



First evidence of epithermal gold occurrences in the SE Afar Rift, Republic of Djibouti

Nima Moussa Egueh^{*}, ^{1, 2, 3}, Yves Fouquet¹ (1), Bernard Le Gall³, Antoine Marie Caminiti³, Joël Rolet², Marcel Bohn¹, Joël Etoubleau¹, Christophe Delacourt³

¹IFREMER, Centre de Brest, BP 70 - 29280 Plouzané, France

²Université Européenne de Bretagne, Université de Brest, CNRS, UMR 6538 Domaines Océaniques, IUEM, Place N. Copernic, 29280 Plouzané, France

³IST, Centre d'Etude et de Recherche de Djibouti (CERD), BP 486, Route de l'Aéroport, Djibouti

*Correspondance, courriel: nima.moussa.egueh@ifremer.fr

Abstract

The geology of the Republic of Djibouti, in the SE Afar Triangle, is characterized by intense tectonic and bimodal volcanic activity that began as early as 25–30 Ma. Each magmatic event was accompanied by hydrothermal activity. Mineralization generally occurs as gold–silver bearing chalcedony veins and is associated with felsic volcanism. Eighty samples from mineralized hydrothermal chalcedony, quartz ± carbonate veins and breccias were studied from ten sites representing four major volcanic events that range in age from early Miocene to the present. The most recent veins are controlled by fractures at the edges of grabens established during the last 4 Myr. Gold in excess of 200 ppb is present in 30% of the samples, with values up to 16 ppm. Mineralogical compositions allowed us to identify different types of mineralization corresponding to different depths in the hydrothermal system: (1) surface and subsurface mineralization characterized by carbonate chimneys, gypsum, silica cap and quartz ± carbonate veins that are depleted in metals and Au; (2) shallow banded chalcedony ± adularia veins related to boiling that contain up to 16 ppm Au, occurring as native gold and electrum with pyrite, and tetradymite; (3) quartz veins with sulfides, and (4) epidote alteration in the deepest hydrothermal zones. Samples in which pyrite is enriched in As tend to have a high Au content. The association with bimodal volcanism, the occurrence of adularia and the native Au and electrum in banded chalcedony veins are typical of epithermal systems and confirm that this type of mineralization can occur in a young intracontinental rift system.

Key words: Republic of Djibouti, Epithermal System, Gold, Afar Rift

Nima Moussa Egueh

Résumé

L'étude portée sur des échantillons minéralisés provenant de la partie SE du rift Afar a montré une activité hydrothermale associée aux évènements magmatiques qui ont marqué l'ouverture du rift Afar depuis 30 Ma jusqu'à l'actuel. Les minéralisations à Au-Ag dans les veines calcédonieuses sont associés au volcanisme acide. L'or présent à plus de 200 ppb dans 30% des échantillons avec des valeurs supérieures à 16ppm ; est associé à des filons de quartz calcédonieux rubanés contrôlés par des failles majoritairement synrift (< 4 Ma). Les brèches hydrothermales minéralisées également associées à ces grandes structures sont minéralisées en pyrite arsénifères. Les compositions minéralogiques ont permis l'identification de minéralisations correspondant à différentes profondeurs du système hydrothermale du rift à Djibouti. Ainsi quatre principales zones de minéralisations et d'altérations hydrothermales ont été définies : il s'agit (1) d'une zone de surface ou de subsurface caractérisée par des cheminées de carbonate, de veines de gypse et de silice fine dépourvue d'or; (2) d'une zone de faible profondeur caractérisée par du quartz calcédonieux rubané associés à des veines d'adulaire enrichis en or, électrum et pyrite; (3) d'une zone de sulfures primaires associés au quartz massif et (4) d'une zone à épidote correspond à la plus profonde zone hydrothermale. Les échantillons dont la pyrite est enrichie en As correspond à des échantillons dont la teneur en Au est élevée. L'association d'or natif, d'électrum et de tellures dans des veines de quartz calcédonieux sont typiques d'un système de type épithermal neutre.

Mots -clés : République de Djibouti, Systèmes épithermaux, Or, Rift Afar

1. Introduction

L'activité hydrothermale est bien connue dans le Rift Est Africain et l'inventaire des minéralisations hydrothermales a été réalisée le long de certains segments de la vallée axiale du rift kenyan (Muller et Ftrstner 1973, Tiercelin 1991) et éthiopien (Tadesse et al. 2001). En parallèle, très peu de travaux ont été menés pour évaluer le potentiel du rift à Djibouti en terme de minéralisations hydrothermales. Ce dispositif exceptionnel n'a été étudié jusqu'à présent que d'un point de vu structural, pétrochimique et géophysique. Aucune étude métallogénique n'a été menée à ce jour au niveau du complexe du rift Afar à part quelques travaux d'inventaire minéralogiques entamés par Dreyfus (1928; 1929), De La Rue (1937; 1938), Baiserie (1939; 1946), Cheymol (1961) et enfin Caminiti depuis 2007. Notre étude constitue la première approche consacrée aux processus hydrothermaux associés au rifting Afar. L'objectif de ce travail porte sur la caractérisation de minéralisation hydrothermale et la compréhension des processus minéralisateurs associés aux différents épisodes de rifting à Djibouti.

2. Contexte géologique

La République de Djibouti est située dans la partie Sud Est du Triangle Afar (Fig. 1) dont la structure résulte de la convergence de trois segments de rift actifs (Golfe d'Aden, Mer Rouge, Rift Est Africain au Sud) à travers une province magmatique initiée vers 30 Ma lors de la mise en place d'un complexe de traps basaltiques (Ethiopie et Yémen) en réponse à la remontée du panache mantellique Afar. Durant ces 30 Ma, le processus de rifting Afar s'est soldé par divers évènements magmatiques syntectoniques (Barberi & Varet 1977). La République de Djibouti est caractérisée par un volcanisme bimodal. Les formations volcaniques rencontrées ci-dessous sont liées à l'histoire de la dépression Afar (Fig.1) :

- Les basaltes anciens d'Ali Sabieh (26,7 et 19,7 Ma) discordants sur les roches sédimentaires du Jurassique et du Crétacé, ils affleurent en grande majorité dans la région d'Ali Sabieh.
- Les rhyolites Mablas (14 à 9,6 Ma) formées de coulées épaisses et très altérées. Elles sont synchrones de l'ouverture du Golfe d'Aden.

Nima Moussa Egueh

- La série du Dalha (8,9 à 3,6 Ma) qui représente des traps basaltiques (>1000m) discordants sur les rhyolites des Mablás.
- La série acide de Ribta (4,6 à 3,3 Ma) localisée dans la région d'Arta et au Nord de Tadjourah qui annonce l'ouverture du Golfe de Tadjourah.
- Les basaltes stratoïdes (3,8 à 0,7 Ma) qui forment une puissante série de traps qui recouvrent la presque totalité de la dépression qui sont l'expression magmatique de la propagation du rifting à travers le Triangle Afar.
- Les basaltes initiaux (2,7 à 0,5 Ma) associés à l'ouverture du Golfe de Tadjourah.

Les séries basaltiques axiales : ce sont les plus récentes (0,3 Ma à l'actuel), elles occupent le rift d'Asal et le Manda Inakir, le volcanisme fissural est de type océanique.

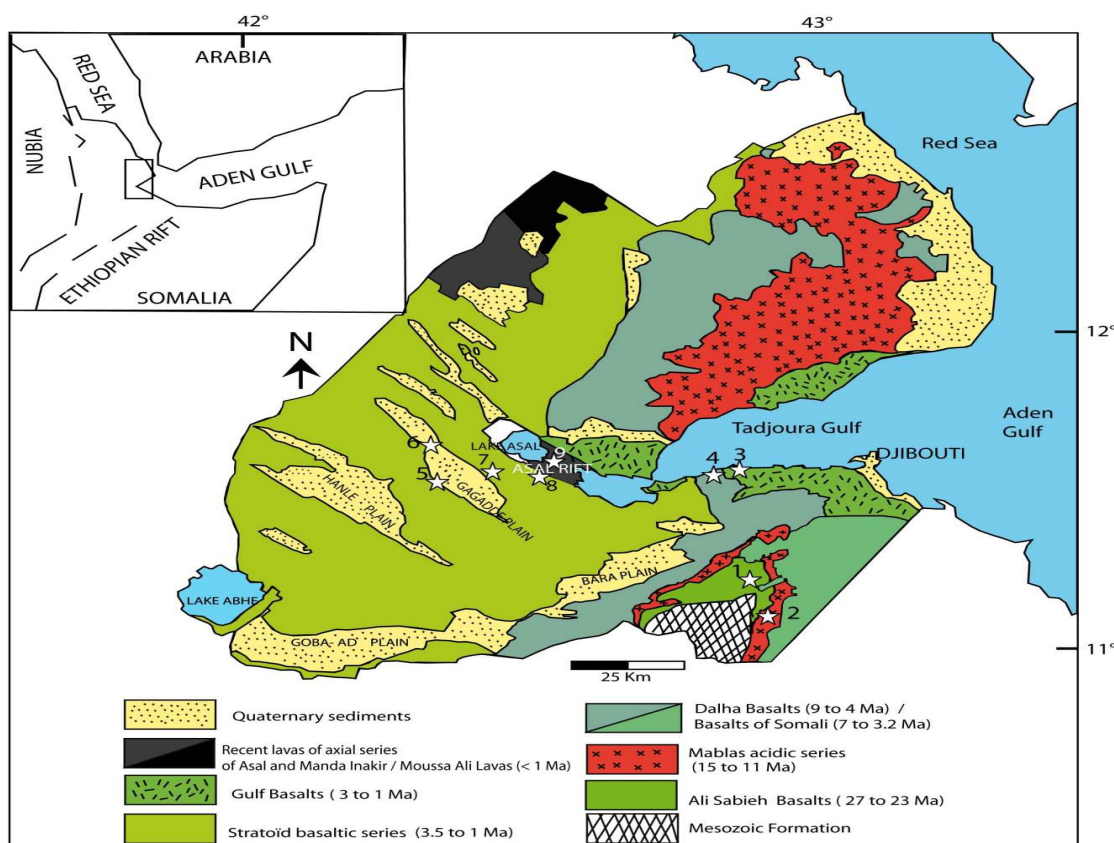


Fig. 1 carte géologique de la République de Djibouti (d'après Vellutini and Piguët (1994)). Les étoiles blanches correspondent aux sites hydrothermaux étudiés dans ce travail. 1 Da'asbiyo 1 and Da'asbiyo 2, 2 Ali Addé, 3 Arta, 4 Arta-Plage, 5 Garrabayis, 6 Babba Alou, 7 Hes Daba, 8 Asa Leyta, 9 Asal

Le secteur d'Ali Sabieh expose les séries magmatiques les plus anciennes du Triangle Afar.

Il s'agit des basaltes d'Ali Sabieh (28-19 Ma) et ou des rhyolites Mablás (14 à 9,6 Ma)

impliquées dans la structure anticlinale d'Ali Sabieh (Le Gall et al., 2011). L'antiforme d'Ali Sabieh montre des facies très altérés de basaltes (vacuolaires) truffés de veines de quartz et d'épidote qui s'étend sur une distance de 300 m. Des minéraux secondaire comme les zéolites, la céladonite et la calcite remplissent les fissures.

Minéralisations associés aux Rhyolites acide Mablas (15-11 Ma)

Le site hydrothermal d'Ali Addé est exposé dans les premiers reliefs qui séparent, à l'est, la ride topographique armée par les coulées rhyolitiques Mablas (15-11 Ma), faiblement inclinées vers l'est, et à l'ouest, la dépression occupée par les séries volcano-sédimentaires du complexe d'Ali Sabieh (Le Gall et al. 2011). Les rhyolites sont caractérisées par deux types de minéralisations : (1) des veines de quartz de plus d'un mètre d'épaisseur qui s'étend sur plus 50 m dont la composition minéralogique est reprise dans la figure 2. La concentration moyenne de l'or est de 2.3 ppm avec un maximum de 5 ppm. Les analyses à la microsonde électronique ont montré que la pyrite était enrichie en arsenic (> 1 %).

(2) Du quartz bréchique du site Da'asbiyo 2 localisé au Sud de Da'asbiyo 1 associé à une faille près d'un dyke basique. La brèche contient des fragments de roche encaissante et de ciment minéralisé. La pyrite est prédominante dans les veinules de la brèche. Les brèches sont très peu minéralisé en Au (< 6 ppb).

Minéralisations associés à la série Ribta (4-3 Ma) et la série du Golfe (3-1 Ma): Arta et Arta Plage

Secteur Arta

Le site hydrothermal d'Arta se situe dans un contexte magmatique et structural atypique vis-à-vis de l'organisation de l'ensemble du rift Afar à Djibouti. La zone d'Arta forme un couloir NS, d'environ 15 km de large, le long duquel sont exposées des séries volcaniques anciennes, antérieures aux Basaltes Stratoïdes (3-1 Ma). C'est dans les facies acides Ribta que l'hydrothermalisme s'exprime de façon privilégié *via* un cortège plus ou moins dense de filons minéralisés d'épaisseur variant de 1-2 m à quelques centimètres, qui s'étend sur une distance d'environ 2 Km, et dont la direction est relativement bien réglée, comprise entre NS

et N160°E. Ces veines sont composées de calcédoine, de brèches et de sulfures. L'or (16 ppm) est associé aux veines calcédonieuses. Le quartz massif et les brèches sont minéralisés en pyrite et contiennent peu d'au (101 ppb). Les analyses effectuées à la diffraction aux Rayons X et à la microsonde électronique ont montré la présence d'adulaire dans les veines de calcédoines. L'or natif (90% Au), l'électrum (<70% Au, <40 % Ag) et l'argentite (<85% Ag, <15% S) sont enrichis dans les veines rubanées (Fig. 3, 4). La pyrite est le minéral le plus abondant et n'est pas enrichi en As. La calcite lamellaire a été observée dans les veines de calcite.

Secteur Arta Plage

Situé au NNE d'Arta sur les rives du Golfe de Tadjourah, les intrusions acides (Formation Ribta) et la série inférieure des basaltes stratoïde ont subi une altération intense. Les basaltes sont tiltés. Deux types de minéralisations ont été observés dans ce secteur : (1) des veines de calcédoine, de quartz massif, de carbonate, de gypse et la limonite dans les rhyolites Ribta. Dans le quartz massif, la concentration en Au est de 33 ppb. Le gypse forme un stockwerk dans les roches volcaniques altérées. (2) Un système de fumerolles fossiles forme des monts de gypse, alignés de 20 mètres de diamètre et d'une dizaine de mètres de haut. Le gypse forme également un dense stockwerk. La densité des veines de gypse diminue vers l'extérieur des monts. Des brachiopodes ont été observés dans certains niveaux d'un affleurement de la première zone à gypse. Ce secteur comporte quelques filons calcédonieux (Au = 352 ppb) et de calcite à la base et au sommet des monts. Les brèches polygéniques (Au = 95 ppb) associées au gypse pourraient témoigner de la présence d'un ancien lac asséché.

Minéralisations associés aux basaltes Stratoïde (3.3-1 Ma) : Babba Alou, Garabbayis et Hes Daba

Secteur Babba Alou

Le massif de Babba Alou, haut de 1000 m est composé de deux facies intrusives et effusives avec des roches mafiques et des roches volcaniques felsiques. Les coulées de lave sont intensément altérées (Gasse et al. 1987). Un stockwerk de gypse coupe les roches felsiques. Des brèches contenant des grains de pyrite sont en contact avec les intrusions felsiques

(Fig.2). Elles s'étendent sur 100 m. Des géodes de quartz et de calcite sont également présentes.

Secteur Garabbayis

Ce site est situé en bordure méridionale Est de la plaine de Hanlé. La plaine de Hanlé est l'une des dépressions qui sépare le Lac Abhé du Rift d'Asal (Gasse et al., 1987). Ce secteur est caractérisé par une zone altérée située dans un croisement de failles montrant des fumerolles à fortes odeurs de soufre, situées le long d'une faille normale de direction N30, recoupant une faille de direction N120. L'altération hydrothermale s'effectue sur cette direction, des concrétions carbonatées et du gypse récent se déposent en surface (Fig. 2). Les basaltes sont altérés en argile de couleur rouge ocre et verte et sont recoupés par un stockwerk de calcite ou de veines oxydées. Des cheminées de carbonates sont observées dans le même secteur. Un dôme de direction NW-SE est constitué de la base au sommet des grès et sédiments silicifiés (Au = 143 ppb), des veines siliceuses minéralisées de direction N110°E, de brèches (Au = 123 ppb) et de filons de calcite tardive de direction N10°E. Ces sédiments silicifiés peuvent avoir une relation directe avec le lac asséché observé dans la plaine

Secteur Hes Daba

Le site se situe sur le flanc occidental d'une ride, orientée NW-SE, séparant les fossés de Gaggadé à l'ouest et d'Asal, à l'est. Cette ride asymétrique comprend un système de horsts et grabens de second ordre, limités par un réseau de failles normales, parallèles à l'axe du rift, impliquant, pour l'essentiel, la série des basaltes Stratoïdes. Quelques unités basaltiques, de dimension restreinte et en position basse, pourraient appartenir à la formation, plus jeune, des basaltes du Golfe, mis en place dans des paléo-dépressions. Les zones minéralisées se développent le long de filons siliceux de direction axiale au N140°E, concentrés dans 4 zones parallèles. D'une épaisseur moyenne de 60 cm, les veines minéralisées (chalcopryrite, sphalérite, pyrite, galène, hessite, pyrrhotite, hématite et magnétite) se poursuivent sur des distances >100 m (Fig.2). Leur remplissage est polyphasé et comprend, au cœur de la veine, du quartz massif, peu minéralisé, et du quartz calcédonieux rubané, tandis que les épontes sont soulignées par des brèches, enrichies en sulfures (bornite, digénite, covellite, marcassite, chalcocite, cuivre et argent natif et goéthite). L'or (Au = 16 ppm) est de façon préférentielle dans les veines rubanées. Des veines carbonatées dépourvues de sulfure et d'or sont présentes.

Minéralisations associés aux séries axiales (< 1 Ma) : Asal et Asa Leyta**Rift d'Asal**

Le secteur du Lac Asal renferme les expressions les plus récentes du rifting Afar, il s'agit de manifestations magmatiques (série basique et acide stratoïde) soit de structures d'ensemble hydrothermales (sources, fumerolles, cheminées). Les forages géothermiques montrent des températures allant jusqu'à 350°C pour des profondeurs de l'ordre de 2000m (D'Amore et al., 1998). Les assemblages minéralogiques présentent les faciès suivant de la surface vers les zones profondes: (1) des basaltes non altérés à 250 mètre ; (2) une zone à smectite entre 250 et 600 m ; (3) une zone silicatée à épidote, prehnite, adulaire, pyrite, chlorite, pyroxènes et grenat entre 850 et 1300 m; (4) une zone à silicate-Ca à amphibole, clinopyroxène et grenat à 2013 m (D'Amore et al., 1998). Des minéraux sulfurés (galène, pyrite) ont été découverts à 850 m de profondeur (D'Amore et al., 1998). Cette zonation est très similaire à celle des systèmes géothermiques (Henley et Ellis 1983; Hedenquist et al., 2000; Simmons & Browne 2000).

Secteur Asa Leyta

Ce site situé au niveau d'un grand massif volcanique acide, mis en place au sein de la série des basaltes Stratoïdes, exposés sur le flanc occidental du rift Asal. Une incision étroite, recoupant l'ensemble du complexe volcanique acide selon un azimuth NNE-SSW, orthogonalement aux structures, fournit une coupe structurale complète de l'ensemble du dispositif sur une longueur d'environ 2 km (cf. papier). Cette coupe expose 3 compartiments tectoniques, limités par des failles normales, d'échelle régionale, de direction axiale N140°E. Deux types de faciès minéralisés sont présents. Il s'agit de : (i) gypse \pm anhydrite, développé sous forme de stockwerks, à la fois, dans les sédiments lacustres jeunes et dans les volcanites acides. Ces minéralisations témoignent de la présence d'un environnement superficiel de type lacustre ; (ii) de calcédoine et/ou calcite présente au sein des volcanites, le long de systèmes de fractures orientées N130-140°E. Trois types d'association minéralogiques sont recensés : (i) il s'agit de la calcédoine, avec ou sans adulaire, et pyrite disséminée, complétée par des phases secondaires à goethite et calcite; (ii) de brèches pyriteuses à goethite, cimentées par une calcite tardive parfois pseudomorphosé par le quartz; et (iii) calcite sous forme de filons

Fig. 2: Paragenèse observée dans les différents sites hydrothermaux

Fig. 3: Image de répartition de l'or, l'argent, du soufre et du cuivre dans un grain d'or (quartz calcédonien rubané d'Arta). Notons les zonalités et la présence d'une inclusion sur un même grain (A, B, C, D).

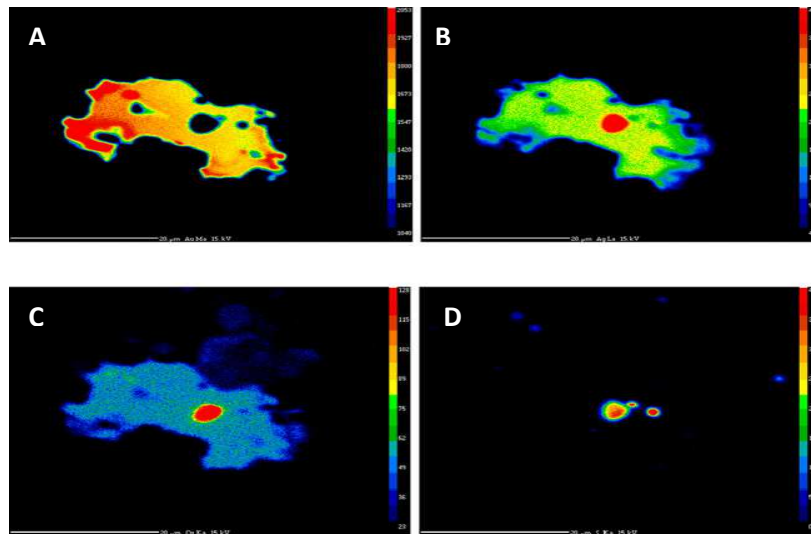


Fig.4: Veines de quartz calcédonieux minéralisés en Au à Arta. A) – Stockwerk de veines de quartz dans un encaissant acide. B) – Brèche minéralisée. C) – quartz calcédonieux rubané possédant des couches à adulaire enrichis en Au. D) – Or natif, argentite et électrum dans le quartz calcédonieux rubané.

3. Discussion

Sur la base des observations géologiques, minéralogiques, trois types d'altération hydrothermaux ont été distingués.

- (1) Une altération hydrothermale intense caractérise les formations d'Ali Sabieh (28-19 Ma). Les minéraux présents sont l'épidote, le quartz et des minéraux secondaires comme les zéolites (heulandite et mordénite), la céladonite et la calcite. L'épidote est connue pour être stable au-dessus de 200-240°C tandis que les zéolites sont stables à < 220°C (Henley and Ellis, 1983 ; Reyes 1990). La céladonite est un indicateur de basse température (< 30°C) (Gallahan and Ducan 1994). Dans les forages géothermiques du rift d'Asal, l'épidote a été observée entre ~850 et 1300 m, où la température mesurée était proche de 265°C (D'Amore et al., 1998). La présence d'épidote dans les roches anciennes très altérées d'Ali Sabieh pourrait représenter le niveau hydrothermalisé le plus profond. La présence de minéraux de basse température pourrait être expliquée par des circulations tardives de fluide de basse température.
- (2) L'altération hydrothermale correspond aux minéralisations associées au quartz calcédonieux, massif et brèche des sites Ali Addé, Arta, Hes Daba, Babba Alou et Asa Leyta. Les minéralisations du site Ali Addé sont la chalcopryrite, sphalerite, pyrite, galène, or, tetradymite, hessite, pyrrhotite, hématite and magnétite et des minéraux secondaires (bornite, digenite, covellite, marcasite et goethite) sont disséminés dans les veines de quartz. La pyrite dans le quartz bréchique est le minéral le plus abondant à Babba Alou. Le site hydrothermal Hes Daba est caractérisé par des minéraux primaires (chalcopryrite, sphalerite, pyrite, galène, tetradymite, hessite, pyrrhotite, hématite et

magnétite) et des minéraux secondaires (bornite, digenite, covellite, marcasite, chalcocite, goethite, cuivre natif, argent natif) dans les veines de quartz. L'or natif, l'électrum, la hessite, la tétradymite et la pyrite sont identifiés dans les veines calcédonieuses à Hes Daba.

Le site hydrothermal d'Arta présente des minéraux primaires (or, électrum, argentite, pyrite et hématite) associés aux veines calcédonieuses rubanées et secondaire (goethite). L'or est concentré dans les veines rubanées. Le site Asa Leyta est constitué de calcédoine et brèche caractérisée par des minéraux primaires (pyrite) et secondaire (goethite). L'adulaire est associé aux veines rubanées à Hes Daba, Arta, Asa Leyta et dans les veines de quartz à Ali Addé. Ce minéral est un indicateur de phénomène d'ébullition (Simmons & Christenson 1994) et l'association de l'adulaire et la calcite lamellaire dans les veines de quartz est un important indicateur de condition d'ébullition (Browne 1978; Simmons & Christenson 1994; Simmons & Browne 2000). De plus Henley et al., (1984) et Reed et Spycher (1985) ont montré que la précipitation de la calcite est provoquée par la perte de CO₂ pendant l'ébullition. La calcite lamellaire est dépourvue de minéraux. Le quartz, l'adulaire et la calcite lamellaire sont souvent rencontrés dans les environnements géothermiques (Simmons & Browne 2000).

Sur la base de la présence de la calcédoine ou le quartz ainsi que la minéralogie et la texture de la gangue, deux différents niveaux d'altération hydrothermale peuvent proposés à Hes Daba, Ali Addé, Arta et Asa Leyta :

- (1) Le premier niveau correspond au dépôt de quartz massif minéralisé en sulfure.
- (2) Ensuite, nous avons la formation d'une gangue calcédonieuse comportant l'or et les minéralisations sulfurées. Quelques brèches sont présentes sur le mur de la roche encaissante. La présence d'adulaire et de calcite lamellaire dans les quatre sites les plus riches en Au suggèrent que l'or est contrôlé par des conditions d'ébullition et de refroidissement. En effet, l'or est présent dans les veines calcédonieuses rubanées. La calcédoine se forme à des températures comprises entre 190 et 100°C (Sander & Black 1988; White & Hedenquist 1990). De plus dans les systèmes géothermiques, le dépôt de la calcédoine s'effectue à une profondeur inférieure à 100 m (White & Hedenquist 1990).

(3) Le dernier type d'altération hydrothermal montre des évidences de surface à faible profondeur. Le site Garabbayis est caractérisé par des sédiments silicifiés (ou silica cap) et des fumerolles active avec des monts carbonatés et des cheminés. A Arta Plage, l'aragonite, la calcite, l'ankérite, la dolomite, des veines de quartz et un stockwerk de gypse sont présents. Ces sites correspondent à des niveaux peu profond ou superficiel de précipitation hydrothermale. Dans les systèmes géothermiques, les gaz dissous (CO_2 , H_2S) remontant à la surface se condensent dans les eaux souterraines à des niveaux peu profond. Les carbonates de surface peuvent précipiter à partir d'une eau très chargée en CO_2 .

Ces trois types d'altération hydrothermale peuvent représenter les différents niveaux d'un système hydrothermal. Les différents types sont repris dans le diagramme suivant (fig. 5).

1) Le niveau le plus profond est caractérisé par la présence de l'épidote.

Dans le deuxième niveau, deux différents stages peuvent être distingués :

1) Une zone profonde où l'on a le dépôt d'un quartz massif à sulfure.

2) Une zone moins profonde avec des évidences de conditions d'ébullition où de calcédoine associé à la calcite lamellaire. Les concentrations en Au sont fortes à ce niveau du système hydrothermal. L'or est présent dans la calcédoine tandis que le quartz bréchiq est dépourvu ou moins riche. Dans les zones enrichis en Au, la pyrite est généralement riche en As.

3) Le troisième type est représenté par des dépôts hydrothermaux lacustres (monts de gypse, cheminées de carbonate).

Association As-Au

Dans les échantillons riches en Au particulièrement dans les veines rubanées, l'As est systématiquement enrichis dans la pyrite. De nombreux auteurs ont montré que dans les dépôts épithermaux, l'or était associé aux minéraux de sulfures (arsénopyrite, pyrite, chalcopyrite, pyrrothite and galène) comme « invisible » ou dans le réseau cristallin des sulfures métalliques (Mikhlin & Romanchenko 2007). Dans nos échantillons la pyrite est le sulfure le plus abondant dans les sites hydrothermaux. Sur la base de nombreuses études, l'or « invisible » peut s'associer localement à l'As dans la pyrite (Reich et al., 2005). L'enrichissement de l'As dans les fluides hydrothermaux a été décrit par de nombreux auteurs

(Heinrich et al. 1998 ; Douville et al., 1999). L'As (> 3 pds%) est l'élément trace détecté par microsonde électronique dans la pyrite à Hes Daba et Asa Leyta. De plus les fortes concentrations en Au correspondent aux échantillons contenant des fortes teneurs en As. L'analyse par microsonde électronique montre que l'As est très hétérogène dans la pyrite dans un même échantillon ce qui suggère une variation des conditions physico-chimiques durant la précipitation. La cartographie élémentaire montre clairement des zonations de l'As. L'or n'a pas été détecté dans la pyrite arsénifère. Cependant des petits grains d'Au ont été observés à la périphérie de certaines pyrites arsénifères.

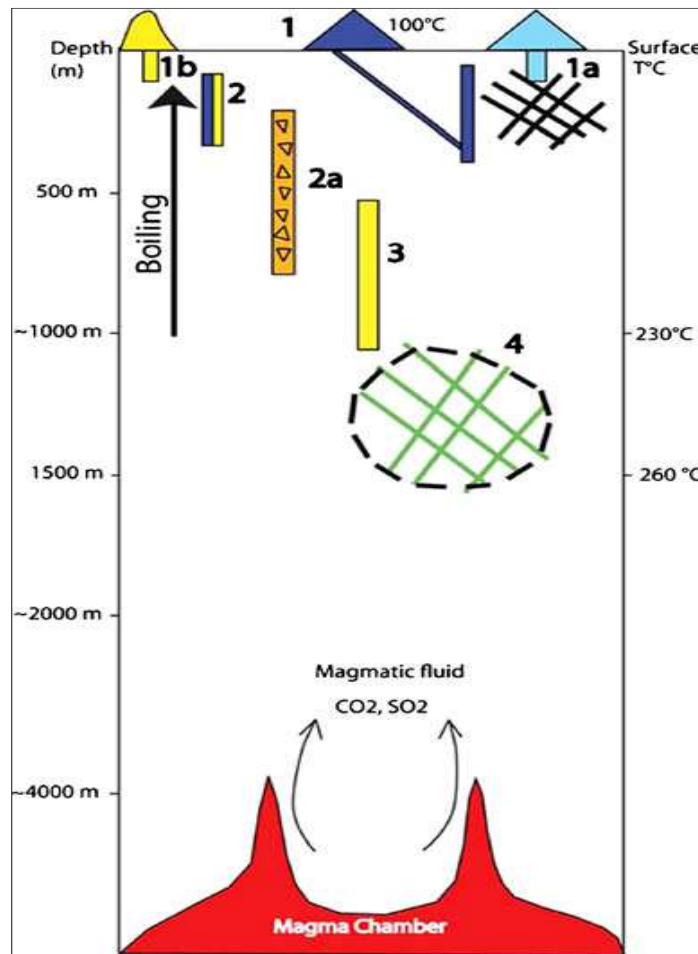


Fig. 5: Diagramme schématisé proposé pour la disposition des sites hydrothermaux étudiés. Il montre l'organisation générale des altérations hydrothermales en fonction des minéralisations et de la composition des altérations.

Comparaison entre les minéralisations du rift de Djibouti et les épithermaux neutres

Nima Moussa Egueh

Les assemblages minéralogiques identifiés dans le rift Afar à Djibouti possèdent des similarités avec les systèmes épithermaux neutre (John 2001). Exploité principalement pour leur teneur en or et argent, trois types de minéralisations ont été identifiées en fonction de leur degré de sulfuration (moyennes, neutres et intermédiaires) dans le fluide (Sillitoe & Hedenquist 2003 ; Einaudi & Hedenquist 2003). Les épithermaux neutres se forment dans les bassins arrière arcs et sont caractérisés par un volcanisme basique et felsique (Sillitoe & Hedenquist 2003 ; Einaudi & Hedenquist 2003). Les minéralisations de Djibouti peuvent être comparées à celle du rift de Nevada où les minéralisations sont associées à un volcanisme bimodale (John 2001).

Les circulations hydrothermales à Babba Alou, Garabbayis, Hes Daba, Asa Leyta et Asal sont contrôlées par les failles du rift. Les minéralisations et les altérations hydrothermales sont généralement associées aux intrusions acides. Dans les systèmes épithermaux, la précipitation des minéralisations est contrôlée par les conditions d'ébullition et de refroidissement. Les études réalisées sur les systèmes géothermiques ainsi que les modélisations thermodynamique ont montré que la présence de l'adulaire et de la calcite lamellaire pseudomorphosée par le quartz est un indicateur de conditions d'ébullition (Simmons and Browne 2000).

La présence de l'or, de l'électrum, des veines de calcédoines rubanées, de l'adulaire et de la calcite lamellaire indique que l'or est associé à des phénomènes d'ébullition dans le rift Afar à Djibouti.

4. Conclusions

Sur la base d'observation de terrain, des assemblages paragenétiques et des altérations, nous avons estimé la paléo-température et la profondeur initiale des différents types de minéralisations dans les sites hydrothermaux du rift Afar à Djibouti. Trois types de dépôts hydrothermaux ont été identifiés :

- (i) Le premier type est caractérisé par une altération hydrothermale à épidote et correspond au niveau le plus profond du système hydrothermal.
- (ii) Dans le second type existe (1) le quartz massif minéralisé en sulfure et (2) les veines rubanées minéralisées en or, électrum, hessite et tétradymite. L'adulaire a été identifié en association aux veines calcédonieuses rubanées. La présence d'adulaire et de calcite

lamellaire dans nos échantillons indique des conditions d'ébullitions du fluide hydrothermal. Les études minéralogiques des veines calcédonieuses et rubanées; minéralisées en Au, hessite et adulaire combinées aux études géochimiques ont montré des similarités entre les minéralisations aurifères du rift Afar à Djibouti et celles du rift du Nevada.

- (iii) Le troisième type de minéralisations hydrothermales observées, est associé à des dépôts peu profond ou superficiel.

References

- Barberi F, Varet J (1977). Volcanism of Afar: small-scale plate tectonics implications. *Geol Soc Am Bull* 88:1251–1266
- Browne PRL (1978). Hydrothermal alteration in active geothermal fields. In *Ann Rev Earth Planetary Sci* 6: 229–250
- Caminiti AM, (2007). Hydrothermalisme et minéralisation dans un contexte de rift actif - République de Djibouti. *Sciences et Environnement, Revue n° 21, CERD Djibouti*, pp 27–51
- Cheymol J (1961). Mission de prospection minière en Côte Française des Somalis. Rapport BRGM, A-1968
- D'Amore F, Giusti D, Abdallah A (1998). Geochemistry of the high salinity geothermal field of Asal, Republic of Djibouti, Africa. *Geothermics* 27:197–210
- Douville E, Charlou JL, Donval JP, Hureau D, Appriou P (1999). Le comportement de l'arsenic (As) et de l'antimoine (Sb) dans les fluides provenant de différents systèmes hydrothermaux océaniques. *C R Acad Sci Paris* 328:97–104
- Dreyfus (1931). Etudes de géologie et de géographie physique sur la Côte Française des Somalis. *Rev Geogr Phy Geol Dyn* 4:287–385
- Drummond SE, Ohmoto H (1985) Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Econ Geol* 80:126–147
- Einaudi M, Hedenquist J, Inan E (2003). Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: transitions from porphyry to epithermal environments. *Soc Econ Geol Spec Publ* 10:285– 314
- Gasse F, Dagain J, Mazet G, Richard O, Fournier M (1987). Carte géologique de la République de Djibouti: feuille de Dikhil, Ministère Français des Relations Extérieures et ISERST, 1/100000. ORSTOM Ed

- Etoubleau J, Cambon P, Fouquet Y, Henry K, Moal S (1996) Séparation des métaux nobles (Pt, Au) d'une matrice géologique par chromatographie d'échange d'ions et détermination par spectrométrie de fluorescence X. *J Phys IV* 6:843–852
- Hedenquist JW, Arribas A, Gonzalez-Urien E (2000). Exploration for epithermal gold deposits. *Rev Econ Geol* 13:245–277
- Henrich CA, Audéat A, Ulrich T, Günther D (1998). Liquid–vapour partitioning of trace-elements in boiling hydrothermal systems: laser-ablation ICPMS data from natural fluid inclusions. *Mineralogical Magazine, Goldschmidt Conference 62A (3):593–594*
- John DA (2001). Miocene and early Pliocene epithermal gold–silver deposits in the northern Great Basin, western United States: characteristics, distribution, and relationship to magmatism. *Econ Geol* 96:1827–1853
- Le Gall B, Daoud MA, Maury RC, Rolet J, Guillou H, Sue C (2010). Magma-driven antiform structures in the Afar rift: the Ali Sabieh range, Djibouti. *J Struct Geol* 32:843–854
- Mikhlin YL, Romanchenko AS (2007). Gold deposition on pyrite and the common sulfide minerals: an STM/STS and SR-XPS study of surface reactions and Au nanoparticles. *Geochim Cosmochim Acta* 71:5985–6001
- Reed MH, Spycher NF (1985). Boiling, cooling and oxidation in epithermal systems: a numerical approach. *Rev Econ Geol* 2:249–272
- Reyes AG (1990). Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *J Volcanol Geotherm Res* 43:279–309
- Robineau B (1979). La zone d'Arta et le Rift d'Asal-Ghoubbet: leur étude intégrée dans le contexte géodynamique de l'Afar. Thesis. Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Académie de Montpellier
- Simmons SF, Christenson B (1994). Origins of calcite in a boiling geothermal system. *Am J Sci* 294:361–400
- Simmons SF, Browne PRL (2000). Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands-Ohaaki geothermal system: implications for understanding low sulfidation epithermal environments. *Econ Geol* 95:971–999
- Simmons SF, White N, John D (2005). Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. In Hedenquist JW, Thompson JFH, Goldfarb RJ, Richards JP, eds. *Econ Geol 100th Anniversary Volume*: 485–522
- Vellutini P, Piguet P (1994). Djibouti-Itinéraires géologiques. Ministère Français de Coopération et d'Action Culturelle à Djibouti. BCIMR et P.FA Ed, p 289
- White NC, Hedenquist JW (1990). Epithermal environments and styles of mineralization: variations and their causes, and guidelines for exploration. *J Geochem Explor* 36:445–474