

Processus hydrothermaux associés au rifting, exemple de Djibouti

N. Moussa^{1*}, Y. Fouquet², B. Le Gall³

¹IST, Centre d'Etude et de Recherche de Djibouti, BP 486, Djibouti

²IFREMER, Centre de Brest, BP 70- 29280 Plouzané, France

³UMR 6538 Domaines Océaniques, UBO-IUEM, Place Copernic, 29280, Plouzané, France

*Correspondance, courriel : nmoussae@gmail.com

Abstract

In the SE Afar Rift (Djibouti), mineralization is associated with a felsic intrusion related to the opening of the Afar Depression. Three types of mineralization are recognized: (i) pyrite \pm pyrrhotite; (ii) gold, silver, electrum, argentite and pyrite; (iii) gold, silver, tetradymite, hessite, chalcopyrite, galena, sphalerite and pyrite. Mineralization occurs as gold–silver bearing chalcedony veins. The most recent veins are controlled by fractures at the edges of grabens established during the last 4 Myr. The presence of As, adularia, platy calcite and banded chalcedony imply for boiling conditions during the mineralization events. Gold mineralization is similar to the Low Sulphidation Epithermal systems associated with volcanic arcs. The discovery of this type of mineralization in the initial opening ocean is unique.

Résumé

Dans la partie SE du Rift Afar (Djibouti), les minéralisations sont associées à des intrusions acides en relation avec l'ouverture de la Dépression Afar. L'étude minéralogique et géologique des échantillons provenant des sites hydrothermaux révèle l'existence de trois paragenèses (i) pyrite \pm pyrrhotite (ii) or, argent, électrum, argentite et pyrite caractérisant Arta (iii) or, argent, hessite, tétradymite, électrum, chalcopyrite, galène, sphalérite, pyrite. Les filons aurifères sont majoritairement contrôlés par les failles du rift (< 4 Ma).

Les minéralisations aurifères de Djibouti se rapprochent de celles des systèmes épithermaux neutres associées au volcanisme acide dans les arcs insulaires. La découverte de ce type de minéralisation dans un contexte initial d'ouverture océanique est unique.

Mots clés : Hydrothermalisme, minéralisations, épithermal, Dépression Afar, Djibouti

1. Introduction

L'hydrothermalisme résulte de la circulation d'un fluide chaud, à différentes pressions et températures, dans la partie superficielle de la croûte. Il est constitué de deux principales composantes : une source de chaleur et une phase fluide. Les circulations hydrothermales liées au volcanisme permettent la mise en place de minéralisations variées. Suivant la composition des roches et les caractéristiques physico-chimiques des fluides, différents types de minéraux d'altération peuvent se former. La compréhension des processus hydrothermaux associés aux rifts a bénéficié des résultats acquis à partir de 1979 en domaine océanique. Les premières cheminées hydrothermales ont été découvertes en 1978 à 21°N dans la dorsale Est Pacifique (EPR) (Cyamex, 1978; Francheteau et al. 1979; Spiess et al. 1980) et sur la ride du Galapagos (Corliss et al. 1979). De nombreux travaux ont été menés depuis 30 ans pour comprendre les processus hydrothermaux et métallogéniques sous-marins dans différents contextes géodynamiques (dorsales rapides, dorsales lentes, bassins arrière- arcs). Environ 300 champs hydrothermaux ont été découverts dans les océans à des profondeurs comprises entre 5000 m et quelques centaines de mètres (Hékinian et Février 1980; Fouquet et al. 1997; Rona et Scott 1993, Fouquet et al. 1993, Fouquet et al. 2010; Hannington et al. 2011). Sur le plancher océanique les failles et les fissures sont autant de zones de recharge dans lesquelles l'eau de mer s'infiltré, l'interaction des roches avec de l'eau de mer s'accompagne d'échanges chimiques importants (Honnorez, 1981; Alt et al.1995). A l'approche de la chambre magmatique située à seulement 1 à 3 km de profondeur la température croît progressivement et les gradients sont très élevés, l'eau de mer s'infiltré et se transforme progressivement en un fluide hydrothermal enrichi en métaux dissous. Ce fluide de faible densité, chaud et acide, remonte en surface par convection et jaillit sur le plancher océanique ou il entre en contact avec l'eau de mer froide et alcaline. Le résultat de cette interaction est la précipitation des métaux contenus dans le fluide sous forme de dépôts et de particules qui se dispersent dans la colonne d'eau au-dessus du plancher océanique (Fig. 1). La perméabilité de la croûte peut également jouer un rôle important dans le transport et la précipitation des métaux. Lorsque la croûte est très perméable, le changement brutal des conditions chimiques, lors du mélange en subsurface entre l'eau de mer froide et le fluide hydrothermal, entraîne la déstabilisation des complexes métalliques sulfurés et chlorés. Lorsque la perméabilité est faible, les fluides sont focalisés vers le plancher océanique avant de se mélanger à l'eau de mer, et les métaux forment des cheminées qui s'accumulent pour former des amas sulfurés sur le fond de l'océan. Les premiers forages ODP réalisés sur le site hydrothermal de TAG dans l'Atlantique

sur une profondeur de 120 mètre a permis de préciser qu'une partie de l'amas sulfuré se forme par accumulation de cheminées tandis que les sulfures massifs plus profonds se forment par remplacement du substratum. Estimé à plus de 4 Mt (Humphris et al. 1995), ce mont représente un gisement comparable à ceux de Chypre ou Oman. Ces amas sulfurés se retrouvent à l'état fossile sous les sédiments pélagiques dans les ophiolites : dorsales fossiles obductées sur les continents (exemple des ophiolites d'Oman, Chypre et Terre-Neuve).

Dans les stades initiaux d'ouverture océanique tel que Salton Sea ou encore la Mer Rouge, des sédiments métallifères sont associés à des saumures denses alimentées par des fluides hydrothermaux minéralisateurs interagissant avec des formations salifères. Les sédiments métallifères de la fosse Atlantis II (Mer Rouge) ont fait l'objet de très nombreuses études (Bischoff 1969; Degens et Ross 1976; Shanks et Bischoff 1980; Zierenberg et Shanks 1983; Gurvich 2006). Ils sont composés d'une alternance de niveaux sulfurés, et de niveaux d'oxydes de fer et de manganèse, à carbonates néoformés, sulfates de calcium et argiles.

Parmi les systèmes de rifts intracontinentaux, celui, généralement considéré comme la structure de référence, qui s'étend à travers la Corne de l'Afrique depuis le Rift Est-Africain au sud, jusqu'au Triangle Afar et ses deux branches océaniques de la Mer Rouge et du Golfe d'Aden, au nord, n'a été que très peu étudié à ce jour d'un point de vue métallogénique. Deux grands types d'approches lui ont été consacrés. Il s'agit, (1) de travaux pétro-minéralogiques qui ont dressé l'inventaire des produits hydrothermaux formés à proximité de sites géothermiques, soit à l'air libre, soit dans des bassins de types lacustre (Kivu, Bogoria, ...) ou marin (Mer Rouge) (Degens et Kulbicki 1973), et (2) d'études géothermiques réalisées le long de certains segments de la vallée axiale du rift kenyan (Tiercelin 1989) et éthiopien (Tadesse et al. 2001). Des travaux similaires ont été réalisés plus au nord, au niveau du rift Afar à Djibouti. Ces systèmes constituent un jalon important entre les minéralisations des dorsales océaniques et celles des rifts intracontinentaux. Les forages géothermiques réalisés dans la zone axiale ont confirmé cette activité, des minéralisations sulfurées ont été découvertes vers 800 mètre de profondeur (D'Amore et al. 1998). Les travaux de terrain menés ont permis d'échantillonner des minéralisations formées sur une période d'environ 30 millions d'années et couvrant l'essentiel des phases volcaniques conduisant à l'ouverture du rift de Djibouti et à l'arrivée d'eau de mer dans les circuits hydrothermaux.

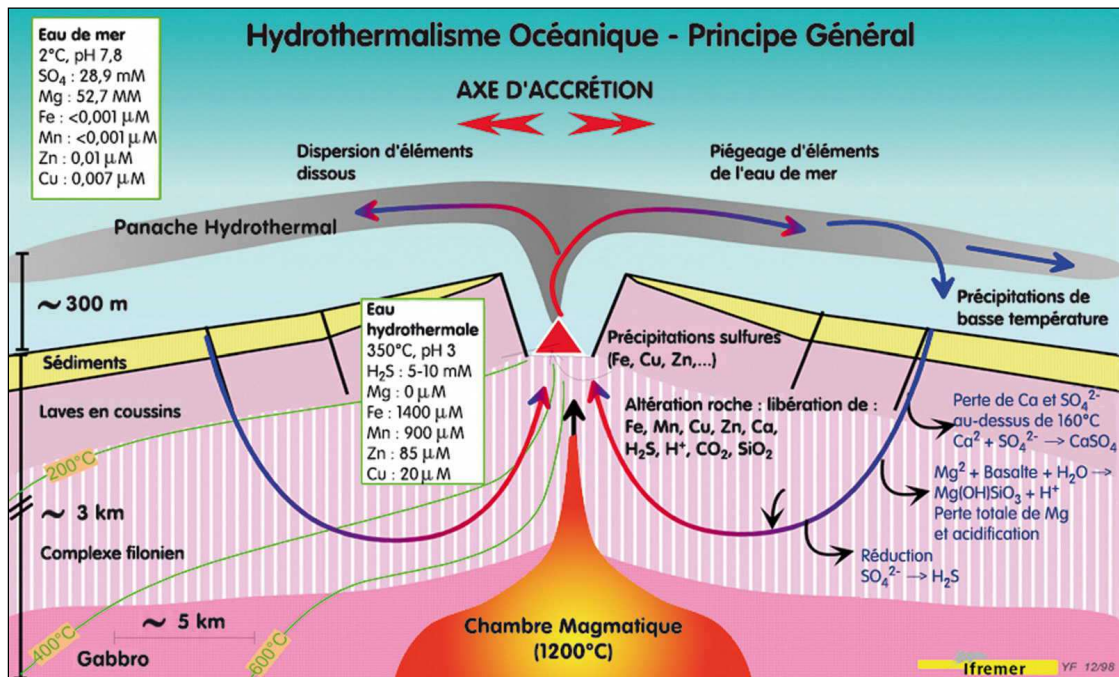


Figure 1 : Principe général de l'hydrothermalisme (Fouquet, 1998)

2. Données antérieures

Djibouti est demeuré pendant des longues années un territoire inexploré. Les premières missions de reconnaissance géologique ont commencé dans les années 1845 avec Aubry et Faurot. Ces géologues étaient limités dans leur exploration géologique pour de nombreuses raisons (moyens logistiques limités, insécurité qui régnait dans le pays). Cependant, ils ont signalé certaines substances minérales et dressés quelques cartes sur la base des indices minérales qu'ils ont identifiés. Aubert de la Rue (1939a) fut le premier à reporter la présence d'or (0,5 g/T) et de cuivre dans le secteur nord du lac Asal. Cheymol (1961) reprend les données d'Aubert de la Rue. Il précise qu'aucun indice de manganèse n'a été découvert dans les Monts Boura (Ali Sabieh). Les indices de cuivre observé par Besairie (1949) ont été étudiés par Dabrowsky (1957). Ce dernier rapporte que dans l'Oued Ororei, (3 Km à l'Est de Daffare sur la rive Est du lac Asal), la minéralisation apparaissait sous forme de veinules dans la roche encaissante. Les minéraux identifiés sont le chrysocolle, la malachite, l'azurite, la mélaconite et très peu de chalcocite. L'étude détaillée des filonnets, des épontes ainsi que les basaltes vacuolaires ont montré des teneurs de cuivre non exploitables dans cette région. Les autres indices de cuivre signalés par Besairie dans les falaises de Mokoyta, Oued Doubye et Adolei se sont révélés être des silicates de fer (céladonite; Dabrowski 1957; Cheymol 1961).

La distribution cartographique des indices miniers à Djibouti a été synthétisée (Fig. 2) par A.M. Caminiti (2007).

Les roches datées de 27 Ma qui affleurent dans la partie Sud du pays ont subi des altérations de type kaolinitique associées aux rhyolites Miocènes (Gadalia 1980; Caminiti 2007). Pour ces auteurs, le Jurassique qui affleure dans le sud du pays est caractérisé par une plate-forme carbonatée en contact avec les grès du Crétacé, et est minéralisée en pyrite (Caminiti, 2007). Le Miocène inférieur et l'Oligocène supérieur sont caractérisés par des traces de Cu, Mn, calcédoine, calcite, barytine, sulfures, épidote et chlorite. Le Miocène supérieur représenté alors par les rhyolites Mablans montre la présence de veines et filons de Cu, calcite, barytine, quartz, gypse et chlorite.

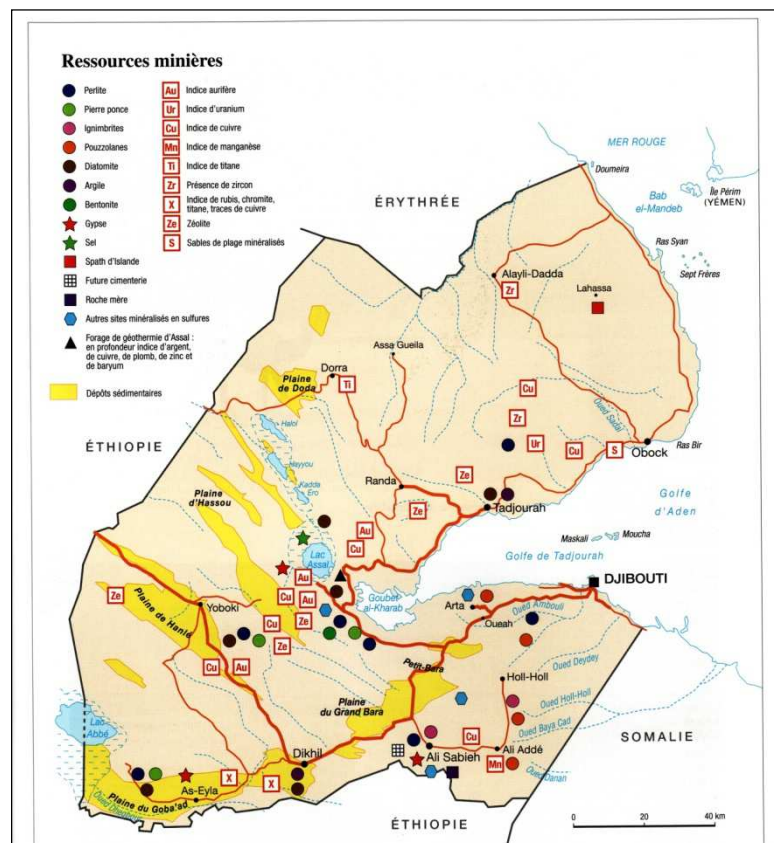


Figure 2 : Distribution des indices minéralisés à Djibouti (Caminiti, 2007)

3. Méthodologie

Plusieurs outils analytiques ont été utilisés pour caractériser les particularités minéralogiques, géochimiques des échantillons provenant des sites hydrothermaux. Dans une première étape, nous avons caractérisé les différentes phases minérales ainsi que les paragenèses. Les paragenèses non identifiables ont fait l'objet d'étude détaillée à la

microsonde électronique et au microscope électronique à balayage. Les phases minérales ont été identifiées par diffraction aux rayons X. Les éléments majeurs et quelques traces ont été analysés par fluorescence X. Les résultats ne sont pas reportés dans ce papier. L'or a été identifié par microscopie optique à réflexion.

4. Minéralisations observées à Djibouti

Les descriptions des faciès et les paragenèses sont discutées dans Moussa et al. 2012. Un système épithermal existe à Djibouti (Fig. 3, 4). La présence de l'adulaire, les paragenèses très proches de celle des systèmes épithermaux, la calcite à structure lamellaire cloisonnée, les structures calcédonieuses rubanées ainsi que les altérations de type chlorite à séricite rapprochent les minéralisations de Djibouti du type épithermal neutre.



Figure 3 : Exemple de minéralisation à or associé à des veines calcédonieuses. A- Stockwerk associé à une intrusion acide. B- Brèche hydrothermale. C- D : Veine rubanée à adulaire enrichie en or natif, argentite et électrum (Moussa et al., 2012).

Sites		Asal	Asa Leyta	Hes Daba	Garrabayis	Baba Alou	Arta Plage	Arta	Ali Addé	Da'asByo ⁽²⁾
Minerals		(< 1Ma)	(< 1 Ma)	(< 3.3 Ma)	(< 3.3 Ma)	(< 3.3 Ma)	(< 4 Ma)	(< 4 Ma)	(15 to 11 Ma)	(15 to 11 Ma)
Hypogene minerals	Chalcopyrite CuFeS ₂			+					+	
	Pyrrhotite FeS		+	+					+	
	Pyrite FeS ₂		+	+		+		+	+	+
	Sphalerite (Zn,Fe)S			+					+	
	Galena PbS			+					+	
	Gold Au			+				+		
	Electrum AuAg			+				+		
	Argentite Ag ₂ S			+				+		
	Hessite Ag ₂ Te			+						
	Tetradymite Bi ₂ Te ₂ S								+	
	Magnetite Fe ₃ O ₄							+		
	Hematite Fe ₂ O ₃			+				+	+	
	Supergene minerals	Chalcocite Cu ₂ S			+					
Covellite CuS				+					+	
Digenite Cu ₉ S ₅				+					+	
Native Silver Ag				+						
Native Copper Cu				+						
Goethite FeO(OH)			+	+		+		+	+	+
Bornite Cu ₅ FeS ₄				+					+	
Marcasite FeS ₂			+					+		
Gangue	Adularia KAlSi ₃ O ₈		+	+				+		
	Massive Quartz SiO ₂		+	+		+	+	+		+
	Chalcedony SiO ₂		+	+				+	+	
	Carbonates CaCO ₃	+	+	+	+	+	+	+	+	

Figure 4: Séquences paragénetiques des sites hydrothermaux (Moussa et al., 2012)

5. Modèle hydrothermal proposé pour l'or

Sur la base des observations géologiques et minéralogiques, un modèle hydrothermal a été proposé. Une intrusion magmatique rhyolitique, riche en fluides et située en profondeur constitue la source de chaleur entraînant les circulations hydrothermales (Fig. 5). Un fluide hydrothermal, vecteur des métaux, circule et dépose certains métaux dans des zones de failles. Dans les épisodes les plus récents, le contrôle des circulations peut se faire le long des failles du rift. Les minéralisations les plus profondes correspondent aux sites les plus anciens où l'on a un quartz massif chaud non minéralisé et des altérations. Durant son ascension le fluide hydrothermal dépose les métaux sous forme de chalcopryrite, galène et sphalérite associées à un quartz plus calcédonieux ou bréchi que dans les sites. La présence d'adulaire, de «platy» calcite, les fortes concentrations en arsenic et les structures rubanées indiquent un fluide qui a subi une ascension rapide dans des conditions d'ébullition. Les structures rubanées et la présence de l'adulaire indiquent généralement des profondeurs inférieures à 200 m et des températures inférieures à 200°C (Reyes et al., 1990).

Enfin, l'altération séricitique est commune aux sites étudiés, elle est très souvent associée aux systèmes épithermaux neutre à séricite ± adulaire et indique une affinité de nos minéralisations avec les minéralisations de type epithermal neutre.

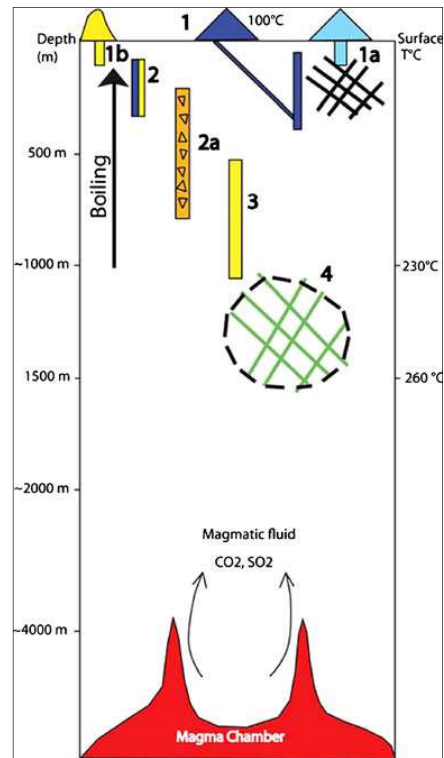


Figure 5: Modèle hydrothermal proposé pour le transport des métaux à Djibouti (Moussa et al. 2012).

6. Conclusion

Un système épithermal a été découvert dans ce contexte géologique unique au monde. Les sites hydrothermaux souvent associés à des intrusions acides, sont minéralisés en or, argent et sulfures associés. Un modèle hydrothermal a été proposé pour comprendre la genèse des métaux dans à Djibouti.

Remerciements

Les auteurs remercient Dr Jalludin Mohamed, Dr Antoine Caminiti et Dr Idriss Guirreh pour les discussions scientifiques et les missions de terrain. Ces travaux de recherche ont été financés par le SCAC et le CERD.

Références

- Alt, J. C., 1995, Subseafloor processes in mid-ocean ridge hydrothermal systems, *Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions*, Volume 91: Washington, DC, AGU, p. 85-114.
- Aquater, 1980. *Projet pour l'évaluation des ressources géothermiques de la république de Djibouti — Annexe B (Partie Géochimie)*.
- Aquater, 1987. *Geothermal exploration project Hanle — Gaggade. Republic of Djibouti Hanle I and II well report*
- Aubert de la Rue E (1939) *Contribution à l'étude minéralogique de la Côte Française des Somalis. C R Acad Sci Paris* 208:291–293
- Besairie H., 1949. *Carte géologique de la Côte française et des Somalis au 1/400 000 avec notice. Bureau géologique. Tananarive.*
- Bischoff, J. L. (1969). *Red Sea geothermal brine deposits: their mineralogy, chemistry, and genesis. In Hot brines and recent heavy metal deposits in the Red Sea (pp. 368-401). Springer Berlin Heidelberg.*
- Boucarut, M., et al. "Carte géologique au 1: 100 000 du Territoire Français des Afars et des Issas, feuille d'Asal." (1974): 1-12.
- Caminiti A.M., 2007. *Chapitre : Géologie et tectonique et ressources minières. In Eds du Jaguar - Jeune Afrique. Atlas de Djibouti.*
- Cheyrol J (1961) *Mission de prospection minière en Côte Française des Somalis. Rapport BRGM, A-1968*
- Corliss, J., J. Dymond, et al. (1979). "Submarine Thermal Springs on the Galapagos Rift." *Science* 203(4385): 1073-1083.
- Cyamex Scientific Team. (1978). *Découverte par submersible de sulfures polymétalliques massifs sur la dorsale du Pacifique oriental, par 21 N (projet RITA). Compte Rendu Acad Sci Serie D, 287, 1365-1368.*
- Dabrowsky H (1957) *Compte Rendu d'une visite des principaux indices minéralisés en Côte Française des Somalis. Rapport du Bureau minier de la France d'Outre-Mer*
- D'Amore, F., D. Giusti, et al. (1998). "Geochemistry of the high-salinity geothermal field of Asal, Republic of Djibouti, Africa." *Geothermics* 27(2): 197-210.
- Degens, E. T., & Ross, D. A. (1969). *Hot Brines And Recent Heavy Metal Deposits In The Red Sea.*
- Degens, E. T., & Kulbicki, G. (1973). *Hydrothermal origin of metals in some East African rift lakes. Mineralium Deposita*, 8(4), 388-404.
- Dreyfus, M. (1930). "Etude géologique sommaire de la région méridionale de la Côte Française des Somalis." *Mém. Soc. Géol. Fr.*(14): 85-87.

Fontes, J.C., Pouchan, P., 1975. Les cheminées du lac Abbé (T.F.A.I.): stations hydroclimatiques de l'Holocène. *Comptes Rendus de l'Académie des Science* 280, 383–386.

Fouquet, Y., J. Charlou, et al. (1993). "Metallogenesis in back-arc environments: the Lau Basin example." *Economic Geology* 88 (8).

Fouquet, Y., 1997, Where are the large hydrothermal sulphide deposits in the oceans?: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, v. 355, no. 1723, p. 427-440.

Fouquet, Y., Cambon, P., et al., 2010, Geodiversity of hydrothermal processes along the Mid-Atlantic Ridge and ultramafic-hosted mineralization: A new type of oceanic Cu-Zn-Co-Au volcanogenic massive sulfide deposit, *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges*, Volume 188: Washington, DC, AGU, p. 321-367.

Francheteau, J., H. Needham, et al. (1979). "Massive Deep-Sea Sulphide Ore Deposits Discovered on the East Pacific Rise." *Nature* 277(5697): 523-528.

Gadalia, A. (1980). "Les Rhyolites du stade initial de l'ouverture d'un rift: Exemple des Rhyolites Miocène de l'Afar." Unpublished Ph. D. thesis, University of Paris XI-Orsay 183.

Geotermica Italiana srl, 1983. Etude de prefaisabilité des ressources géothermique de la zone du Hanle — Gaggade Republic of Djibouti

Gurvich, E. G. (2006). *Metalliferous sediments of the world ocean: fundamental theory of deep-sea hydrothermal sedimentation* (pp. 416-p). Heidelberg: Springer.

Hannington M., Jamieson J., Monecke T., Petersen S. and Beaulieu S. (2011) The abundance of seafloor massive sulfide deposits. *Geology* 39, 1155-1158.

Hekinian, R., Fevrier, M., Bischoff, J. L., Picot, P., and Shanks, W. C., 1980, Sulfide Deposits from the East Pacific Rise Near 21°N: *Science*, v. 207, no. 4438, p. 1433-1444.

Honnorez, J., von Herzen, R. P., Barrett, T. J., Becker, K., Bender, M. L., Borella, P. E., & Levi, S. (1981). Hydrothermal mounds and young ocean crust of the Galapagos: Preliminary Deep Sea Drilling results, Leg 70. *Geological Society of America Bulletin*, 92(7), 457-472.

Humphris, S. E., Herzig, P. M., Miller, et al. 1995, The internal structure of an active sea-floor massive sulphide deposit: *Nature (London)*, v. 377, no. 6551, p. 713-716.

Manighetti, I. (1993), *Dynamique des systèmes extensifs en Afar*, thèse de Doctorat, 240 pp., Univ. de Pierre and Marie Curie, Paris.

Moussa N, Fouquet Y, Caminiti AM, Le Gall B, Rolet J, Bohn M, Etoubleau J, Delacourt C and Jalludin M (2012) : First Evidence of Epithermal Gold Occurrences in the SE Afar Rift, Republic of Djibouti. DOI 10.1007/s00126-011-0397-9. *Miner Deposita*.

Reyes AG (1990) Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *J Volcanol Geotherm Res* 43:279–309

Rona, P. A. (1988). Hydrothermal mineralization at oceanic ridges. *Canadian Mineralogist*, 26(3), 431-465.

Rona, P. A., & Scott, S. D. (1993). A special issue on sea-floor hydrothermal mineralization; new perspectives; preface. *Economic Geology*, 88(8), 1935-1976.

Shanks, W. C., & Bischoff, J. L. (1980). Geochemistry, sulfur isotope composition, and accumulation rates of Red Sea geothermal deposits. *Economic Geology*, 75(3), 445-459

SKLYAROV, E. V., SOLOTCHINA, E. P., et al. 2010 Detailed Holocene climate record from the carbonate section of saline Lake Tsagan-Tyrm (West Baikal area). *Russian Geology and Geophysics*, , vol. 51, no 3, p. 237-258.

Stieltjes, L. (1973). L'axe tectono-volcanique d'Asal (Afar central-Territoire français des Afars et des Issas). Thesis, Université de Paris-Sud, Orsay

Spiess, F. N., Macdonald, K. C., et al., 1980, East Pacific Rise: Hot Springs and Geophysical Experiments: *Science*, v. 207, no. 4438, p. 1421-1433.

Tadesse S (2001) Epithermal gold occurrences in the Lakes District of the Main Ethiopian Rift and Tendaho area of the Afar Rift: discovery of a metallogenic province. *Ethiopian Journal of Science* 24:69–91

Tiercelin, J. J., C. Thouin, et al. (1989). "Discovery of sublacustrine hydrothermal activity and associated massive sulfides and hydrocarbons in the north Tanganyika trough, East African Rift." *Geology* 17(11): 1053.

Zierenberg, R. A., & Shanks, W. C. (1983). Mineralogy and geochemistry of epigenetic features in metalliferous sediment, Atlantis II Deep, Red Sea. *Economic Geology*, 78 (1), 57-72.