



Cartographie géologique pour le développement minier en Afrique de l'Ouest

La cartographie géologique constitue la base de la connaissance du sous-sol d'un pays. C'est à partir des cartes géologiques réalisées par des approches utilisant des concepts scientifiques évolutifs, appuyées par des moyens analytiques de plus en plus performants, que les États peuvent disposer d'informations permettant de stimuler les activités d'exploration, puis d'exploitation de leurs matières premières minérales et de contribuer ainsi au développement de leurs économies.

Depuis près d'un siècle, la recherche de gisements de ressources minérales a été le principal moteur des progrès de la connaissance géologique de l'Afrique de l'Ouest. En 1911, la première synthèse à l'échelle du 1/5 000 000 [Hubert (1911)] ignore de nombreuses *terrae incognitae*, mais donne déjà une répartition assez exacte entre socles et bassins sédimentaires. En 1948, une nouvelle édition de la carte géologique de l'Afrique au 1/5 000 000 est présentée lors du 18^e Congrès géologique international (IGC) de Londres, faisant suite aux recommandations du 13^e IGC de Bruxelles de 1922 (figure 1). Plus tard, les levés de l'administration coloniale française aboutissent à une couverture partielle de l'Afrique Occidentale à des échelles variant du 1/1 000 000 au 1/200 000. À partir des années 1970-1980, essentiellement dans le cadre de projets soutenus par la coopération française, cette couverture bénéficie de nombreux travaux « d'inventaires miniers » ou de recherche ; de nouvelles cartes sont publiées alors que d'autres sont largement révisées. En 1989, la carte des minéralisations aurifères au 1/2 000 000 publiée par le BRGM [Milési *et al.* (1989)], et la carte géologique internationale de l'Afrique éditée par l'UNESCO au 1/5 000 000, mettent provisoirement fin à cette phase active de la cartographie géologique de l'Afrique de l'Ouest.

Un regain d'intérêt pour la cartographie géologique de cette partie de l'Afrique se manifeste à la fin des années 1990, essentiellement grâce aux financements institutionnels multilatéraux. Entre 1990 et 2010, plusieurs projets de cartographie, souvent avec l'appui de levés géophysiques

AUTEURS



Hervé THÉVENIAUT
Responsable de l'Unité Géologie et
Cartographie des ressources des socles
Direction des Géoressources, BRGM
✉ h.theveniaut@brgm.fr



Denis THIÉBLEMONT
Géologue
Direction des Géoressources, BRGM
✉ d.thieblemont@brgm.fr

aéroportés, parfois accompagnés de géochimie exploratoire, sont ainsi réalisés grâce aux financements de la Banque islamique de développement, de la Banque mondiale, et surtout de l'Union européenne (Programme SYSMIN). Ces projets ont concerné de nombreux pays : Côte d'Ivoire (BRGM, 1990-1992 puis 1993-1995), Guinée (BRGM, 1998-1999 puis 2003-2004), Mauritanie (BGS, 2000-2003 ; BRGM, 2000-2008), Burkina Faso (BRGM, 2002-2004), Mali (BRGM, 2003-2006 puis 2007 ; GEOTER, 2006-2007), Ghana (CGS-BRGM-Geoman, 2006-2009), Sénégal (GEOTER-BRGM, 2007-2009 ; BRGM-GEOTER, 2008-2010). L'échelle des cartes est généralement le 1/200 000 et leur emprise le « degré carré » (soit 1° de longitude sur 1° de latitude). Des synthèses au 1/500 000 ou 1/1 000 000 sont souvent publiées à l'issue de ces travaux. Tous ces projets sont réalisés en collaboration avec les services géologiques locaux et sont accompagnés d'un transfert de compétences dans les différentes disciplines mises en jeu (géologie structurale, géochimie, géochronologie, géophysique, etc.).

Le secteur minier a un fort impact industriel dans les pays en développement. Outre l'apport de devises, l'ouverture d'une mine constitue une source d'emplois et un facteur d'amélioration des infrastructures. L'objectif de ces nouvelles cartes géologiques a été principalement de faciliter la mise en valeur des ressources minérales des pays concernés et, de ce point de vue, les progrès apportés par les travaux réalisés entre 1990 et 2010 se sont avérés pertinents, si l'on en juge par le nombre de découvertes de gisements de différentes substances, puis de l'ouverture de mines qui ont suivi.

Une discipline en constante évolution

Tout en cherchant à stimuler l'investissement industriel, les cartes géologiques à vocation d'inventaire minier sont des réalisations scientifiques répondant à des critères d'évaluation précis. Fondamentalement, une carte géologique est une représentation ordonnée du sous-sol fondée sur des concepts scientifiques et dont la réalisation repose sur la reconnaissance des « entités » constitutives du sous-sol, la détermination de leur répartition géographique et de leurs rapports mutuels. Ainsi, une carte géologique comprend une légende qui inventorie et décrit les formations, une représentation qui donne la projection de ces formations sur la surface topographique et des coupes qui en décrivent l'organisation en profondeur.

Le travail de terrain est rarement facile ; le géologue doit répondre à de multiples questions scientifiques et mener une enquête patiente et minutieuse afin que toutes les données recueillies et leurs interprétations s'articulent de façon cohérente. Dans ce travail, les méthodes analytiques (géochimie, géophysique, datations isotopiques...) prennent de plus en plus d'importance. Ainsi, la prise d'informations et d'échantillons sur le terrain n'est que

FIGURE 1 / Extrait de la carte géologique internationale de l'Afrique à 1/5 000 000 de 1948 (de Margerie *et al.*, 1948).

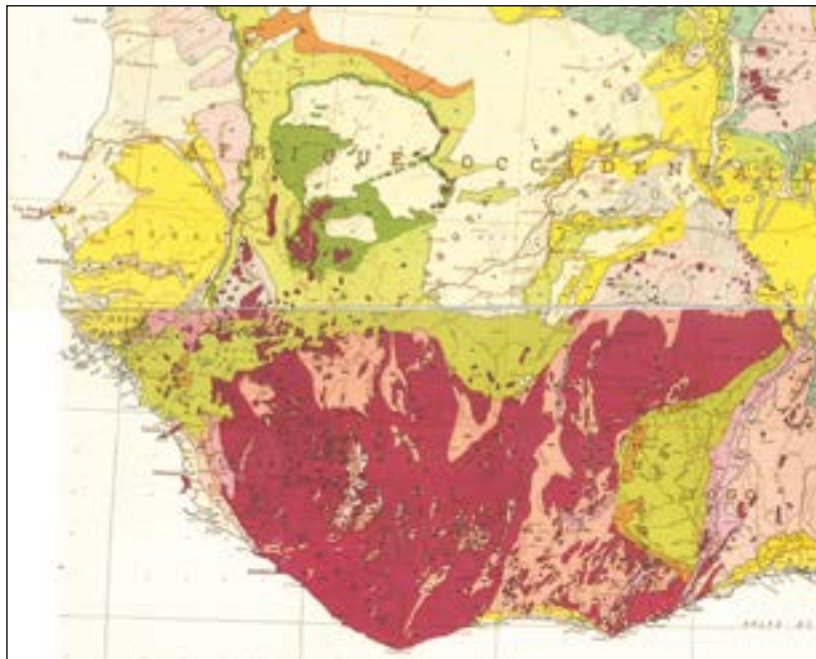


FIGURE 2 / Extrait de la nouvelle carte géologique de l'Afrique à 1/10 000 000 (Thiéblemont *et al.*, 2016), à comparer avec celle de la figure 1. © CCGM-BRGM

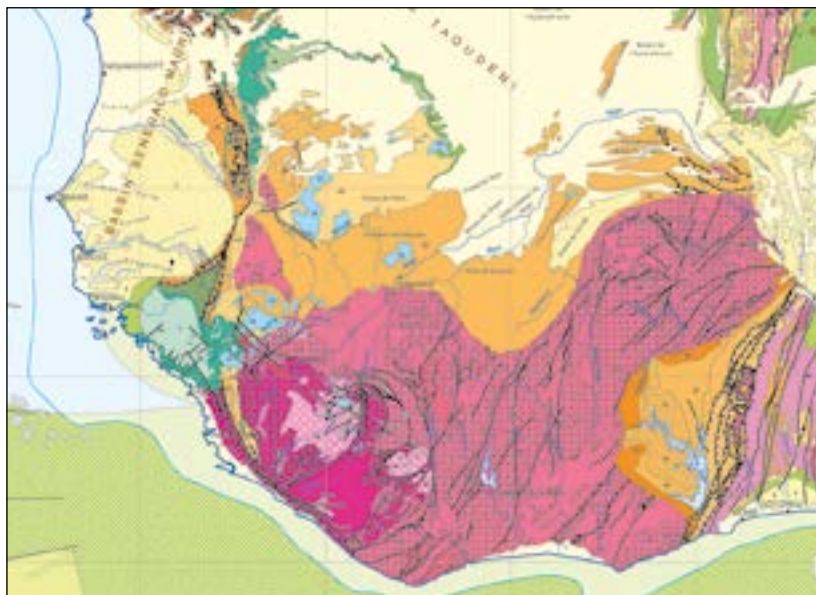


PHOTO 1 / Affleurements volcano-sédimentaires de la rivière Birim au Ghana, à l'origine du terme « Birimien » donné à l'ensemble des formations du Paléoprotérozoïque d'Afrique de l'Ouest. © H. THÉVENIAUT, 2008

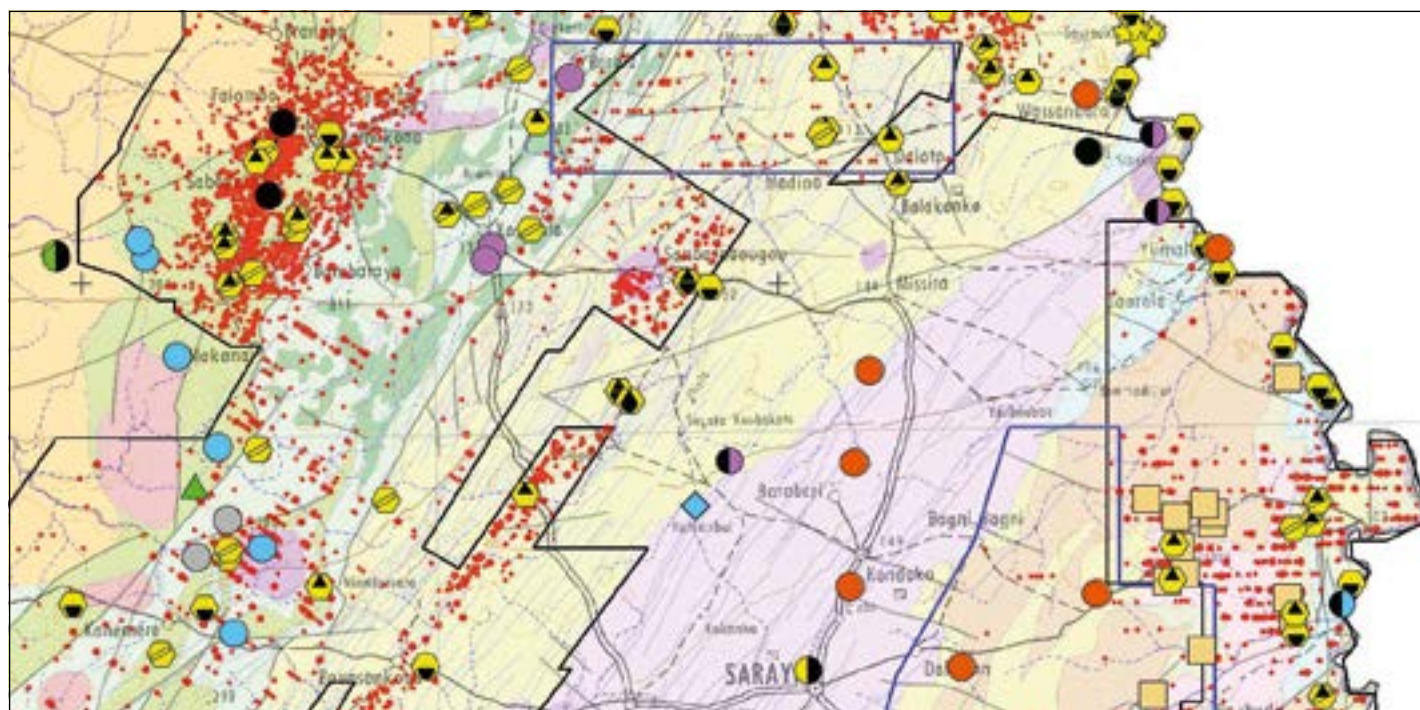


FIGURE 3 / Extrait de la « carte gîtologique et abondance or » du Sénégal oriental (Morisseau *et al.*, 2010). © CCGM-BRGM

l'un des éléments de la chaîne qui associe un ensemble de spécialistes et d'outils allant du plus simple au plus complexe. Néanmoins, le travail de terrain, la rigueur et l'intuition du géologue constituent toujours le socle de la connaissance.

Aujourd'hui, la carte géologique est totalement informatisée et est intégrée dans un système d'information géographique (SIG) qui donne accès à l'ensemble des données géologiques sous forme de « couches » séparées et superposables. La résolution ou précision de cette information est dépendante de l'échelle. Au 1/1 000 000, une formation géologique affleurant sur le terrain sur une largeur de 100 m représente 1/10^e de millimètre sur la représentation cartographique qui en est faite, soit un trait à peine perceptible, alors qu'au 1/1 000 la même formation est figurée par une bande de 10 cm de large. Une carte au 1/200 000 est donc peu apte à rendre compte de la géométrie de gisements dont la surface est rarement supérieure à la centaine de mètres, mais elle reste indispensable à la détection d'indices minéraux et à la compréhension des relations entre les différentes formations dont certaines sont connues pour contenir des gisements potentiels de ressources minérales.

L'objectif des cartes géologiques n'est donc pas uniquement de déterminer les contours des formations et d'y localiser des gisements, mais surtout de rendre compte de

l'organisation du sous-sol. Sur ce point, le renouvellement de la cartographie est fondamental et correspond aux attentes des institutions internationales qui financent les programmes d'infrastructure géologique : c'est en retournant sur le terrain que l'on peut actualiser les données et les mettre en phase avec l'évolution des techniques et des concepts géologiques.

Concepts métallogéniques

L'étude des gîtes minéraux procède de la science de la métallogénie (ou gîtologie) et consiste à superposer sur les SIG une couche d'information spécifique qui comprend l'ensemble des gîtes minéraux connus dans la zone d'emprise de la carte. Ces gîtes minéraux sont des indices qui deviennent des gisements quand une masse significative de métal économiquement exploitable est mise en évidence, et des mines lorsque le gisement est exploité industriellement.

Cette exploitation dépend aussi de paramètres économiques (niveau des cours des matières premières), ou sociaux et politiques qui en déterminent la rentabilité.

Le statut d'indice ou de gisement d'un dépôt minéralisé dépend de plusieurs paramètres, qui ne sont pas uniquement liés à l'évolution des connaissances. L'amélioration des techniques et des process d'exploitation, mais aussi, la loi du marché, influencent fortement la filière minière :

les gisements d'aujourd'hui n'étaient souvent hier que des indices, voire des affleurements considérés sans intérêt. Ainsi, pour l'or, les cibles minières d'avant 1975 contenaient plus de 10 tonnes d'or avec une teneur d'au moins 10 g/t (gisements dits de « faible tonnage et forte teneur »); aujourd'hui, l'or exploitable, en raison notamment de la valorisation très importante de son cours, ne représente parfois que quelques g/t dans des gisements dits de « fort tonnage et basse teneur ».

Ces changements ont modifié les paramètres pris en compte dans les cartes géologiques. Dans le cas de gisements à basse teneur, l'or peut ne pas être visible mais être présent dans des « halos » (zones portant la trace d'altérations chimiques des roches), qui traduisent l'activité de fluides chauds dits hydrothermaux (eau + divers éléments chimiques : chlorures, sulfates...) ayant circulé et transporté le métal précieux. L'identification de ces halos sur la carte est donc indispensable, même si l'or n'y a pas été directement observé. Ainsi, la carte d'aujourd'hui inclut la description des occurrences minéralisées, mais aussi un ensemble d'informations pertinentes quant à l'existence de tel ou tel type de gisement.

Les cartes inventorient les gisements et indices qu'elles placent dans une couche propre. Cette information (*figure 3*) porte sur le type, la forme, la taille économique et la géométrie des gisements et, plus exceptionnellement, sur leur place dans l'histoire géologique.

La définition de la typologie d'un gisement découle de l'observation d'un certain nombre de caractères, à la fois lithologiques (nature des roches), géométriques, morphologiques... Des amas massifs de minéraux sulfurés (principalement de la pyrite et de la chalcoppyrite) associés à certaines roches volcaniques sous-marines sont ainsi attribués au type dit VMS (*volcanogenic massive sulfide*), exploité pour le soufre et les métaux de base, mais qui présente également de fortes potentialités pour l'étain ou l'or.

La morphologie d'un gisement participe à la définition de son type, mais aussi de son volume. Un gisement peut être filonien, stratiforme (amas intercalé entre des couches géologiques), disséminé (substance minérale « imprégnant » un substrat rocheux), etc. La taille économique d'un gisement peut être grande, moyenne ou petite, en relation avec les conventions des lexiques internationaux. La géométrie du gisement définit la dimension et le mode d'exploitation. L'étude détaillée de l'extension du gisement en profondeur, de son inclinaison, de la présence de failles..., détermine sa rentabilité.

La détermination de la position d'un gisement en relation avec l'histoire géologique régionale, consiste à l'attribuer à un « événement minéralisateur » qui témoigne d'un processus géologique particulier : intrusion d'un certain type de granite, jeux de fracturation selon certaines directions...

Ces informations sont stockées dans des bases de données qui renseignent le nom du gîte et sa description. La maintenance de ces bases suppose une actualisation permanente des informations et une adaptation des architectures numériques en fonction de l'évolution des logiciels informatiques.

Cartes géologiques et ressources minérales

Les cartes géologiques modernes distinguent des couches et structures particulières (dites « à valeur métallifère » ou « métallotectes ») dont l'étude a révélé l'association privilégiée avec des minéralisations. La représentation de ces métallotectes enrichit la carte géologique et en matérialise les potentialités métallifères. Leur définition dépend étroitement de l'expertise des gîtologues et des concepts métallogéniques utilisés.

L'identification de zones à potentiel métallifère nécessite de modéliser les paramètres géologiques, gîtologiques, géophysiques et géochimiques associés aux métallotectes et contrôlant la répartition de gîtes déjà connus. Mais il faut également extrapoler ces paramètres à l'échelle de la carte afin d'identifier des zones analogues.

La modélisation consiste à établir une combinaison d'éléments appartenant à différentes couches d'information et permettant de discriminer une zone minéralisée, lui conférant ainsi une signature propre. L'extrapolation consiste à rechercher cette signature dans des zones sans gisement connu, ce qui nécessite des outils informatiques permettant la gestion des données géographiques, et de croisement de ces données, ainsi qu'une solide expertise gîtologique.

L'expert définit les procédures de traitements, sélectionne, quantifie les critères à prendre en compte et valide les résultats en tenant compte des limitations méthodologiques. Les résultats dépendent de l'échelle; une approche au 1/200 000 permet de révéler des secteurs favorables au lancement d'une campagne d'échelle « stratégique » (maille de recherche de l'ordre du km²); en revanche, l'implantation d'un sondage procède d'une approche « tactique » dont l'échelle d'application est celle du gisement (au plus le 1/1000).

Plus généralement, les résultats obtenus par les traitements multicritères témoignent du contrôle étroit exercé par les paramètres strictement géologiques sur les minéralisations et fondent la notion de « marqueur à valeur métallifère ». Parallèlement, l'analyse de l'histoire géologique permet d'attribuer une signification dynamique aux marqueurs en les rattachant à un environnement géologique particulier.

« Les cartes géologiques à vocation d'inventaire minier sont des réalisations scientifiques répondant à des critères d'évaluation précis »

► LE GÎTE D'OR DE YATELA (SUD-OUEST MALI) : UN ENRICHISSEMENT SUPERGÈNE EN OR DANS UN KARST SUPERFICIEL

L'Afrique de l'Ouest doit l'essentiel de ses richesses minérales à son socle précambrien d'âge paléoprotérozoïque, communément connu comme le « Birimien ». À partir de 200 Ma et l'ouverture subséquente de l'océan Atlantique, des processus d'altération météorique ont joué un rôle essentiel dans la concentration de certaines des ressources minérales telles que les chapeaux de fer, les bauxites, ou encore les karsts minéralisés. Les roches carbonatées birimiennes, par exemple, qui affleurent rarement, ont été affectées en de nombreux endroits par des phénomènes de dissolution météorique : c'est le cas du karst de Yatela.

Le gisement aurifère de Yatela est situé dans le nord de la Fenêtre de Kédougou-Kénieba dans le sud-ouest du Mali. Il s'est formé dans des calcaires birimiens au contact avec une intrusion dioritique. Le socle birimien est recouvert de façon discordante par les grès de Seroukoto d'âge néoprotérozoïque. La minéralisation primaire, composée de pyrite, de chalcopryrite et d'arsénopyrite, est essentiellement portée par des carbonates dolomités [Masurel et al. (2016)]. Le minerai supergène est lié à une large surface de karstification (dolines

coalescentes jusqu'à 220 m de profondeur) avec remplissage stratifié [Hanssen et al. (2009) ; figure]. De la base vers le sommet de ce dernier, on distingue quatre unités :

- 1 / une unité basale ferrugineuse, pulvérulente, sableuse à argileuse, contenant des éléments lithiques birimiens et néoprotérozoïques. Ces derniers incluent du quartz filonien, des roches carbonatées, de la saprolite dérivée de la diorite, ainsi que des fragments de grès de Seroukoto. Cette unité porte le minerai d'or supergène du gisement de Yatela ;
- 2 / une épaisse unité à sables, souvent grossiers avec de très abondants blocs angulaires de taille variable (jusqu'à plusieurs dizaines de mètres) provenant des grès de Seroukoto. Ces blocs de grès ont subi les processus d'altération superficielle et se désagrègent facilement ;
- 3 / une unité de sable fin, dérivée des mêmes grès de Seroukoto, qui alterne avec des lits à pisolithes latéritiques et d'autres fragments de cuirasse latéritique. Les lits latéritiques supérieurs sont subhorizontaux tandis que les lits inférieurs montrent un pendage grandissant vers le centre des dolines. Ceci suggère un sous-tirage vers

le bas du remplissage au cours de la dissolution karstique, suggérant le remplissage progressif des dolines au cours de leur approfondissement ;

- 4 / des alluvions à éléments lithiques grossiers (pisolithes, fragments de cuirasse latéritique et grès de Seroukoto) organisés en chenaux qui se recourent.

Par le jeu de dissolution/concentration lors de l'altération karstique, l'unité basale ferrugineuse s'est enrichie en or à l'aplomb de la minéralisation primaire sub-économique. La minéralisation supergène à teneurs en or économiques correspond au résidu de dissolution provenant de roches carbonatées faiblement minéralisées. Yatela est donc un gisement atypique qui, de par sa nature, représente une cible d'exploration cachée. —

Eric HANSSEN

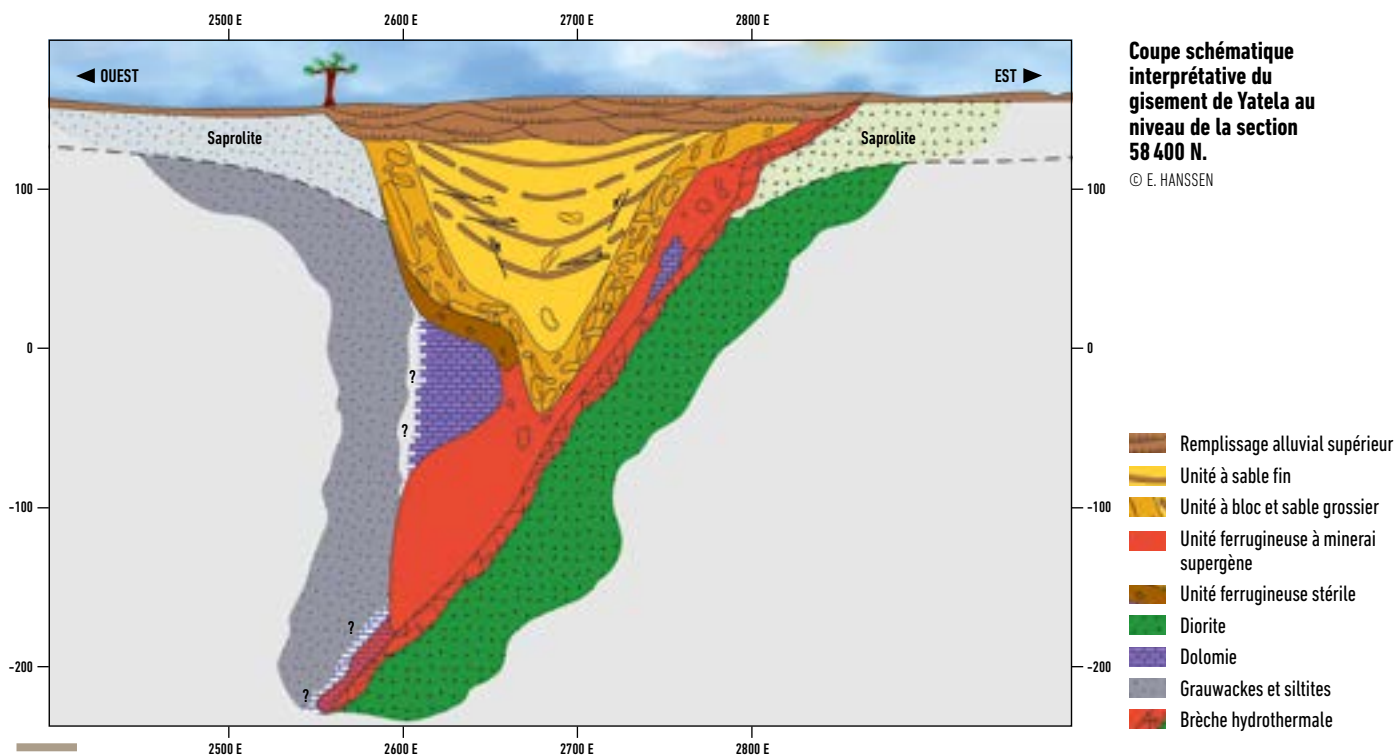
Legend Gold Exploration Manager
✉ ehanssen@legendgold.com

Sam TESSOUGUE

Regional Exploration Manager, SEMOS S.A., Bamako, Mali

Jean KAISIN

Mine Manager, Société Minière de la Vallée du Fleuve Sénégal, Dakar, Sénégal



BIBLIOGRAPHIE

Hanssen, E., Tessougue, S., et Kaisin, J., (2009) - The Yatela gold deposit, Western Mali, supergene enrichment of primary gold mineralization in a surficial karst. Présentation Journée Minière et Pétrolière du Mali, Bamako, 31 mars 2009. Masurel, M., Miller, J., Hein, K., Hanssen, E., Thébaud, U., Ulrich, S., Kaisin, J., et Tessougue, S., (2016) - The Yatela gold deposit in Mali, West Africa: the product of a long lived history of hydrothermal alteration and weathering. African Journal of Earth Sciences 113, pp. 73-87.