

LabCom

THEIA



RESEARCH CONSORTIUM

**LE PÔLE D'EXCELLENCE  
EN GÉOLOGIE DES RESSOURCES MINÉRALES**

Un laboratoire commun ANR  
Arethuse Geology - GeoRessources,  
rattaché à l'Université de Lorraine et au CNRS-INSU.





## SOMMAIRE

Introduction	p. 3 - 7
Présentation du LabCom ANR THEIA	p. 8 - 9
Démarche scientifique	p. 10 - 11
Les axes scientifiques	p. 12 - 19
Les zones stratégiques ciblées	p. 20 - 27
Le partenariat Arethuse-GeoRessources	p. 28 - 30



**Hélène BOULANGER**

Présidente, Université de Lorraine



**Nicolas ARNAUD**

Directeur de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU), CNRS



*Les politiques communes nationales et européennes en matière de sécurisation des chaînes d'approvisionnement des métaux, dans des contextes géopolitiques internationaux fluctuants, nécessitent le développement et la pérennisation des compétences françaises en recherche académique, ainsi que des capacités industrielles d'exploration et d'exploitation des ressources primaires.*

La connaissance du sous-sol et l'exploitation raisonnée de ses ressources en métaux critiques et stratégiques représentent un enjeu majeur pour relever les défis socio-économiques de notre époque, marquée par les transitions climatiques, énergétiques, numériques et environnementales. Plus spécifiquement, les défis croissants d'approvisionnement en ressources métalliques sont sources de tensions géopolitiques, industrielles et économiques, nécessitant des innovations constantes de la part de l'industrie minière, soutenue par les agences de recherche nationales et les pôles universitaires. Cette approche systémique et complémentaire entre les secteurs industriels et académiques nécessite le déploiement d'outils adaptés et l'acquisition de données valorisables au cours des phases d'exploration et d'exploitation, favorisant un meilleur contrôle sur leur impact environnemental respectif.

**Le dispositif Laboratoire Commun financé par l'ANR permet aux acteurs de la recherche académique de créer des partenariats structurés avec une PME ou une ETI et un laboratoire d'organisme de recherche.**



**Pierre de SOUFFRON**

ANR, Chargé de projet scientifique LabCom

Le dispositif LabCom est l'un des outils permettant d'atteindre l'objectif fixé par l'État d'augmenter le nombre de collaborations public-privé. Il constitue un élément clé des Pôles Universitaires d'Innovation dans la structuration des écosystèmes territoriaux d'innovation. Les expériences de recherche partenariale témoignent de la nécessité de s'appuyer sur des dispositifs engageants et structurants, pérennes dans le temps, entre partenaires académiques et industriels. Cela permet de développer une trajectoire scientifique compatible avec le temps de la recherche, mais également, pour la thématique du LabCom THEIA, de lisser les cycles économiques et décisionnels autour des ressources minérales.



# LA MÉTALLOGÉNIE AU SERVICE DES TRANSITIONS

## L'APPROVISIONNEMENT EN MATIÈRE MINÉRALE, UN ENJEU DES TRANSITIONS

À travers son « Critical Raw Material Act », la législation européenne sur les matières premières critiques vise à renforcer les capacités de l'UE à tous les stades de la chaîne de valeur. Elle vise également à accroître notre résilience en réduisant les dépendances, en améliorant l'état de préparation et en promouvant la durabilité et la circularité des chaînes d'approvisionnement. À l'instar de l'Europe, si la France souhaite atteindre ses objectifs climatiques et numériques, l'approvisionnement, la transformation et le recyclage des matières premières critiques et la sécurisation des chaînes d'approvisionnement constituent les défis pour l'avenir. Par exemple, le lithium, le cobalt et le nickel sont utilisés dans la fabrication de batteries, le gallium dans les panneaux solaires, le bore brut dans les technologies éoliennes, et le titane et le tungstène dans les secteurs de l'espace et de la défense. Ainsi, les nouvelles législations en vigueur sur les matières premières visent à garantir un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques pour l'industrie européenne et à réduire considérablement sa dépendance à l'égard des importations provenant de fournisseurs uniques.

L'ensemble de ces métaux n'est pas distribué de façon homogène à la surface de la Terre. Certaines zones du globe sont particulièrement riches et abritent de nombreux gisements exploités par les compagnies minières : ces zones correspondent à des provinces métallogéniques. Suivant les contextes et processus géologiques qui ont été à l'œuvre au cours de l'histoire de la Terre, certaines provinces sont plus propices à la concentration de certains métaux plutôt que d'autres. De plus, les conditions géodynamiques qui régissent les cycles de la tectonique des plaques définissent les environnements favorables à la formation des systèmes métallogéniques de même que la succession de leur développement dans le temps au sein de la croûte terrestre. De fait, le coût d'exploration et d'exploitation dans ces différentes provinces est très variable, car directement dépendant des critères géologiques, mais aussi géographiques (zones isolées ou difficiles d'accès) ou géopolitiques (stabilité politique et acceptabilité sociétale des populations) par exemple.





# LE PÔLE DE RECHERCHE NANCÉIEN

INNOVER DANS LA TRANSDISCIPLINARITÉ ET LA RECHERCHE AUX INTERFACES SCIENTIFIQUES



**Raphaël PIK**

▷ Directeur de Recherche CNRS,  
Directeur du pôle scientifique Observatoire Terre Environnement de Lorraine (OTELo)

Le Pôle Scientifique et Observatoire OTELo soutient et émule une recherche transversale et innovante sur un vaste périmètre scientifique. Sa communauté a su construire un réel *continuum* thématique entre les unités de recherche, ainsi qu'un *continuum* de positionnement entre activités de recherche fondamentale, finalisées et partenariales. Cette transversalité s'est exprimée depuis de nombreuses années autour du Labex R21 et des projets interdisciplinaires de l'i-site LUE avec nos partenaires académiques et industriels. Les Labcoms viennent compléter parfaitement ce schéma de positionnement pour optimiser notre activité de recherche sur des thématiques scientifiques particulières.



Les thématiques scientifiques d'OTELo vont du fonctionnement de la planète, à la gestion des ressources minérales et énergétiques et à la connaissance et la gestion des environnements continentaux, en caractérisant les systèmes naturels et anthropisés depuis le sous-sol jusqu'au système solaire.

Le site lorrain Géosciences s'ancre dans une histoire minière avec le développement d'une trajectoire scientifique lui permettant aujourd'hui d'être incontournable à l'échelle internationale dans la connaissance du sous-sol et de l'exploitation raisonnée de ses ressources. Les défis des grandes transitions (énergétique, environnementale et climatique, notamment) appellent à des approches systémiques et interdisciplinaires pour décloisonner la recherche.



**372**

COLLABORATEURS

- 100 ENSEIGNANTS-CHERCHEURS
- 32 CHERCHEURS CNRS ET INRAE
- 112 PERSONNELS ITA/BIATSS,
- 100 DOCTORANTS
- 30 POST-DOCS

**19**

PLATEFORMES  
DANS LE RÉSEAU OTELO

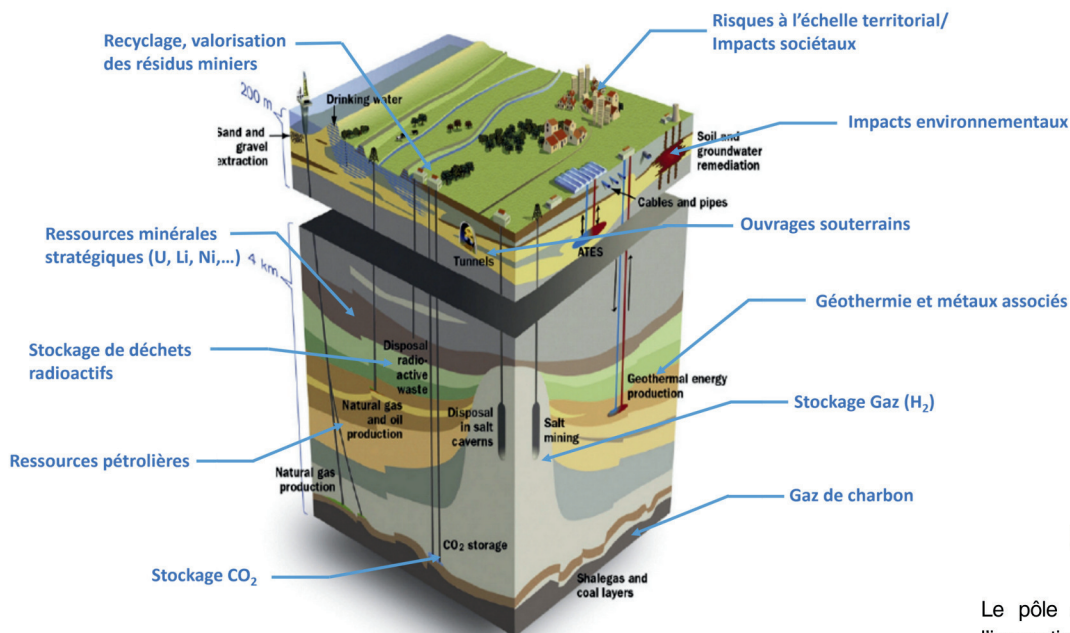
**21 MILLIONS D'€**

ÉQUIPEMENTS

# UNE RECHERCHE PARTENARIALE LABELLISÉE

UN ÉCOSYSTÈME DÉDIÉ AUX RESSOURCES DU SOUS-SOL POUR LES TRANSITIONS ÉNERGÉTIQUE, NUMÉRIQUE ET SOCIÉTALE

La création du LabCom THEIA s'inscrit pleinement dans l'ADN de GeoRessources : une recherche d'excellence se basant sur de l'inter à transdisciplinarité, de l'ingénierie, un ancrage territorial et un écosystème socio-économique diversifié, notamment dans un domaine historique reconnu internationalement : les ressources minérales et l'ingénierie minière. De par sa forte activité partenariale, GeoRessources est labellisé CARNOT (Icéel) et le laboratoire est membre du pôle AVENIA.



**Jérôme STERPENICH**

Directeur de l'Institut Carnot - Icéel



En s'associant avec Arethuse Geology dans le cadre du laboratoire commun THEIA, GeoRessources réaffirme son engagement en faveur de la recherche partenariale et au service des grandes transitions et de la gestion des métaux stratégiques. Cette forme de collaboration pérenne, qui met en avant des enjeux et des moyens scientifiques partagés, représente l'ADN des laboratoires Carnot.

**Thibaut HEIMERMANN**

Directeur du pôle AVENIA



Le pôle AVENIA a pour mission de favoriser et de soutenir l'innovation collaborative des métiers du sous-sol. C'est donc tout naturellement que nous soutenons la création de ce laboratoire commun THEIA, qui a pour objectif de s'intéresser à l'exploration tactique des systèmes métalliques, dont les avancées serviront à la sécurisation des approvisionnements en métaux et métaux critiques des industries en Europe.

## LES RESSOURCES GÉOLOGIQUES DE NOTRE SOUS-SOL, UN ENJEU SOCIÉTAL ET INDUSTRIEL



Le laboratoire commun THEIA, ANR Arethuse Geology et GeoRessources incarne la synergie parfaite entre l'industrie et l'académie. Ensemble, nous façonnons l'avenir de la géologie et de l'exploration des ressources minérales, propulsant la recherche et l'innovation au cœur de notre partenariat. Cette collaboration dynamique définit de nouveaux standards, conjuguant expertise scientifique et savoir-faire industriel pour relever les défis actuels et anticiper les opportunités de demain.

# LE LABORATOIRE COMMUN THEIA

C'EST ICI QUE TOUT COMMENCE...

LabCom

# THEIA



## GENÈSE DES PROVINCES MÉTALLOGÉNIQUES PRÉCAMBRIENNES (AFRIQUE ET ARABIE)

- ▶ Transition Archéen-Protérozoïque
- ▶ Fertilisation des socles précambriens
- ▶ Traçage des systèmes métallogéniques à travers le cycle orogénique

## DÉVELOPPEMENT DES APPROCHES D'EXPLORATION MINÉRALE

- ▶ Cartographie SIG prédictive
- ▶ Outils portatifs spectroscopiques non-destructifs (XRF, LIBS et RAMAN)
- ▶ Modélisation géologiques et géostatistiques appliquées aux ressources

Le LabCom THEIA, à travers ses actions de recherche innovante, a un objectif double : mieux comprendre la formation des gisements afin de mieux prédire leur existence, et préparer les outils de l'exploration minière de demain, afin de rester prédictif et de permettre à l'industrie de conserver une avancée scientifique et technologique.

Le LabCom THEIA se décline ainsi en deux thèmes couvrant (1) la genèse et l'évolution des provinces métallogéniques Précambriennes (Afrique et Arabie) et (2) le développement de nouvelles approches d'exploration minière. Les avancées scientifiques et technologiques permettent une meilleure compréhension des phénomènes géologiques qui contrôlent la formation des gisements métalliques, ainsi que le développement de nouvelles stratégies et méthodologies pour innover dans la génération de nouveaux projets d'exploration, notamment au sein de provinces métallogéniques sous-explorées.

Les actions du LabCom THEIA vont cibler principalement trois provinces métallogéniques : le bouclier Ouest Africain dans son acceptation la plus large, le bouclier Arabo-Nubien, et l'Afrique centrale, incluant notamment le craton Tanzanien. D'autres régions, fondamentales pour compléter ce tableau, seront intégrées progressivement au système.

*Pourquoi ce nom de THEIA ?*

*Dans la mythologie grecque et romaine, Théia est une Titanide, fille d'Ouranos (le Ciel) et de Gaïa (la Terre), elle aurait créé tous les métaux précieux...*



**Anne-Sylvie ANDRÉ-MAYER**

▶ Enseignant-Chercheur en métallogénie,  
Directrice du laboratoire GeoRessources

La création du LabCom THEIA cherche à structurer et engager plus fortement une trajectoire de R&D partagée avec Arethuse Geology sur les systèmes métallogéniques précambriens, notamment sur le territoire africain, en s'appuyant sur la recherche académique de haut niveau développée à GeoRessources. Initié par deux thèses CIFRE, ce LabCom avec Arethuse Geology témoigne de l'envie d'une génération de scientifiques soucieuse de conjuguer problématique scientifique de très haut niveau et enjeux d'exploration des ressources minérales en s'appuyant sur des méthodes d'investigation multi-échelles de temps et d'espace.



**Rémi BOSC**

▶ Gérant de la société Arethuse Geology

Depuis bientôt 10 ans, Arethuse Geology a construit ses activités de recherche en métallogénie en partenariat avec le laboratoire GeoRessources de l'Université de Lorraine, et des partenaires miniers. Cette connaissance a débouché sur de nombreuses publications communes permettant de rayonner sur de nouveaux territoires. Les deux partenaires sont maintenant désireux de mieux structurer cette recherche afin de lui donner l'élan qu'elle mérite et de pérenniser un grand *hub* de recherche collaborative sur la métallogénie précambrienne, en ajoutant de nouveaux partenaires industriels et académiques. Cette confiance dans la création d'un avenir collaboratif entre la recherche académique et l'industrie s'affirme dans la création d'un laboratoire commun comme lieu de mutualisation des connaissances et de formation.



# LE LABORATOIRE COMMUN THEIA

UN LABCOM COLLABORATIF ET FÉDÉRATEUR

Le LabCom THEIA est conçu comme un véritable tremplin vers la pérennisation d'une recherche collaborative entre l'industrie et le monde académique via la création d'un consortium d'expertise français en géologie des ressources minérales. Ce dernier permettra de renforcer la compétitivité commune et de faire rayonner l'expertise française dans les ressources minérales et contribuer à l'approvisionnement de métaux critiques et stratégiques. Il s'appuie sur deux structures recherche et industrie impliquées dans les enjeux d'innovation dans l'exploration des matières premières minérales.



Créé en décembre 2010, Arethuse Geology, principal bureau d'études indépendant français dans son domaine, est spécialisé dans le conseil et la prestation de services géologique et minier, avec un focus unique sur l'Afrique et le Moyen-Orient. À ce jour, Arethuse Geology a acquis une vision à 360° de l'approvisionnement en ressources minérales, et fournit une expertise, de l'amont (e.g. génération de projets) à l'aval (e.g. calcul de ressources) du cycle d'exploration.

## INDUSTRIE

## RÉSEAU ACADÉMIQUE

GeoRessources est une Unité Mixte de Recherche (UMR 7359) de l'Université de Lorraine (UL) et du CNRS-INSU. Depuis sa création en 2013, GeoRessources cultive une recherche fondamentale et de transfert vers l'industrie, et se définit comme le laboratoire de référence en France pour répondre aux besoins sociétaux et industriels dans l'utilisation raisonnée du sous-sol, notamment en termes d'exploitation de ses ressources. GeoRessources est membre du pôle Avenia, labellisé CARNOT (Icée), et membre actif de la Société de l'Industrie Minérale (SIM).



FINANCEMENT  
GOUVERNEMENTAL



RÉSEAU ACADÉMIQUE



# UNE APPROCHE MULTI-MÉTHODES

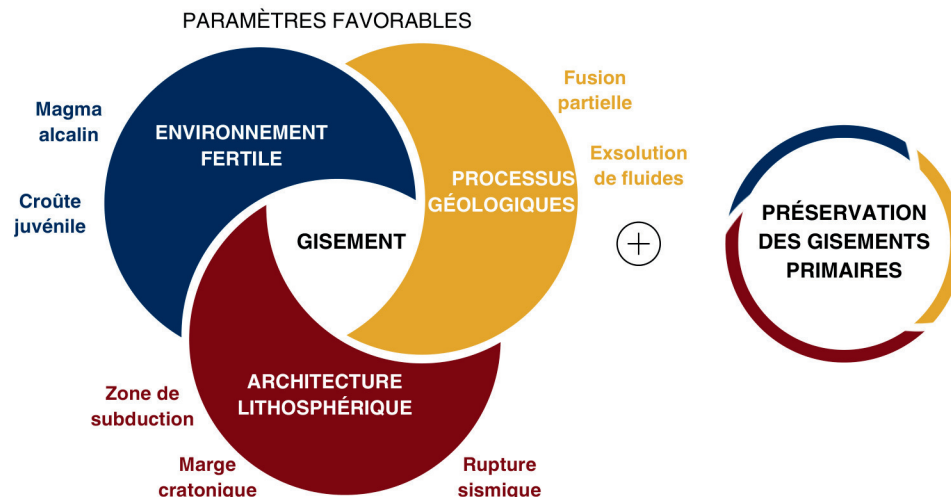
## MIEUX CARACTÉRISER LES SYSTÈMES MÉTALLOGÉNIQUES

La demande globale en métaux ne cesse d'être en forte hausse et requiert une innovation constante de la part de l'industrie minière, notamment en termes de stratégie d'exploration minière. Le choix de nouvelles cibles d'exploration minière passe par une compréhension accrue des systèmes minéralisés dans leur cadre géodynamique s'appuyant sur le paradigme source-transport-dépôt.

Les gisements métalliques résultent d'une variété de processus géologiques, d'échelle nanométrique à lithosphérique, concentrant les métaux dans un volume réduit, tout du moins compatible avec une exploitation rentable. Les gisements sont ainsi, par définition, petits en volume/extension comparés à la surface et l'épaisseur de la croûte continentale, même si ils sont le produit final de processus qui peuvent être d'échelle lithosphérique. Cette notion de systèmes métallogéniques a été historiquement développée par les français (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).

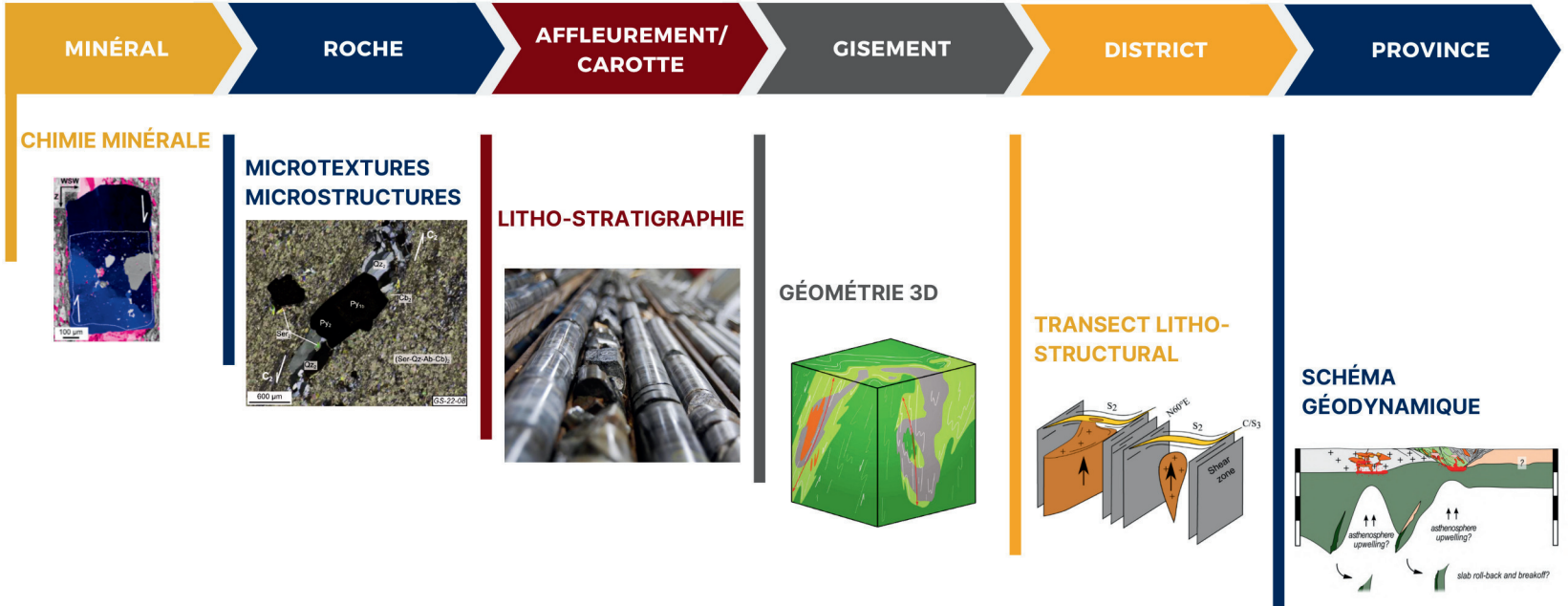
A l'heure actuelle, le concept de systèmes métallogéniques (« mineral systems ») est défini comme relatif à tous les facteurs géologiques contrôlant la formation et la préservation des gisements. Bien qu'il y ait de ce fait une variété d'interprétation de ce qu'est un système métallogénique, la plupart prennent en considération le contexte géodynamique, la chronologie/durée du système, la source et la nature des fluides/magmas et métaux, les mécanismes de transport des métaux et de dépôt, ainsi que les modifications post-dépôt. Pour les systèmes aurifères, les conditions de dépôt et de transport ont généralement bien été étudiées, mais la source de l'or, par exemple, reste sujette à débat. Cette approche implique une nouvelle vision des systèmes minéralisateurs intégrant l'âge d'extraction mantellique (représentant la fertilisation de cet élément au sein de la croûte continentale) ainsi que l'âge de concentration de l'élément considéré, entraînant un zoom-dézoom spatial et temporel pour l'étude des systèmes, depuis l'échelle spatiale nanométrique à l'échelle lithosphérique, depuis l'échelle temporelle instantanée à l'échelle d'un ou plusieurs cycles orogéniques.

Les volumes des gisements et la relation teneur/tonnage (proxy du volume) ont fortement évolués depuis ces quinze dernières années. Cette tendance minière à explorer/exploiter des gisements de plus en plus basses teneurs permet de ce fait l'accès à de nouvelles catégories d'anomalies de concentration, ouvrant des possibilités accrues de compréhension du (des) système(s) aurifère(s) à grande échelle de temps et d'espace.



# ET MULTI-SCALAIRE DE TEMPS ET D'ESPACE

ÉCHELLE...



## DYNAMIQUE MULTI-ÉCHELLES DES SYSTÈMES MINÉRALISÉS



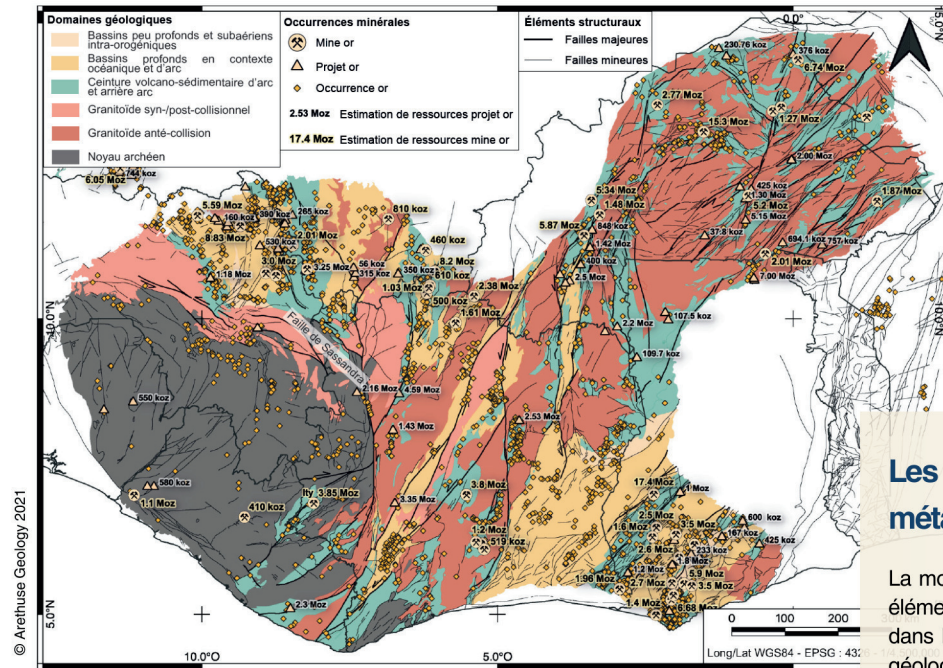
© Christophe Bonnetti & Bouaké Côte d'Ivoire, Juin 2023



© Rémi Bosc & Arabie Saoudite, Novembre 2023

# TROUVER LES GISEMENTS

## AXE 1. SYSTÈMES MÉTALLOGÉNIQUES DES GISEMENTS PRÉCAMBRIENS



Les gisements métalliques représentent des expressions d'une succession de processus géologiques qui se déroulent à différentes échelles de temps et d'espace permettant de concentrer les éléments d'intérêt stratégique dans un volume compatible à leur exploitation économique.

Leur distribution n'est pas aléatoire et peut être liée à une combinaison de facteurs thermiques, litho-tectoniques voire hydro-atmosphériques. De ce fait, les gisements métalliques peuvent ainsi être considérés comme des traceurs de l'évolution du système Terre à travers les temps géologiques, permettant ainsi de définir les conditions propices à la formation de provinces métallogéniques à l'échelle continentale.

### Les modalités de concentration d'éléments métalliques dans la croûte continentale

La mobilisation depuis les roches sources, le transfert et le dépôt des éléments métalliques dans la lithosphère peuvent alors être intégrés dans le concept de système métallogénique qui englobe les facteurs géologiques qui contrôlent la formation et la préservation des gisements métalliques.

Carte des grands ensembles litho-tectoniques et des minéralisations aurifères, classées en fonction de l'avancement du projet minier, du type de gisement et de l'âge de la minéralisation du craton d'Afrique de l'Ouest.



**Christophe BONNETTI**

▷ Sénior métallogéniste chez Arethuse Geology



**Arnaud FONTAINE**

▷ Métallogéniste structuraliste chez Arethuse Geology

Pour une compréhension holistique des systèmes minéralisés, toutes commodités confondues, il est nécessaire d'avoir une approche intégrant les signatures de l'ensemble des composantes (sources, transport, dépôt, préservation) de ces systèmes qui témoignent des conditions génétiques propres à chaque type de minéralisation. L'enregistrement des signatures géochimiques, minéralogiques et isotopiques au sein des roches encaissantes et des fluides minéralisateurs constitue autant d'indices de la présence de gisements au sein des provinces métallogéniques et permettent également de reconstituer leur histoire souvent polyphasée au travers des cycles géodynamiques.

Conceptualiser et modéliser la complexité géométrique et litho-structurale des gisements permet de quantifier la distribution des éléments d'intérêt économique dans l'espace. En intégrant la dimension temporelle, ceci offre alors une vision évolutive en 4D de la minéralisation. Cette approche est aussi un élément clé pour orienter l'exploration et ainsi optimiser l'exploitation des ressources minérales.

# GENÈSE DES PROVINCES MÉTALLOGÉNIQUES PRÉCAMBRIENNES (AFRIQUE ET ARABIE)

## ▶▶ AXE 1.1 TRANSITION ARCHÉEN-PROTÉROZOÏQUE

La genèse des provinces métallogéniques suggère une compréhension fine de la croissance de la croûte terrestre, de son recyclage et de sa remobilisation au cours des temps géologiques, notamment depuis l'Archéen jusqu'au Protérozoïque.

Intimement associés à la formation et la déformation de cette croûte précambrienne, différents types et styles de minéralisation (1) s'expriment à des périodes de temps spécifiques définissant des époques métallogéniques et (2) se distribuent le long de segments litho-tectoniques préférentiels définissant des provinces métallogéniques.

Le potentiel métallogénique des provinces précambriennes n'est plus à démontrer puisqu'elles hébergent différents types de minéralisations dont les plus représentées sont : (1) les minéralisations polymétalliques de type SMV (sulfures massifs volcanogènes) ; (2) les minéralisations de sulfures exhalatifs dans les roches sédimentaires (SEDEX) ; (3) minéralisations aurifères associées aux formations de fer rubanées ; (4) les minéralisations magmatiques de nickel-cuivre ( $\pm$  cobalt  $\pm$  éléments du groupe du platine  $\pm$  chrome) associées aux intrusions mafiques à ultramafiques ; (5) les minéralisations en métaux rares associées aux intrusions plutoniques et pegmatitiques et enfin (6) les minéralisations aurifères associées aux couloirs de déformation. Ainsi, la distribution de ces minéralisations dans le temps et dans l'espace, leur télescopage au sein d'un même cycle orogénique ou encore le rôle de l'héritage ou non des structures tectoniques et de l'architecture de la lithosphère au travers des différentes orogènes à la transition Archéen-Protérozoïque, sont autant de questionnements qui demandent à être approfondis afin de définir des métalotectes robustes à l'échelle d'une province.

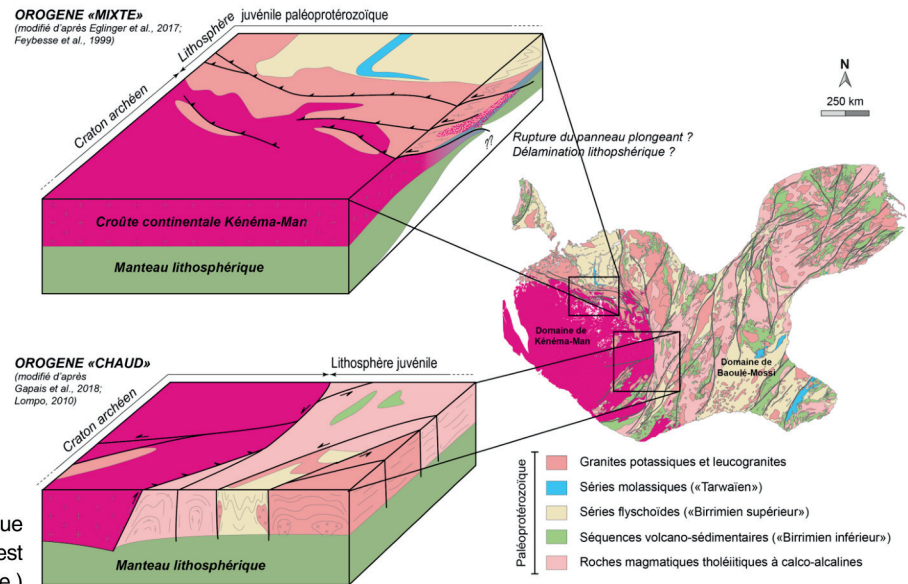


### Aurélien EGLINGER

▶ Enseignant-Chercheur en géologie structurale, géodynamique et métallogénie

La transition Archéen-Protérozoïque est marquée par une évolution des modèles géodynamiques depuis une tectonique distribuée, dite « archaïque », vers une tectonique plus localisée, dite « moderne ». Cette transition de style tectonique est marquée par différents enregistrements magmatiques, métamorphiques, sédimentaires et en particulier structuraux. Ce dernier paramètre est un élément clé dans la formation et la déformation des gisements depuis l'extraction des métaux de leur source, lors de leur transport jusqu'à leur (re-)concentration dans la croûte. De fait, comprendre et intégrer les gisements dans leur cycle orogénique est fondamental pour prédire de nouveaux environnements géologiques fertiles et d'éventuels vecteurs structuraux pour guider l'exploration.

Évidence géodynamique à la transition Archéen-Protérozoïque sur l'exemple du bouclier d'Afrique de l'Ouest (contact entre le Kénéma-Man et de l'orogène Éburnéenne.)



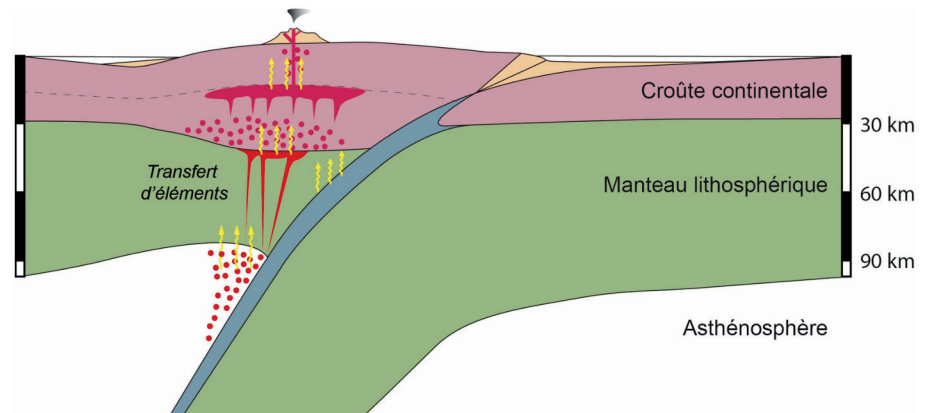
# GENÈSE DES PROVINCES MÉTALLOGÉNIQUES PRÉCAMBRIENNES (AFRIQUE ET ARABIE)

## ▶ AXE 1.2 FERTILISATION DES SOCLES PRÉCAMBRIENS

La compréhension des processus de concentration métallique au sein des roches qui constituent les ceintures orogéniques précambriennes représente un enjeu majeur dans la définition de socles fertiles propices à la formation de provinces métallogéniques à l'échelle continentale.

La fusion partielle du manteau et les magmas juvéniles qui en dérivent lors de la formation du plancher océanique constitue une étape de concentration initiale illustrée par un transfert lithosphérique de métaux du manteau supérieur vers la croûte terrestre. Par la suite, les processus géodynamiques de subduction océanique et de collision continentale à l'origine de phases répétées d'enfouissement et d'exhumation des roches sont des moteurs essentiels aux phénomènes de remaniement et de recyclage de la croûte au travers desquels les processus de fusion partielle et de différenciation magmatique sont des vecteurs clés de l'enrichissement des socles en métaux.

Ces métaux seront ensuite mobilisés et transportés grâce aux fluides qui circulent à toutes les profondeurs de la croûte et qui jouent un rôle majeur dans la formation des gisements hydrothermaux procurant une grande partie des ressources en Cu, Zn, Pb, Ag, Ge, U, Co, Au, Sn et W, par exemple. Ainsi, le rôle du remaniement des vestiges de croûte archéenne au cours des orogènes protérozoïques demeure une question fondamentale pour la fertilisation des socles au sein des provinces métallogéniques précambriennes.



### Processus de transfert des métaux au sein de la lithosphère

Le pré-enrichissement ou l'enrichissement en métaux dans la croûte terrestre, ici défini comme processus de fertilisation, fait intervenir plusieurs paramètres dont, les propriétés physico-chimiques de l'élément d'intérêt considéré, les conditions oxydo-réductrices des environnements géologiques et des magmas/fluides associés, l'évolution P(pression)-T(température)-d(déformation) des roches sources et hôtes de la minéralisation et de la composition chimique des systèmes minéralisés.



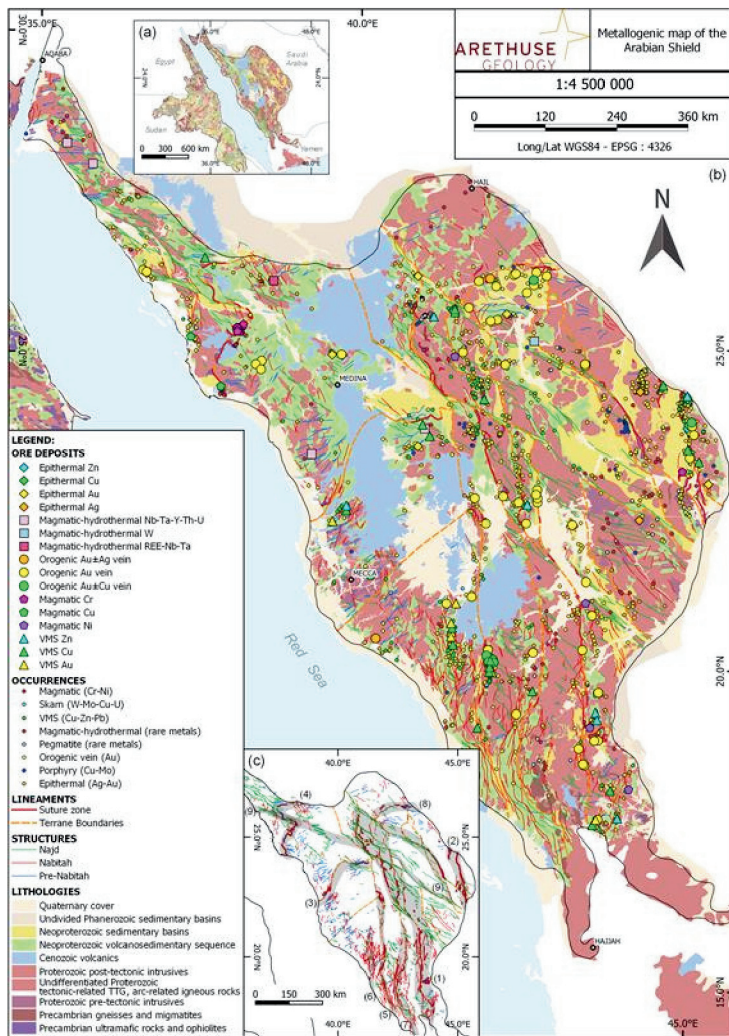
**Christophe BALLOUARD**

▶ Chargé de Recherche au CNRS, cycle du lithium dans la croûte continentale

Certains métaux essentiels pour la transition énergétique, tels que Li, Ta, Nb, Sn et Be, se trouvent souvent dans des roches granitiques associées à la fusion de la croûte à la fin des processus de collision des plaques. Les zones orogéniques précambriennes sont particulièrement propices à ces gisements. Cependant, les détails de leur formation, y compris les influences tectoniques, magmatiques et l'impact de l'évolution pré-orogénique de la croûte, restent peu compris. Les progrès récents dans les techniques d'analyse géochimique et de datation, ainsi que dans la compréhension des structures des granites et des pegmatites à métaux rares, peuvent contribuer à améliorer nos modèles de formation de ces gisements et à optimiser leur exploration.

# GENÈSE DES PROVINCES MÉTALLOGÉNIQUES PRÉCAMBRIENNES (AFRIQUE ET ARABIE)

## AXE 1.3 TRAÇAGE DES SYSTÈMES MÉTALLOGÉNIQUES À TRAVERS LE CYCLE OROGÉNIQUE



La relation spatiale et temporelle des gisements métalliques avec les cycles orogéniques est établie. Les gisements sont ainsi répartis de manière hétérogène dans l'espace et dans le temps; reflétant notamment le contexte tectonique, l'évolution des conditions environnementales (atmosphère et hydrosphère), et des changements séculaires dans l'évolution de la planète Terre. Connaître le contexte géodynamique d'une région permet ainsi d'en prédire son potentiel métallogénique, et inversement, la caractérisation d'un type de gisement va permettre de contraindre un contexte géodynamique.

L'Afrique et l'Arabie exposent une portion importante de reliques géologiques précambriennes, reflétant une configuration tectonique complexe représentée par des boucliers continentaux, dans lesquels les noyaux cratoniques archéens se sont stabilisés vers 2.5 Ga et sont enveloppés par une série de ceintures orogéniques protérozoïques (2.4-2.0 Ga, 1.35-1.0 Ga et 700-500 Ma). Ces roches permettent de discuter des modèles globaux géodynamiques au Précambrien. Inversement, la présence de gisements de différentes natures (VMS, porphyre, or orogénique, granite à métaux rares, etc...) permettent de discuter de contextes géodynamiques souvent difficiles à reconstituer dans ces segments de croûte déformés et métamorphisés.

Ainsi, comprendre et intégrer les gisements dans leur cycle orogénique est fondamental pour prédire de nouveaux environnements géologiques fertiles et d'éventuels vecteurs structuraux pour guider l'exploration.



**Renan FURIC**

Sénieur géologue d'exploration chez Arethuse Geology

Une approche multi-échelle avec des observations et prise de mesures du terrain jusqu'au laboratoire, et une approche multi-méthodes en s'appuyant sur des outils analytiques de pointe, autorisent aujourd'hui la caractérisation fine des signatures géochimiques, isotopiques et minéralogiques des systèmes minéralisés polyphasés. Elles permettent ainsi de contraindre les processus génétiques de ces systèmes de même que de tracer leur évolution au cours des cycles orogéniques et les conditions de leur préservation jusqu'à nos jours.

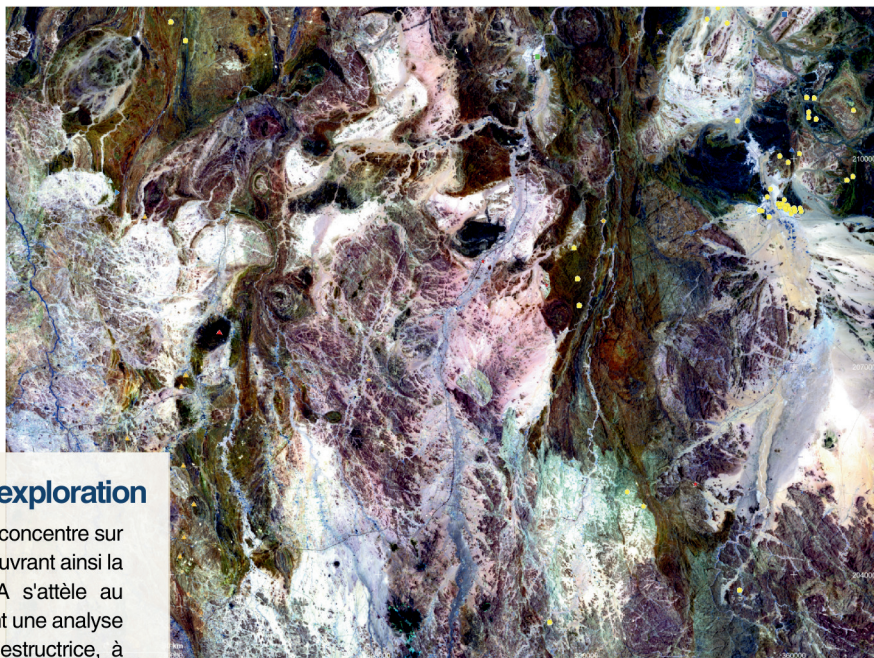
# LES OUTILS INNOVANTS DE DEMAIN

## AXE 2. DÉVELOPPEMENTS ET INNOVATIONS DE TECHNOLOGIES POUR L'EXPLORATION MINÉRALE

L'exploration géologique de nouveaux gisements se trouve face à des défis cruciaux, exigeant des approches innovantes pour cibler et évaluer le potentiel d'une zone avec une efficacité accrue en termes de temps et de coûts. L'archivage et la gestion des données puis leur intégration et leur utilisation dans un cadre de connaissances hétérogènes constituent aujourd'hui les véritables défis scientifiques et industriels.

La nécessité de découvertes rapides et économiquement viables de gisements métalliques a stimulé la recherche de méthodologies axées sur des solutions de prédictivité, d'analyse chimique et de caractérisation des objets géologiques, qui fournissent des indications précieuses pour les géologues.

En parallèle, la pression pour définir les gisements au plus près des données, minimisant les marges d'erreur, constitue un impératif de l'industrie minière. Le perfectionnement de technologies novatrices, combinant la modélisation géologique implicite et explicite ou encore l'approfondissement des outils géostatistiques appliqués à l'estimation des ressources représentent une avancée cruciale pour l'avenir de l'exploration.



### Définition des guides d'exploration

En quête d'avancées significatives, cet axe 2 de recherche se concentre sur la conception de méthodes cartographiques SIG prédictives, ouvrant ainsi la voie à l'identification de nouvelles cibles. De plus, THEIA s'attèle au déploiement sur le terrain d'outils portatifs innovants permettant une analyse quantitative sur le terrain, favorisant une exploration non destructrice, à résultats instantanés. Enfin, le laboratoire se distingue par ses travaux sur des solutions de modélisation 3D et de géostatistiques poussées, offrant une perspective inégalée pour la compréhension approfondie du potentiel géologique de la zone ciblée.

Traitement Landsat 8 (RGB combinaison 7-6-5) superposé aux occurrences minérales métalliques (MODS) localisé en Arabie Saoudite.



**Jean CAUZID**

▷ Enseignant-Chercheur, Techniques Analytiques



**Virginie MASSON**

▷ Géologue de ressources et SIG manager, Arethuse Geology

L'exploration minière se base sur des variations ténues des paramètres ciblés (minéraux, chimie ou propriétés physiques par exemple), qui ne peuvent être détectées qu'avec une exploitation maximale des moyens analytiques.

Le challenge est de développer des méthodes qui pourront être redéployées sur les terrains de la recherche fondamentale. Les gisements sont donc des objets d'étude de choix pour les scientifiques académiques.

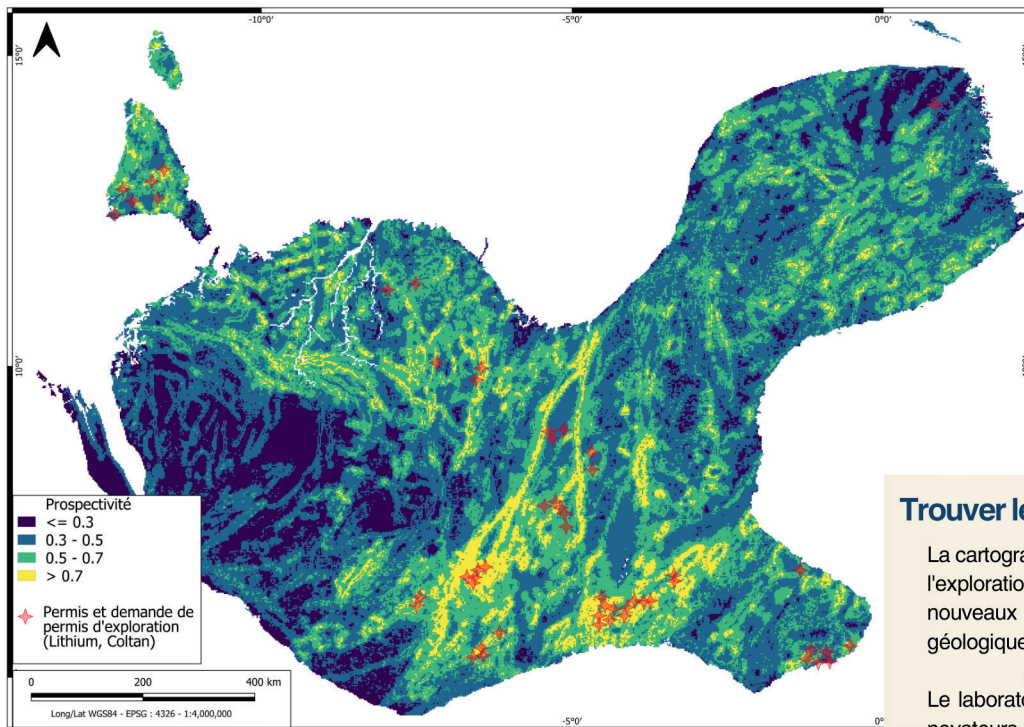
Ces technologies innovantes dynamisent le secteur de l'exploration des ressources minérales, apportant une compréhension plus approfondie du sous-sol et des systèmes géologiques et minéralisateurs en action. Le développement de ces outils technologiques transforme non seulement la manière dont les géologues abordent l'exploration, mais cela redéfinit également les normes en matière d'efficacité, contribuant à une exploration optimisée tout en réduisant considérablement les coûts, les délais et les impacts sociaux et environnementaux.



# DÉVELOPPEMENT DES TECHNOLOGIES INNOVANTES D'EXPLORATION MINÉRALE

## AXE 2.1 APPROCHE SIG ET CARTOGRAPHIE PRÉDICTIVE

L'exploration minière moderne s'appuie sur la gestion et l'analyse approfondie de jeux de données géoscientifiques complexes. Cette tâche est facilitée par l'utilisation généralisée d'un Système d'Information Géographique (SIG), un outil essentiel dans le traitement de données géoréférencées. La compilation et le traitement de données multicouches incluant la géologie, la géochimie, la géochronologie, la géophysique ou encore les images satellites type Landsat et ASTER sont devenus des étapes indispensables pour une exploration optimisée. Le SIG assisté des derniers développements en terme d'intelligence artificielle ("*machine Learning*") offre une nouvelle perspective de définition spatiale des ressources du sous-sol.



La compilation d'une base de données cartographiques et les analyses approfondies effectuées à l'aide de ces outils SIG, incluant les techniques géostatistiques et prédictives, jouent désormais un rôle central dans le domaine de l'exploration des ressources minérales.

La maîtrise de ces outils de prédictivité permet aux compagnies minières de cibler efficacement des zones d'intérêt et d'évaluer leur potentiel en intégrant toutes les données disponibles.

Dans un contexte où la demande en métaux critiques est en constante augmentation, la découverte de nouveaux gisements revêt une importance cruciale.

### Trouver les gisements de demain

La cartographie prédictive émerge comme un guide essentiel pour l'exploration de ressources minérales, facilitant l'identification de nouveaux gisements en s'appuyant sur les connaissances géologiques passées et les découvertes récentes.

Le laboratoire commun THEIA s'engage à développer ces outils novateurs pour soutenir l'avancement continu de l'exploration minière.

Carte prédictive des pegmatites à métaux rares LCT à l'échelle du craton d'Afrique de l'Ouest. Le résultat de cette étude de recherche est basé sur une approche hybride : (1) intégration des données d'occurrences des éléments associés aux pegmatites à métaux rares ("*data-driven*") et (2) expertise métallogénique d'Arethuse Geology sur les processus de formation de ces objets afin de pondérer différents critères cartographiables ("*knowledge-driven*").

# DÉVELOPPEMENT DES APPROCHES D'EXPLORATION MINÉRALE

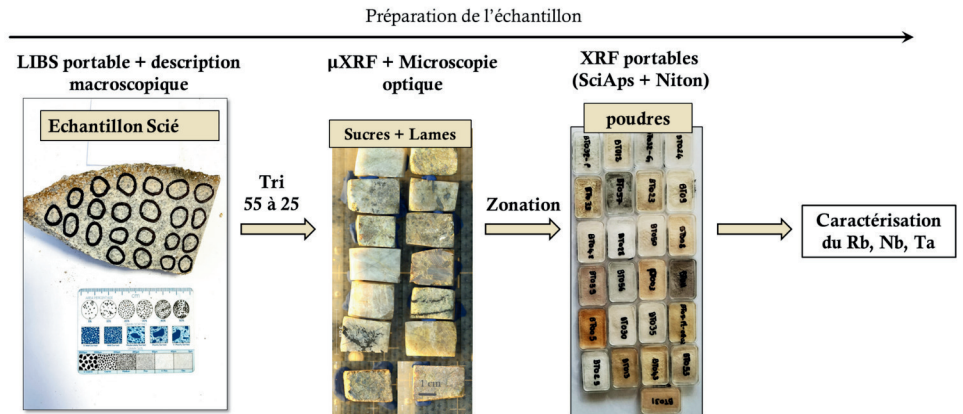
## AXE 2.2 OUTILS PORTATIFS SPECTROSCOPIQUES NON-DESTRUCTIFS (XRF, LIBS ET RAMAN)

Notre objectif principal est de déterminer les capacités des outils portables à mesurer les compositions chimiques et minéralogiques des roches directement sur le terrain, que ce soit en mine, sur affleurement ou sur une carotte de forage.

Le cœur de notre démarche réside dans le développement et la validation de protocoles d'utilisation de ces instruments déployés sur le terrain (calibration et traitement des données).

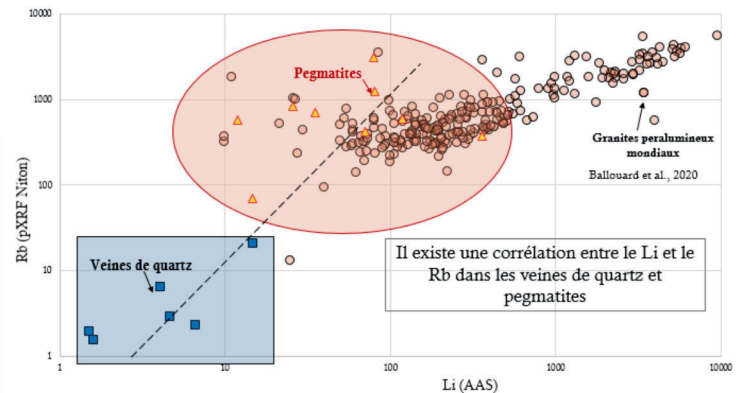
Cela vise également à garantir la précision et la fiabilité des données acquises en vue de leur intégration dans des modèles métallogéniques. Une attention particulière sera portée à l'abaissement des limites de détections analytiques de ces outils combinés afin d'ouvrir leurs utilisations à de nouvelles applications en termes d'exploration minérale (e.g. campagne d'échantillonnage géochimie sol, cartographie des domaines géologiques et identification des minéraux diagnostiques).

Les géologues d'exploration et ingénieurs de production doivent donc disposer d'outils et de méthodes qui fournissent des données fiables, adaptées aux lieux et aux échelles, rapides et applicables en temps réel sur le terrain ou en usine dès la réception des échantillons.



### Déplacer le laboratoire sur le terrain

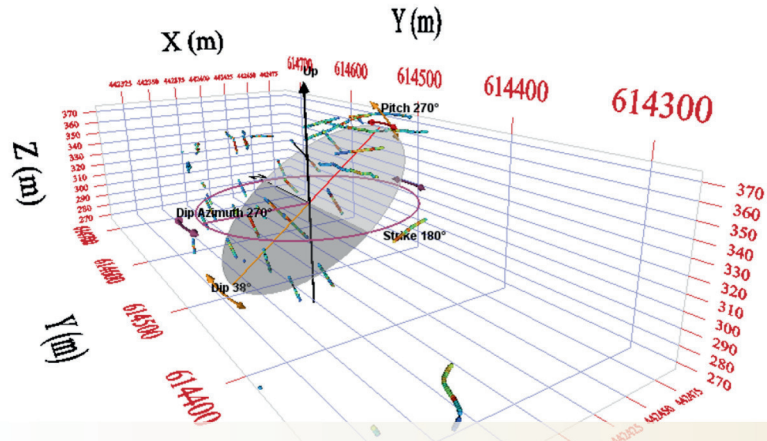
Élaboration d'une méthodologie d'exploration indirecte par pXRF pour les pegmatites à lithium où le cortège élémentaire (Rb, Ta, Nb, Sn) associé au lithium est utilisé comme proxy vers les minéralisations lithinifères sans analyser le lithium qui n'est pas mesurable par XRF. Celui-ci étant analysé par Libs portable dont les teneurs sont contrôlées par les valeurs géochimiques en roche totale permettant ainsi de valider la méthode.



Protocole d'analyses *in situ* combinées par LIBS et XRF portables et compilation des résultats obtenus pour la détermination des signatures géochimiques des pegmatites à lithium de Côte d'Ivoire.

# DÉVELOPPEMENT DES APPROCHES D'EXPLORATION MINÉRALE

## AXE 2.3 MODÉLISATION GÉOLOGIQUE ET GÉOSTATISTIQUES APPLIQUÉES AUX RESSOURCES



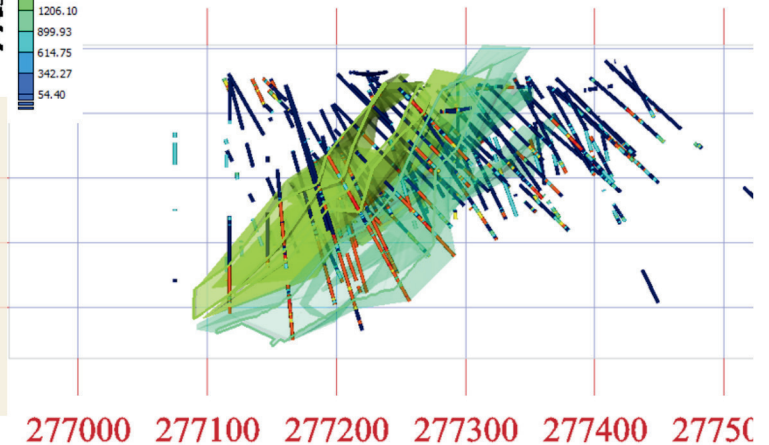
### Interpréter et matérialiser le sous-sol

La modélisation 3D de la géologie repose sur une intégration méticuleuse des données disponibles, comprenant entre autre, les données d'affleurements, les données géochimiques de forage, et données structurales. L'incorporation de ce modèle géologique joue un rôle essentiel dans la réalisation du bloc modèle de teneur car il influence le traitement géostatistique de la propagation des données géochimiques au sein du volume.



Les solutions digitales de modélisation 3D sont en perpétuelle évolution, la capacité à visualiser des structures géologiques et des enveloppes de teneurs en métaux en 3D s'avère être un outil précieux dans la quête d'une compréhension approfondie des formations minéralisées, permettant une planification éclairée des travaux d'exploration.

Cette approche basée sur une composante tant empirique avec l'expertise du géologue que statistique et géostatistique, offre une précision accrue dans la caractérisation des gisements, permettant une estimation de ressources plus rigoureuse.



**Julien FENEYROL**

Géologue de ressources chez Arethuse Geology

La modélisation 3D de la géologie couplée à celle des teneurs des gisements se positionne comme guide idéal pour le géologue d'exploration. Cette approche dynamique et innovante transcende les limites des méthodes traditionnelles, ouvrant de nouvelles perspectives pour la compréhension des gisements et l'optimisation de l'exploration de ressources du sous-sol.

# LES GISEMENTS MÉTALLIQUES COMME MARQUEUR DU SYSTÈME TERRE

## LES GISEMENTS MÉTALLIQUES, DES ANOMALIES GÉOCHIMIQUES, TRACEURS DES CONTEXTES GÉODYNAMIQUES

Les archives géologiques présentes dans le sous-sol constituent également un patrimoine commun et irremplaçable permettant de documenter les évolutions passées, qu'elles soient géologiques, climatiques, environnementales ou sociétales et permettent ainsi de faire avancer les connaissances sur l'évolution des interactions manteau croûte, la formation et le recyclage de la croûte continentale ainsi que les transferts élémentaires qui en résultent au sein de la lithosphère.

Bien que répartis de manière hétérogène dans ses différentes dimensions, la distribution des gisements métalliques n'est pas aléatoire et peut être liée à une combinaison de facteurs géologiques (p.ex.: l'évolution de l'hydrosphère-atmosphère), les changements dans le flux thermique mondial et les évolutions tectono-magmatiques. De ce fait, les gisements métalliques peuvent ainsi être considérés comme des traceurs de l'évolution du système Terre à travers les temps géologiques, permettant ainsi de définir les conditions propices à la formation de provinces métallogéniques à l'échelle continentale. La mobilisation depuis les roches sources, le transfert et le dépôt des éléments métalliques dans la lithosphère peuvent alors être intégrés dans le concept de système métallogénique qui englobe les facteurs géologiques qui contrôlent la formation et la préservation des gisements métalliques. Leur compréhension la plus complète possible a des conséquences fondamentales sur l'identification des environnements géologiques favorables, la localisation et la géométrie des gisements, paramètres essentiels aux campagnes d'exploration menées par les industriels.

Les cibles du LabCom THEIA permettent de documenter l'évolution du système Terre et notamment sa géodynamique précambrienne controversée de l'Archéen au Néoprotérozoïque : le bouclier tanzanien pour l'Archéen, le craton ouest-africain pour la transition Archéen-Paléoprotérozoïque et le bouclier arabo-nubien pour le Néoprotérozoïque.

Pour concrétiser ces objectifs, le LabCom THEIA s'est engagé dans divers projets de recherche, mobilisant des expertises complémentaires et des ressources conjointes.

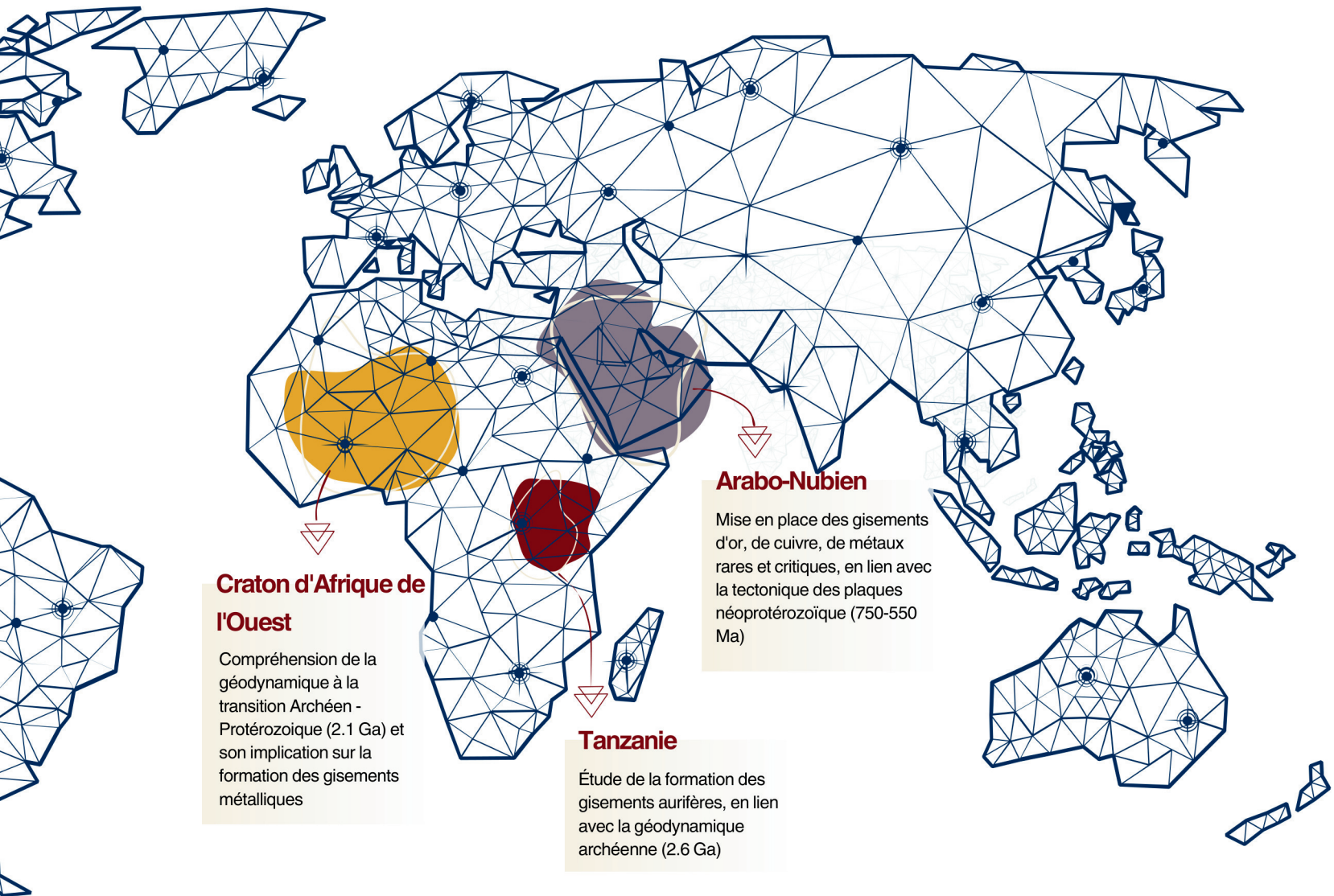
### ▷ Des thèses CIFRE depuis 2018

- La première s'est penchée sur le bouclier Arabo-Nubien, apportant des éclairages inédits sur cette région sous-explorée et sous-documentée du Néoprotérozoïque (Julien PERRET, 2018-2021),
- La deuxième thèse, en cours, se consacre au craton tanzanien, offrant une compréhension approfondie de l'histoire géodynamique de ce segment de croûte continentale dans laquelle des minéralisations précoces sont observées (Célestine BERTHIER, 2021-2024),
- - Prochainement, une thèse débutera sur le craton d'Afrique de l'Ouest et se focalisera sur la transition Archéen-Protérozoïque (Valentine CHARVET, 2024-2027).

▷ Des travaux connexes s'appuyant sur des étudiants dans le cadre de modules de formation "à et par la recherche" et/ou de stages industriels proposée dans leur formation initiale de licence, de master et d'ingénieur-géologues.



# DES ZONES STRATÉGIQUES CIBLÉES...



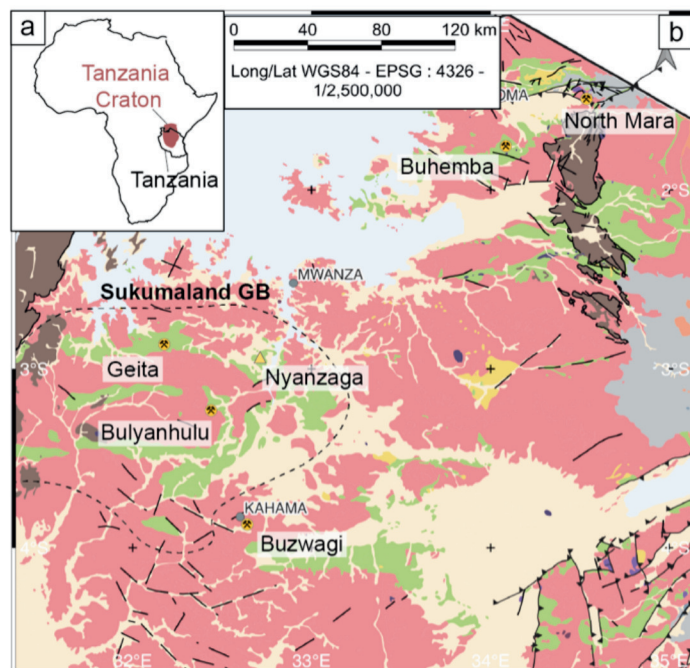
# LE CRATON DE TANZANIE

## LA CEINTURE DE ROCHES VERTES ARCHÉENNE DU SUKUMALAND : CROISSANCE CRUSTALE, FERTILISATION ET CONCENTRATION AURIFÈRE

### CONTEXTE

Les provinces aurifères précambriennes caractérisent des périodes de formation et de croissance de croûte dite juvénile, c'est-à-dire formée à partir de matériel directement extrait du manteau. Les processus ainsi associés à l'extraction de l'or depuis son réservoir, à savoir le manteau, et son « enrichissement » dans la croûte sont alors directement dépendants des processus géodynamiques impliqués, dont les caractéristiques à l'Archéen et au Paléoprotérozoïque sont toujours le sujet de débats scientifiques. Le craton archéen de Tanzanie, et plus précisément la province aurifère du lac Victoria, représente la zone d'étude de ce doctorat pour approfondir la problématique entre la formation et l'évolution des premiers continents et leur fertilisation en or.

Le craton de Tanzanie contient quasi-exclusivement tous les gisements d'or et de diamant d'Afrique de l'Est. Depuis la fin des années 1990, plusieurs gisements aurifères ont été mis en exploitation, principalement dans la région du lac Victoria. Cette région, souvent nommée « Lake Victoria Goldfields », est marquée par la forte présence de ceintures de roches vertes métamorphisées dans les faciès schiste vert à amphibolite inférieur qui sont classiquement reconnus comme étant des hôtes favorables aux gisements d'or orogénique de classe mondiale. Le travail de doctorat de Célestine Berthier se portent spécifiquement sur les gisements de Kilimani et Nyanzaga, localisés dans la ceinture de roches vertes archéennes du Sukumaland.



#### Geology of the Lake Victoria Goldfield Barth (1990)

- Phanerozoic sedimentary cover
- Neogene volcanic rocks
- Proterozoic Bukoban System
- Archean greenstone belts
- Archean granitoids
- Uganda Craton

#### Major gold deposits

- Gold mines
- Gold projects

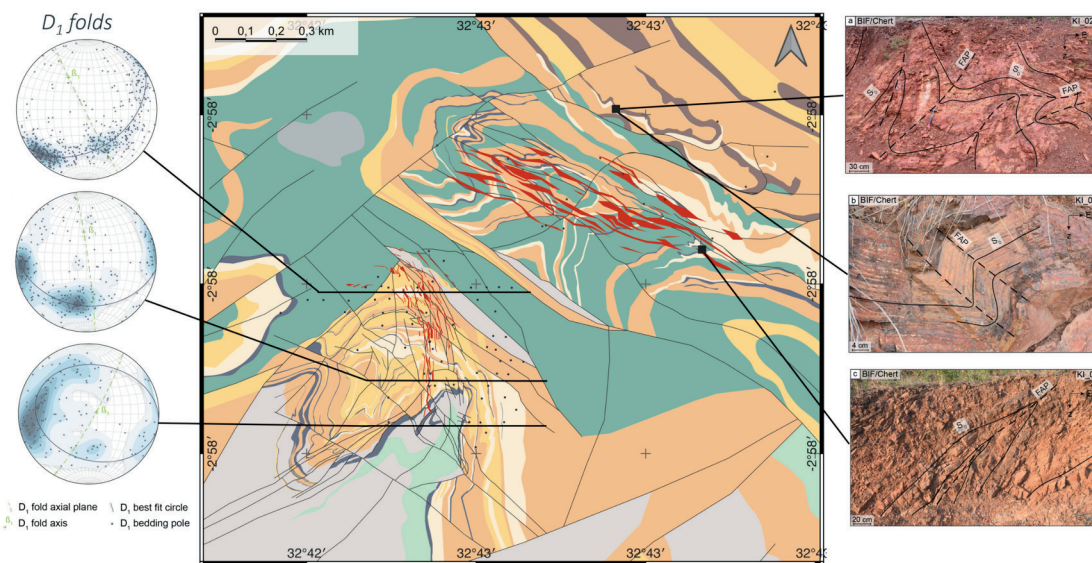
Lat/Long WGS84



© Célestine Berthier Sotta Hill, Nyanzaga Hill, the Lake Victoria Tanzania, Novembre 2022

# DES PROCESSUS TECTONIQUES ARCHÉENS AUX CONTRÔLES STRUCTURAUX DE LA MINÉRALISATION AURIFÈRE

## NOTRE DÉMARCHE SCIENTIFIQUE ET NOS RÉSULTATS



Le projet de thèse suit une méthode multiscale, de l'échelle microscopique à l'échelle lithosphérique. Une telle méthode offre une vision intégrée de la minéralisation dans le temps et dans l'espace, intégrant l'âge d'extraction mantellique représentant la fertilisation de l'or dans la croûte, ainsi que l'âge de concentration économique de cet élément au sein de la croûte.

Ici est présentée l'étude des contrôles structuraux de la minéralisation aurifère à l'échelle des gisements de Nyanzaga et Kilimani. L'or est localisé le long de failles et fractures normales et décrochantes, dont les orientations sont elles-mêmes contrôlées par la géométrie des couches stratigraphiques qui ont été plissées et replissées sous l'effet de mouvements tectoniques il y a près de 2,8 milliards d'années.



## FORMER À ET PAR LA RECHERCHE



### Célestine BERTHIER

▶ Doctorante CIFRE, Arethuse Geology-GeoRessources, 2021-2024

La formation et l'évolution de la croûte juvénile archéenne sont intimement associées à des processus de fertilisation en or. En effet, l'or est considéré comme un élément sidérophile, et donc présentant une affinité forte pour le fer. Il se retrouve fortement (pré-)concentré dans les ceintures de roches vertes où les séries volcano-sédimentaires sont dominées par des roches mafiques.

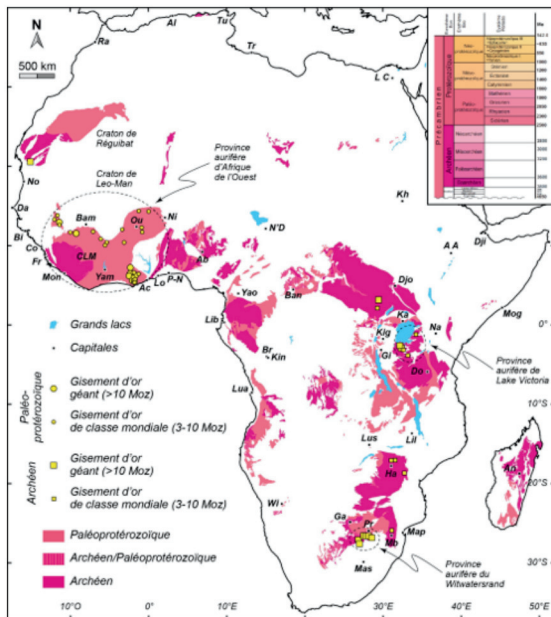
# LE CRATON D'AFRIQUE DE L'OUEST

UNE PROVINCE MINIÈRE ÉMERGENTE À LA TRANSITION ARCHÉEN-PROTÉROZOÏQUE

## CONTEXTE

Le craton d'Afrique de l'Ouest (CAO) couvre une vaste zone de 2800 km par 1600 km qui s'étend du Maghreb occidental jusqu'à la côte ouest-africaine atlantique. Il est partiellement recouvert par le bassin intracratonique de Taoudéni, formé entre le Néoprotérozoïque et le Paléozoïque, et qui le sépare en deux domaines incluant le « bouclier de Réguibat » au Nord, et « bouclier de Man-Léo » au sud.

Le CAO peut être divisé en deux secteurs qui sont séparés par la faille de Sassandra : le socle archéen (domaine Kénéma-Man) et les terrains paléoprotérozoïques (Boulalé-Mossi) qui se sont accretés progressivement au début de l'orogène éburnéenne de 2,27 à 1,96 Ga, et qui portent une majorité des ressources en or et autres métaux critiques au sein de cette province métallogénique. Le domaine archéen moins connu à l'ouest est principalement composé de gneiss, de migmatites et de granitoïdes. À l'est, on retrouve dans le domaine paléoprotérozoïque une alternance de trois ensembles litho-structuraux de forme allongée et d'orientation NE : des ceintures de roches vertes, des séries métasédimentaires et des domaines plutoniques.





# COMMENT PRÉDIRE LES GISEMENTS DE DEMAIN ?

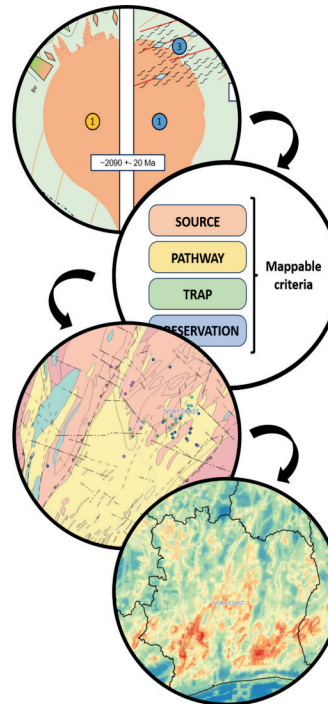
## NOTRE DÉMARCHE SCIENTIFIQUE ET NOS RÉSULTATS

Le craton d'Afrique de l'Ouest (COA) présente un environnement fertile d'intérêt majeur pour l'exploration des métaux de la transition énergétique et métaux rares (W, Sn, U, Li, Nb, Be, Ta, REE).

L'histoire géologique du COA a généré des conditions propices à la formation de pegmatites à lithium-césium-tantale (LCT) faisant l'objet de travaux d'exploration en Côte d'Ivoire (projets Atex et Issia) et de développement minier au Mali (projets Goulamina et Bougouni) ainsi qu'au Ghana (projet Ewoyaa). En effet, ces pegmatites, spatialement et/ou génétiquement associées à des leucogranites peralumineux riches en muscovite (e.g., granitoïdes de type G3 à Issia), sembleraient s'être mises en place lors d'un épisode magmatique régional (ca. 2.05 Ga) associé à l'effondrement tardi-orogénique lors de l'orogène éburnéenne (2.27-1.96 Ga).

Une méthode de génération de cibles d'exploration a été développée à l'aide d'outils SIG qui permettent de compiler, hiérarchiser, traiter et interpréter une quantité importante de données cartographiques telles que les données lithologiques, structurales, géochimiques, géochronologiques et géophysiques avec les occurrences en métaux critiques issues de la littérature scientifique et d'études techniques et industrielles. L'analyse et l'interprétation de ces données intégrées aux modèles métallogéniques ont été réalisées à plusieurs échelles incluant des zones actuellement prospectées (e.g. Issia, Côte d'Ivoire) et des zones encore sous-explorées pour ces métaux critiques (e.g. bassin de la Comoé-Suyani ou de Siguiri). Cette investigation permet (1) d'accroître les connaissances sur les concepts géologiques, métallogéniques et géodynamiques à l'origine de la mise en place des minéralisations en métaux critiques et (2) de générer un modèle de prédictivité solide, applicable à différentes échelles.

Ce modèle de prédictivité a pour objectif de réaliser des cartes de prospectivité délimitant de nouvelles cibles d'exploration des métaux critiques à l'échelle du COA optimisant ainsi les stratégies d'exploration au sein des provinces paléoprotérozoïques par l'identification de zones restreintes à fort potentiel de découvertes, tout en réduisant les coûts et l'impact environnemental.



### 1. Modèle métallogénique

- Modèle parental
- Modèle anatectique

### 2. Des concepts métallogéniques aux critères cartographiables

- Source – Transport – Piège – Préservation
- Proximité – Abondance – Association - Anomalie

### 3. Compilation des données géoscientifiques

- Données d'occurrences
- Données géologiques
- Données géophysiques

### 4. Le modèle hybride

- Estimation par noyaux (KDE)
- Normalisation
- Pondération
- Combinaison

Présentation des étapes clés dans la réalisation de la cartographie prédictive des pegmatites à métaux rares à l'échelle du craton d'Afrique de l'Ouest .



## PROJETS DE FIN D'ÉTUDE

Dans le cadre du projet de développement des outils de prédictivité cartographique au sein de la société Arethuse Geology, Hugo Watine, étudiant-ingénieur de l'ENSG, lors de son projet de fin d'étude, a mis en place un protocole préliminaire de cartographie prédictive de pegmatites à métaux rares du craton d'Afrique de l'Ouest .

# LE BOUCLIER ARABO-NUBIEN: UNE CEINTURE NÉOPROTÉROZOÏQUE À REGARDER DE PRÈS !

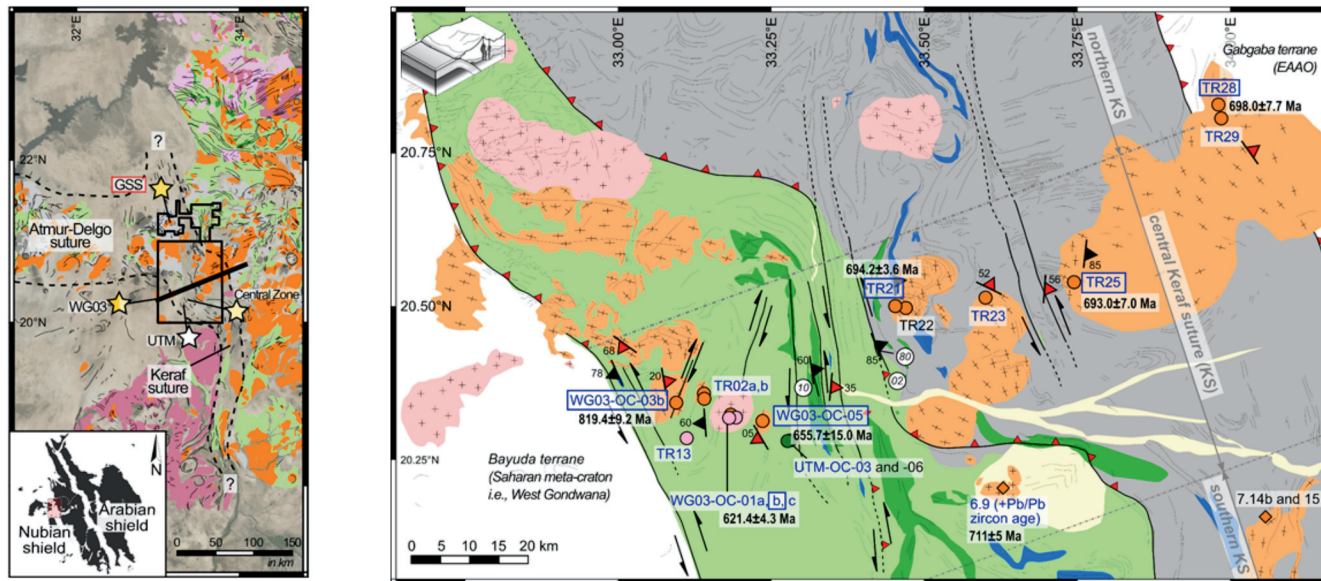
RÉPARTITION SPATIO-TEMPORELLE DU SYSTÈME MÉTALLOGÉNIQUE DE L'OR PANAFRICAIN AU SEIN DU BOUCLIER ARABO-NUBIEN : ÉTUDE MULTISCALE LE LONG DE LA SUTURE DE KERAF (SOUDAN)

## CONTEXTE

Le bouclier Arabo-Nubien possède toutes les caractéristiques d'une ceinture de roches vertes Néoprotérozoïque et présente au même titre que ses semblables Archéennes (Abitibi, Canada; Yilgarn, Australie) et Paléoprotérozoïque (craton d'Afrique de l'Ouest) un fort potentiel aurifère et en métaux de base. Le bouclier Arabo-Nubien est ainsi actuellement considéré comme une des provinces métallogéniques les plus prometteuses pour l'exploration polymétallique dans les années à venir et constitue actuellement la principale ressource d'or Néoprotérozoïque.

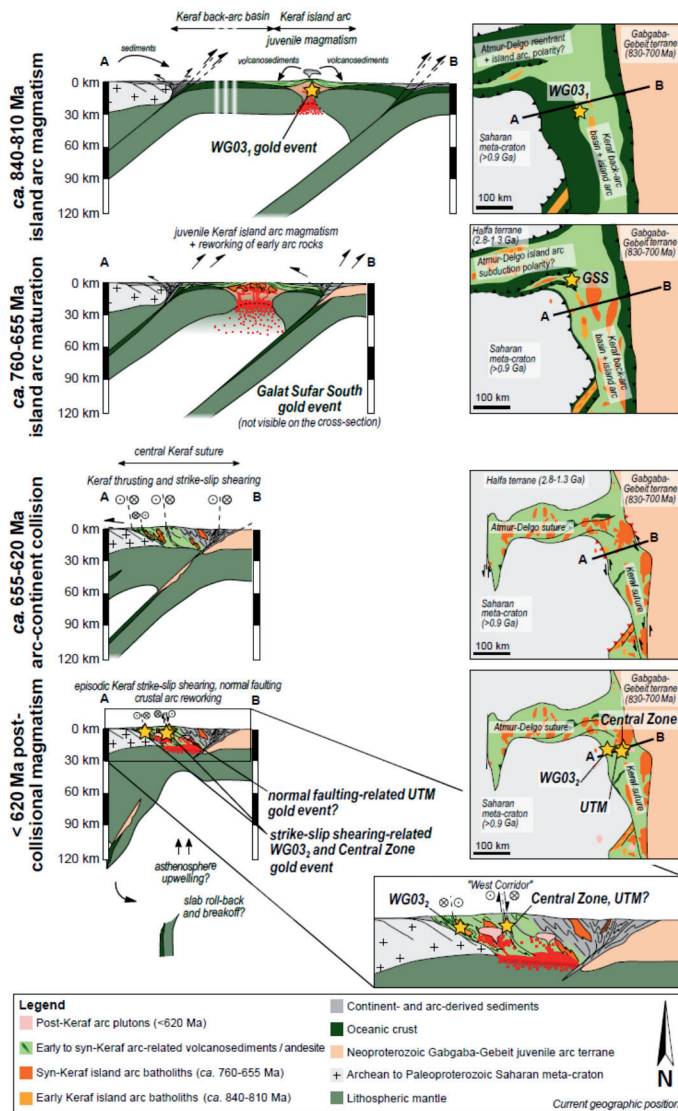
Au regard du potentiel métallogénique, et plus particulièrement aurifère, de la partie soudanaise du bouclier Arabo-Nubien, des interrogations émergent sur le multiphasage de l'or et l'importance de l'intégration des systèmes minéralisés à la compréhension de l'histoire géodynamique d'une région et vice-versa. Le doctorat réalisé par Julien Perret a eu pour objectif de caractériser la répartition spatiale et temporelle des minéralisations aurifères du bouclier Arabo-Nubien à travers l'étude d'occurrences minéralisées le long de structures majeures au Soudan.

Quatre gisements d'or ont été ciblés dans ce doctorat, incluant GSS, WG03, CZ et UTM, opérées par Orca Gold pour le premier, Managem pour les trois suivants. Ils sont situés le long de deux structures majeures que sont l'Atmur-Delgo suture (E-W) et la Keraf suture (N-S), marquant le contact entre le continent et les paléo-arcs insulaires formant le bouclier Arabo-Nubien.



# ÉVIDENCE DU MULTIPHASAGE AURIFÈRE AU SEIN DU BOUCLIER NUBIEN

## NOTRE DÉMARCHE SCIENTIFIQUE ET NOS RÉSULTATS



La longue durée de vie (185 millions d'années) de l'arc insulaire décrit le long de la suture de Keraf et sa nature juvénile prédominante expliqueraient la fertilisation crustale en or à l'échelle régionale.

Une première phase de croissance crustale, uniquement enregistrée le long de la suture de Keraf, est associée à un événement aurifère mineur, de nature magmato-hydrothermale. Une seconde période d'activité magmatique est associée au fonctionnement d'arcs insulaires le long des sutures de Keraf et d'Atmur-Delgo. Le couplage d'observations et de mesures réalisées du terrain au laboratoire illustre la continuité spatiale du contrôle structural des minéralisations postérieures au premier événement aurifère décrit. D'une part, un épisode minéralisateur a lieu vers 755-725 Ma, lors d'un *continuum* de déformation exprimé par la mise en place de structures minéralisées linéaires.

Les roches encaissantes de la minéralisation sont affectées par un métamorphisme au faciès amphibolite inférieure. À l'échelle du district, cet événement aurifère est associé à l'accrétion tectonique dans le prisme sédimentaire en avant de l'arc d'Atmur-Delgo. À l'échelle microscopique, la minéralisation résulte de la remobilisation syn-métamorphique du stock d'or contenu par les sulfures préexistants.

D'autre part, plusieurs gisements d'or orogénique sont exprimés sous forme de veines d'extension hébergées par des corps intrusifs, illustrant un fort contrôle rhéologique de la minéralisation. Les veines minéralisées sont formées selon le mécanisme de faille-valve, en réponse à la réactivation épisodique et localisée de décrochements crustaux jusqu'à 550 Ma au sein de la suture de Keraf.

L'application du système métallogénique a permis de définir des clés d'exploration à l'échelle du district qui traduisent des processus magmatiques (e.g., reliques d'arc insulaire) et contextes tectonométamorphiques (e.g., prisme d'accrétion, décrochements tardi-orogéniques) contrôlant des minéralisations aurifères aux caractéristiques structurales, géochimiques et chronologiques très variables dans la partie occidentale du bouclier arabo-nubien.

## FORMER À ET PAR LA RECHERCHE



**Julien PERRET**

Docteur CIFRE, Arethuse Geology-GeoRessources, 2018-2021.

La chronologie relative et la durée absolue des événements minéralisateurs en relation avec les épisodes tectoniques régionaux imposent une rigueur et une stratégie depuis la collecte d'échantillons orientés sur le terrain jusqu'aux analyses multi-méthode *in situ* en laboratoire.

# LE PARTENARIAT ARETHUSE-**GEORESSOURCES**



**3**

THÈSES CO-ENCADRÉES  
DEPUIS 2018

**+ 30**


PUBLICATIONS ET CONFÉRENCES  
EN COLLABORATION AVEC GEORESSOURCES  
DEPUIS 2015



**+10**

TRAVAUX DE RECHERCHE ÉTUDIANT  
CO-ENCADRÉS ET ACCUEILLIS CHEZ ARETHUSE



© Anne-Sylvie André-Mayer  Géologie de terrain en désert nord soudanais, février 2020

# LE PARTENARIAT ARETHUSE-GEORESSOURCES

ENTRE INDUSTRIE ET RECHERCHE

“ THEIA, CEST ICI QUE TOUT COMMENCE... ”



© Anne-Sylvie André-Mayer  
Ity, Côte d'Ivoire, Janvier 2023

**Valentine CHARVET**

▷ Doctorant CIFRE, Arethuse Geology-GeoRessources, 2024-2027

# LE PARTENARIAT ARETHUSE-GEORESSOURCES

UNE RECHERCHE COLLABORATIVE DEPUIS 2015

Le Laboratoire commun THEIA est le résultat de la rencontre du laboratoire GeoRessources et de la société Arethuse Geology, une PME fondée en 2010, tous deux dirigés par des anciens étudiants de l'Université de Lorraine, Anne-Sylvie André-Mayer et Rémi Bosc. Grâce à un financement de l'agence nationale de la recherche, les deux partenaires se donnent trois ans pour poser les bases d'un futur pôle d'excellence sur les mécanismes de formations des gisements métalliques en Arabie et en Afrique, ainsi que les méthodes de l'exploration minière de demain.



IL S'AGIT D'UN TRANSFERT DE TECHNOLOGIE ET DE  
COMPÉTENCES...

...TRAVAILLER EN R&D SUR CE SUJET NOUS OUVRE DE NOUVELLES  
OPPORTUNITÉS SUR LE PLAN SCIENTIFIQUE



Au travers de nombreux projets de recherche (masters, thèses, post-doctorats) ayant été valorisés par nombreuses publications, Anne-Sylvie et Rémi travaillent à fédérer les forces vives de la recherche en exploration minière pour pérenniser le LabCom THEIA sous la forme d'un consortium de recherche français au rayonnement international.



**ONT PARTICIPÉ À LA RÉALISATION DE  
CE FASCICULE**

Anne-Sylvie André-Mayer  
Christophe Ballouard  
Célestine Berthier  
Christophe Bonnetti  
Remi Bosc  
Jean Cauzid  
Valentine Charvet  
Aurélien Eglinger  
Julien Feneyrol  
Arnaud Fontaine  
Renan Furic  
Virginie Masson  
Julien Perret  
Hugo Watine

Et intervenants externes

**DIRECTEUR DE LA PUBLICATION**

Anne-Sylvie André-Mayer  
Rémi Bosc

**CONCEPTION**

Virginie Masson, Arethuse Geology

**IMPRESSION**

Imprimerie Centrale de l'Université de Lorraine,  
Décembre 2023

LabCom

THEIA

RESEARCH CONSORTIUM

