, 1-23.
- Cawood, P.A., Hawkesworth, C.J., 2013. Temporal relations between mineral deposits and global tectonic cycles. In: Jenkin, G. R. T., Lusty, P. A. J., McDonald, I., Smith, M. P., Boyce, A. J. & Wilkinson, J. J. (eds) *Ore Deposits in an Evolving Earth*. Geological Society, London, Special Publications, 393.
- Champion, D.C., Sheraton, J.W., 1997. Geochemistry and Nd isotope systematics of Archaean granites of the Eastern Goldfields, Yigarn Craton, Australia: implications for crustal growth processes. *Precambrian Research*, 83, 109-132.
- Chauvet, A., 2019. Structural Control of Ore Deposits: The Role of Pre-Existing Structures on the Formation of Mineralised Vein Systems. *Minerals*, 9, 56.
- Dziggel, A., Poujol, M., Otto, O., Kisters, A.F.M., Trieloff, M., Schwarz, W.H., Meyer, M.F., 2010. New U–Pb and ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages from the northern margin of the Barberton greenstone belt, South Africa: implications for the formation of Mesoarchaeon gold deposits. *Precambrian Research*, 179, 1-4, 206-220.
- Eglinger, A., Thébaud, N., Zeh, A., Davis, J., Miller, J., Parra-Avila, L.A., Loucks, R., McCuaig, C., Belousova, E., 2017. New insights into the crustal growth of the Paleoproterozoic margin of the Archean Kéména-Man domain, West African craton (Guinea): Implications for gold mineral system. *Precambrian Research*, 292, 258-289
- Eglinger, A., André-Mayer, A.S., Thébaud, N., Masurel, Q., 2023. West African Leo-Man Shield Metallogenic Province. In: Decrée S. (ed) *Metallic Resources 2: Geodynamic Framework and Remarkable Examples in the World*. Wiley & Sons, Inc.
- Frimmel, H.E., 2008. Earth's continental crustal gold endowment. *Earth and Planetary Science Letters*, 267, 45-55.
- Frimmel, H.E., 2018. Episodic concentration of gold to ore grade through Earth's history. *Earth-Science Reviews*, 180, 148-158.
- Hannington, M.D., 2014. Volcanogenic Massive Sulfide Deposits. In: Holland H.D. and Turekian K.K. (eds.) *Treatise on Geochemistry*, Second Edition, vol. 13, 463-488. Oxford: Elsevier.
- Kerrick, R., Godfarb, R.J., Richards, J.P., 2005. Metallogenic Provinces in an Evolving Geodynamic Framework. In: Hedenquist, J.W.H., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (eds) *Society of Economic Geologists*, 1097-1136.
- Goldfarb, R.J., Groves, D.I., Gardoll, S., 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore Geology Reviews*, 18, 1-75.
- Goldfarb, R.J., Bradley, D., Leach, D.L., 2010. Secular variation in economic geology. *Economic Geology*, 105, 459-465.
- Goldfarb, R.J., Groves, D.I., 2015. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 233, 2-26.
- Goldfarb R.J., André-Mayer A.S., Jowitt S.M., Mudd G.M., 2017. West Africa: the World's premier Paleoproterozoic gold province. *Economic Geology*, 1, 123-143.
- Groves, D.I. & Bierlein, F.P., 2007. Geodynamic settings of mineral deposit systems. *Journal of the Geological Society*, London, 164, 19-30.
- Hauteville, A., André-Mayer, A.S., Eglinger, A., Perret, J., Nobilet, T., Teitler, Y., Touré, B., Ciancaleoni, L., Marulier, L., Coulibaly, Y., accepté avec révisions. Tourmaline as a textural, geochemical and isotopic marker of fault valve processes recorded at the Paleoproterozoic Lafigué orogenic gold deposit, Ivory Coast. *Mineralium Deposita*.

- Huston, D.L., Blewett, R.S., Keilor, B., Standing, J., Smithies, R.H., Marshall, A.E., Mernagh, T.P., and Kamprad, J., 2002. Lode gold and epithermal deposits of the Mallina basin, Pilbara Complex, Western Australia. *Economic Geology*, 97, 801-818.
- Huston, D.L., Sun, S.S., Blewett, R., Hickman, A.H., Van Kranendonk, M., Phillips, D., Baker, D., Brauhart, C., 2023. The Timing of Mineralization in the Archean North Pilbara Terrain, Western Australia. *Economic Geology*, 97, 733-755.
- Kirkby, A., Czarnota, K., Huston, D.L., Champion, D.C., Doublier, M.P., Bedrosian, P.A., Duan, J., Heinson, G., 2022/ Lithospheric conductors reveal source regions of convergent margin mineral systems. *Scientific Reports*, 12, 8190.
- Launay, L., 1913. *Traité de métallogénie : gîtes minéraux et métallifères* Ch. Béranger.
- Le Mignot, E., Reisberg, L., André-Mayer, A.S., Bourassa, Y., Fontaine, A., Miller, J., 2017. Re-Os geochronological evidence for multiple Paleoproterozoic gold events at the scale of the West African craton. *Economic Geology*, 145-168.
- Leshner, M. et al., 2017. Integrated Multi-Parameter Exploration Footprints of the Canadian Malartic Disseminated Au, McArthur River-Millennium Unconformity U, and Highland Valley Porphyry Cu Deposits. Preliminary Results from the NSERC-CMIC Footprints Research Network.
- Perret, J., Eglinger, E., André-Mayer, A.S., Aillères, L., Feneyrol, J., Hartshorne, C., Abanyin, E., Bosc, R., 2020. Subvertical, linear and progressive deformation related to gold mineralization at the Galat Sufar South deposit, Nubian Shield, NE Sudan. *Journal of Structural Geology*, 104032.
- Perret, J., 2021. Répartition spatio-temporelle du système métallogénique de l'or panafricain au sein du bouclier arabo-nubien: étude multiscalaire le long de la suture de Keraf (Soudan). PhD thesis, Université de Lorraine, 563p.
- Perret, J., André-Mayer, A.S., Eglinger, A., Feneyrol, J., Voinot, A., Morlot, C., Barou, F., Teitler, Y., Seira, D., Bosc, R., 2022. Structural and geochemical ore-forming processes in deformed gold deposits: towards a multi-scale and-method approach. Geological Society, London, Special Publications, 516.
- Petrella, L., Thébaud, N., Fougereuse, D., Tattitch, B., Martin, L., Turner, S., Suvorova, A., Gain, S., 2022. Nanoparticle suspensions from carbon-rich fluid make high-grade gold deposits. *Nature Communications*, 13, 3795.
- Pokrovski, G.S., Kokh, M.A., Guillaume, D., Borisova, A.Y., Gisquet, P., Hazemann, J.L., Lahera, E., Del Net, W., Proux, O., Testemale, D., Haigis, V., Jonchière, R., Seitsonen, A.P., Ferlat, G., Vuilleumier, R., Saitta, A.M., Boiron, M.C., Dubessy, J., 2015. Sulfur radical species form gold deposits on Earth. *PNAS*, 112, 44, 13484-13489.
- Poulsen K.H., Robert, F., and Dubé, B., 2000. Geological classification of Canadian gold deposits; Geological Survey of Canada, Bulletin 540, 106p.
- Richards, J.P., 2013. Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes. *Nature Geoscience*, 6.
- Robb, L., 2005. *Introduction to ore-forming processes*. Blackwell Science Ltd. 386p.
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2005 Composition of the continental crust. In: Rudnick, R.L. (Ed.) *The Crust. Treatise on Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 1-64.
- Seedorff, E., Dilles, J.H., Proffett, Jr., J.M., Einaudi, M.T., Zurcher, L., Stavast, W.J.A., Johnson, D.A., Barton, M.D., 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. In: Hedenquist, J.W.H, Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., Richards, J.P. (eds) *Society of Economic Geologists*, 251-298.
- Schreefel, R., Fisher, C.M., Kemp, A.I.S., Hagemann, S.G., Masurel, Q., Thébaud, N., Davy's, C., Martin, L.A.J., Lowrey, J.R., Lu, Y., Cassidy, K.F., 2023. Crustal growth in the Archean: Insights from zircon petrochronology of the far-east Yilgarn Craton, Western Australia. *Precambrian Research*, 401, 107253.
- Sillitoe, R. H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105, 3-41.
- Stein H.J., 2014. Dating and Tracing the History of Ore Formation. In: Holland H.D. and Turekian K.K. (eds.) *Treatise on Geochemistry, Second Edition*, 13, 87-118. Oxford: Elsevier.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford.

- Thébaud, N., Allibone, A., Masurel, Q., Eglinger, A., Davis, J., André-Mayer A.S., Miller J., Jessell M., 2020. The Paleoproterozoic (Rhyacian) gold deposits of West Africa. In: Silliole, R.H., Goldfabrd, R.J., Robert, F., Simmons, S.F. (eds) *Geology of the World's Major Gold Deposits and Provinces. Reviews in Economic Geology*. Society of Economic Geologists, 735-752.
- Vasilopoulos, M., Molnár, F., O'Brien, H., Lahaye, Y., Lefèbvre, M., Richard, A., André-Mayer, A.S., Ranta J.P., Talikka M., 2021. Geochemical signatures of mineralizing events in the Juomasuo Au–Co deposit, Kuusamo belt, northeastern Finland. *Mineralium Deposita*, 56, 1195-1222.
- Wood, B.J., Walter, M.J., Wade, J., 2006. Accretion of the Earth and segregation of its core. *Nature*, 441, 825-833.
- Wyborn, L.A.I., Heinrich, C.A., Jaques, A.L., 1994. Australian Proterozoic Mineral Systems: Essential Ingredients and Mappable Criteria. The AusIMM Annual Conference, Darwin, 5-9 August.

Figure 1

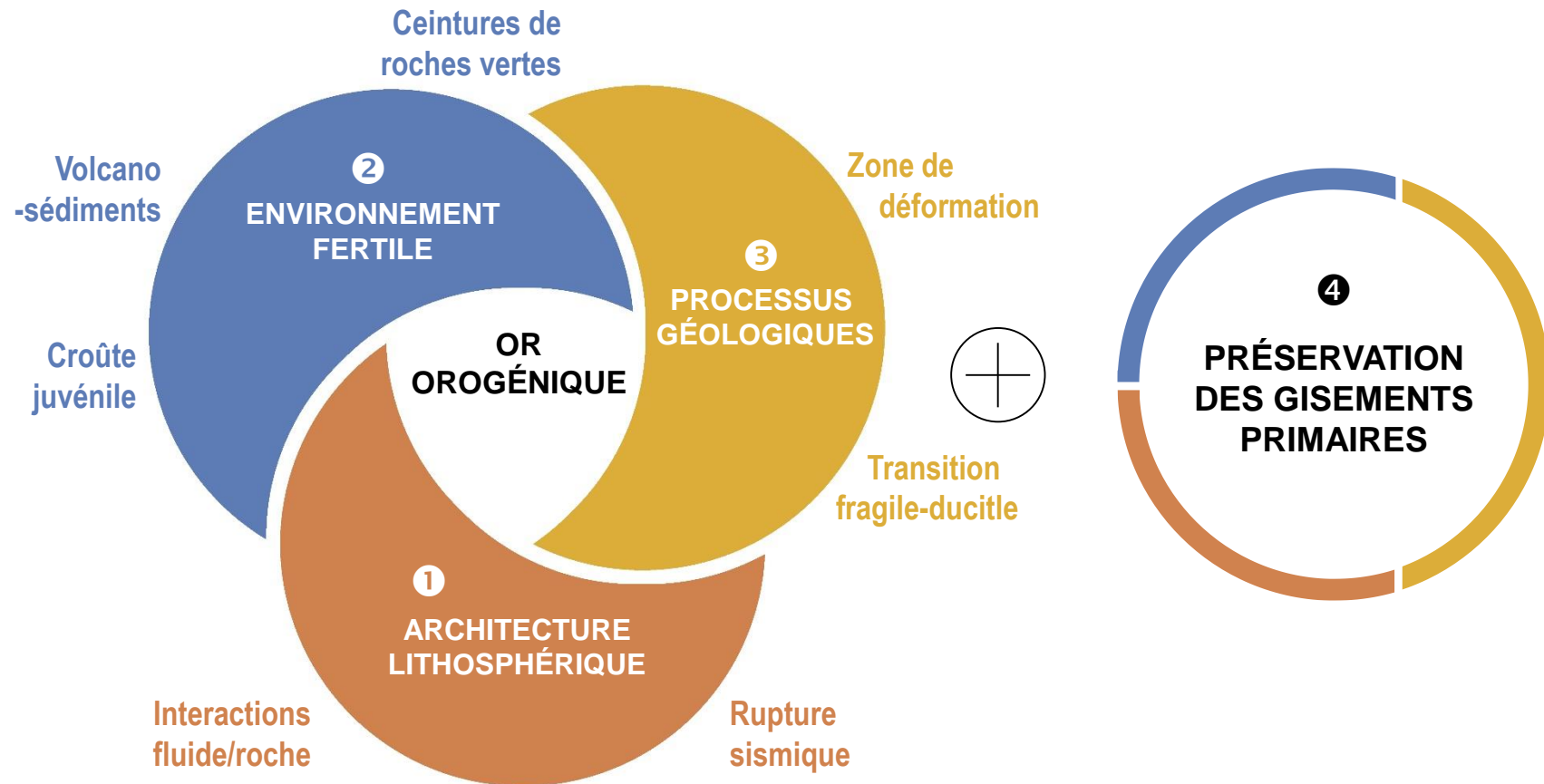


Figure 2

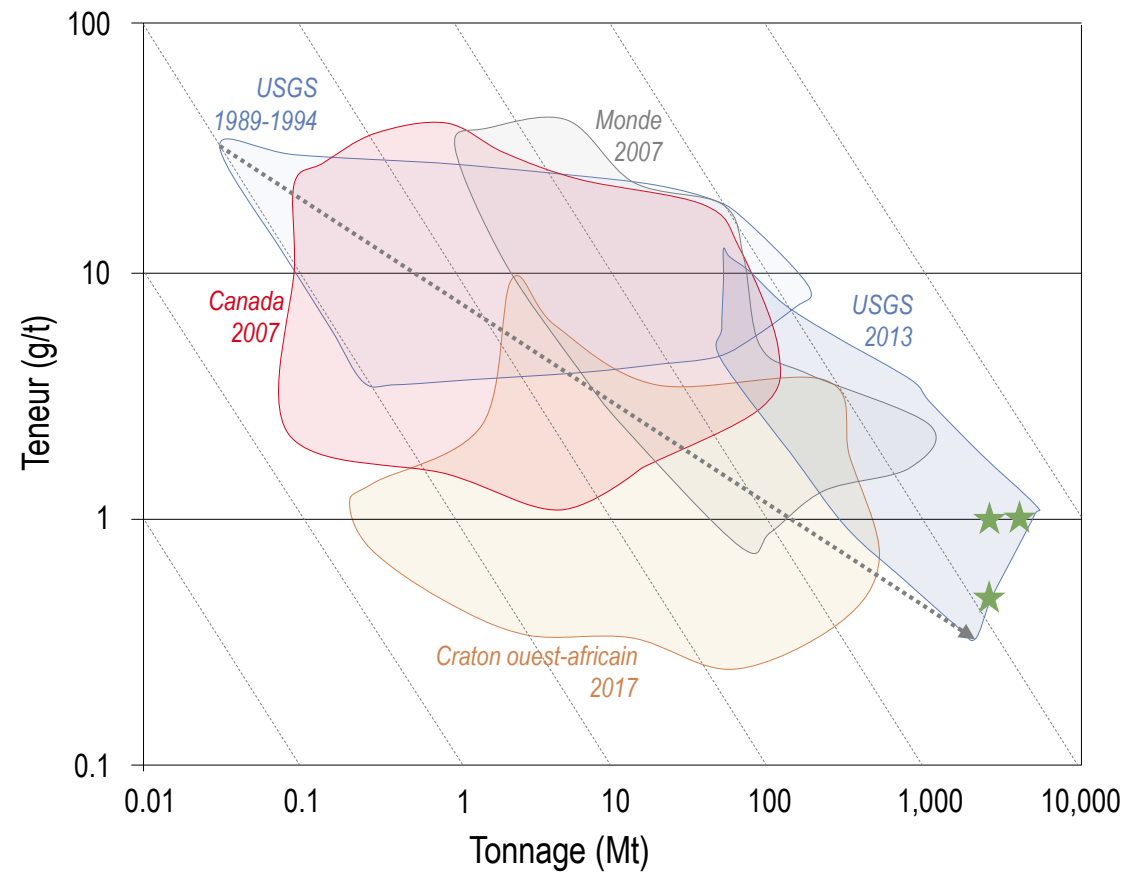


Figure 3

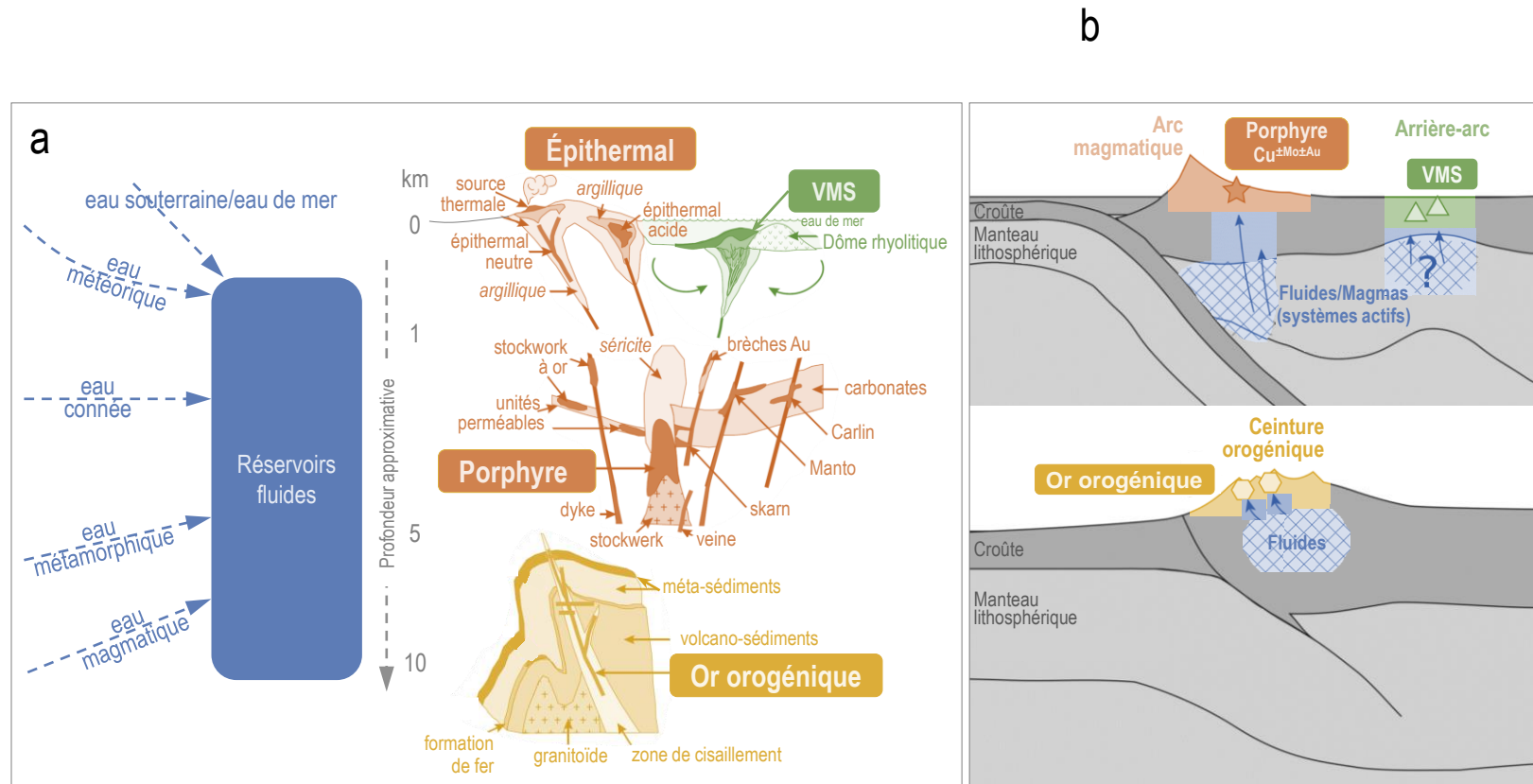


Figure 4

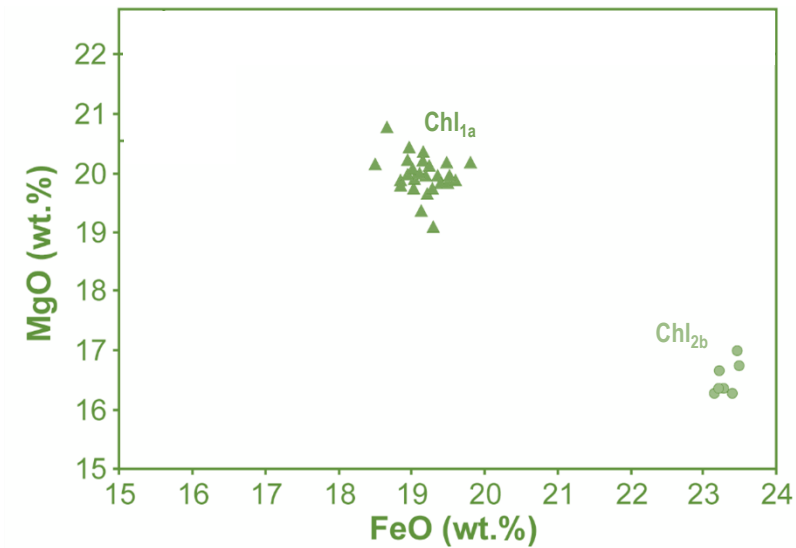
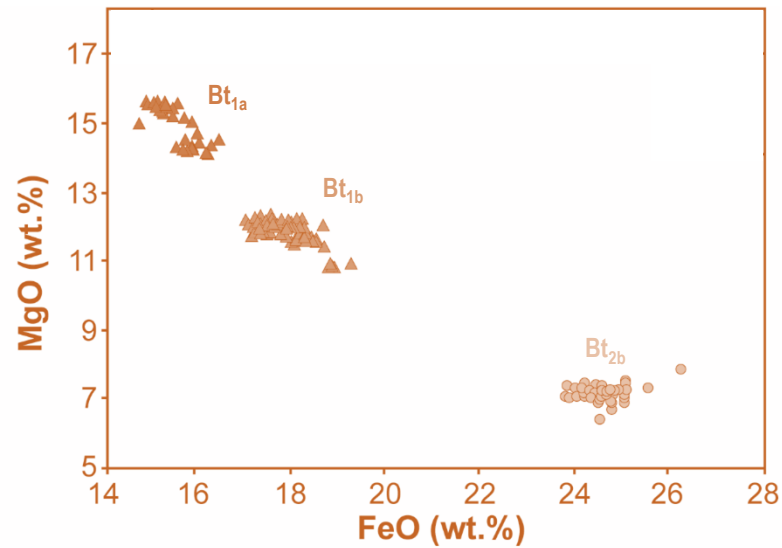
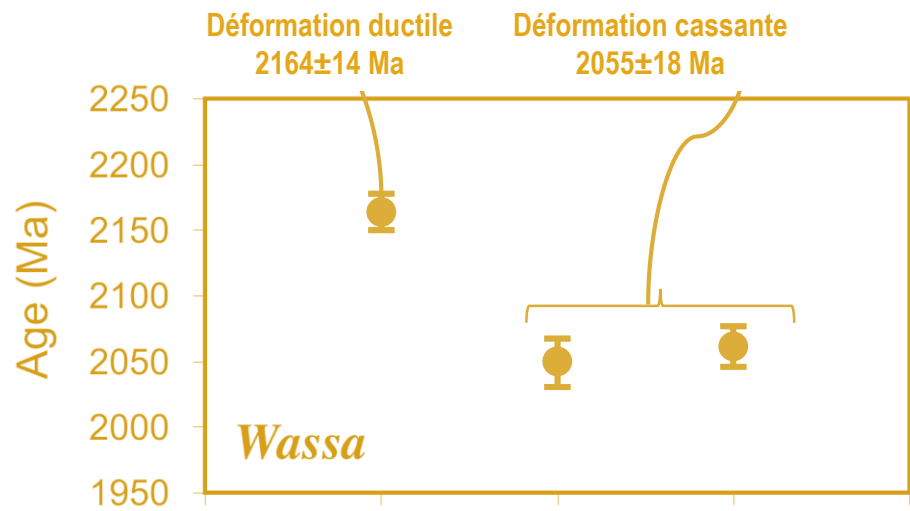
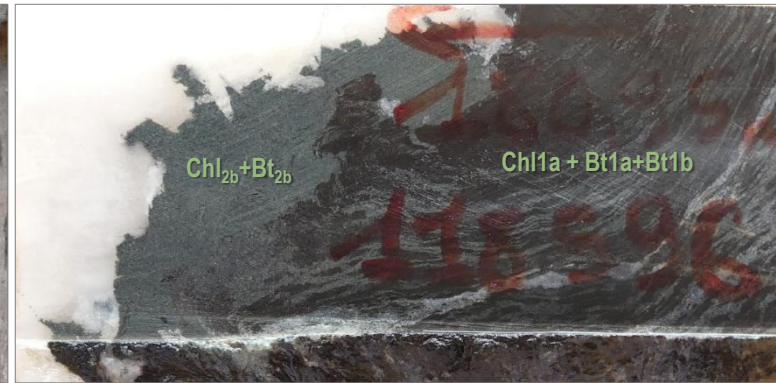


Figure 5

