

Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat par
Mohamed AHMED DAOUD

Dynamique du rifting continental de 30 Ma à l'Actuel dans la partie Sud-Est du Triangle Afar. Tectonique et magmatisme du rift de Tadjoura et des domaines Danakil et d'Ali Sabieh, République de Djibouti.

Résumé :

L'objectif de ce travail consiste à compléter les modèles cinématiques appliqués au rift Afar par l'étude de deux chantiers, et leurs thématiques correspondantes, largement délaissés jusqu'à présent, et situés à la périphérie orientale de la dépression Afar ; celle-ci ayant, à l'inverse, fait l'objet de nombreux travaux, bien que n'exposant que des dispositifs relativement jeunes (<3 Ma) par rapport à la longue histoire du rift Afar, étalée sur environ 30 Ma.

Notre travail repose sur une approche multi-disciplinaire, combinant (i) une analyse structurale multi-échelle, basée sur l'interprétation d'imageries satellitaires (ASTER) calibrée par des observations de terrain, et (ii) l'étude géochimique/géochronologique de roches volcaniques synrift (pour l'essentiel les facies effusifs, et exclusivement les séries basiques). Concernant l'étude structurale, l'accent a été mis sur l'analyse morpho-structurale des reliefs. Cette approche, très peu développée jusqu'à présent sur l'ensemble du Rift Afar, s'est révélée être fructueuse à la périphérie des zones de reliefs, et plus spécialement ceux d'Arta et d'Ali Sabieh. En effet, elle a permis de mettre en évidence des dispositifs de paléo-remplissage volcanique qui cloturent des cycles de type 'soulèvement-érosion-incision-remplissage', plus particulièrement pour les époques récentes <3 Ma. Les nouveaux résultats ainsi acquis apportent des contraintes supplémentaires pour quantifier, et caler dans le temps, les mouvements verticaux de premier ordre accompagnant les déformations.

La reconstitution du champs des paléo-contraintes à divers stades du rifting a été réalisée par le biais de l'analyse de plans striés. Cette analyse a été mise en œuvre au niveau des terrains anciens (substratum et séquences synrift) de la zone d'Ali Sabieh dont la structure en dôme posait la question de l'existence et de l'importance de compressions à l'extrémité SE du rift

Afar. Par contre, cette approche n'a pu être appliquée aux basaltes récents, présents sur la zone d'étude (Fm du Golfe, pour l'essentiel), par manque de marqueurs fiables.

Notre étude morpho-structurale ainsi que l'analyse des relations géométriques entre les différentes séries volcaniques sont basées, pour l'essentiel, sur l'interprétation d'images satellites ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), combinée à l'analyse (1) de données topographiques (MNT et bathymétrie), (2) de cartes géologiques existantes (1:100 000, Ali Sabieh, Tadjoura et Djibouti) et (3) d'observations de terrain. Les deux types de MNT utilisés, SRTM 90 (*Shuttle Radar Topography Mission*) et ASTER, se distinguent par leurs résolutions spectrales et spatiales respectives, et fournissent ainsi une vision 3D plus ou moins fine et complète de la morphostructure des régions étudiées. Ces données ont permis, d'une part, d'élaborer de grandes coupes structurales à travers les principaux domaines volcaniques, et d'autre part, de quantifier les déplacements verticaux (minimum) le long d'escarpements de failles individuelles et permettre ainsi une estimation des taux d'extension cumulée le long de transects régionaux.

Le volet pétro-géochimique comprend l'analyse des éléments majeures et en traces par ICP-AES de 128 échantillons. De plus 5 échantillons du volcan d'Hayyabley ont été étudiés par ICP-MS, à la microsonde et par la mesure des isotopes Sr, Nd, et Pb. Enfin 16 échantillons nouvelles datations obtenues par la méthode K :Ar ont été acquises au cours de ce travail.

Les deux chantiers étudiés, sont situés dans la partie orientale de la République de Djibouti, concernent :

- Les basaltes récents exposés sur les deux marges du Golfe de Tadjoura, à savoir, la Plaine de Djibouti au S (constituant le substratum de l'aquifère alimentant la ville de Djibouti en eau), et le secteur Tadjoura-Obock, au N, qui appartiennent à l'extrémité la plus occidentale du système d'accrétion du Golfe d'Aden.

- Les séries initiales synrift, et leur substratum, des domaines Danakil et Ali Sabieh.

(1) En prenant les Basaltes du Golfe (2.8-1.1 Ma) comme marqueurs tectoniques du rift Tadjoura, et en combinant les données morphologiques disponibles (topographiques et bathymétriques), la structure générale du rift Tadjoura est assimilée à celle d'un héli-graben à vergence sud, d'environ 20 x 30 km, bordé au N par un système de failles bordières et passant au S à une marge flexurée impliquant un substratum volcanique (séries des traps du Dalha et Somalis). Sur la base de données géochimiques et géochronologiques (méthode K-Ar), l'organisation volcano-stratigraphique ainsi que les caractéristiques géochimiques des séries basaltiques de la marge sud ont été affinées, avec notamment la mise en évidence d'un nouveau complexe intrusif (dyke-sill), l'ensemble de Goumarre, daté à 2.4-1.7 Ma, qui

alimente trois chapelets d'édifices volcaniques alignés au N80°E, parallèlement à l'axe du Golfe. Les séries basaltiques concernées (Golfe, Somali, Goumarre et volcan Hayyabley) présentent une signature géochimique de basaltes transitionnels à affinité tholeiitique, exceptés ceux du volcan Hayyabley, plus appauvris et aux caractéristiques géochimiques et isotopiques identiques aux laves de Manda Hararo en Ethiopie dont l'origine est attribuée comme étant le produit d'un manteau profond appauvri de type « panache ».

Les basaltes du Golfe sont moins enrichis en alcalins et en éléments les plus incompatibles par rapport aux basaltes Somali et Goumarre. Ces derniers se distinguent des basaltes Somali par leur fort enrichissement en terres légères (LREE) par rapport aux terres lourdes (HREE), tandis que le fractionnement des terres rares observé pour les basaltes Goumarre suggère une origine mantellique plus profonde (zone stabilité de grenat) que celle des basaltes Somali.

L'hémi-graben de Tadjoura est la première expression tectonique du rifting (à polarité Golfe d'Aden) à travers la province magmatique Afar, et il correspond à une extension cumulée estimée à 25-30%. Le rajeunissement progressif des structures extensives vers la partie centrale de l'hémi-graben témoigne de la concentration de la déformation dans l'axe, sismiquement actif, du dispositif.

L'analyse morphostructurale, géométrique et statistique des systèmes de failles extensives exposées sur les marges du rift, au niveau de la zone Tadjoura-Obock au N, et de la Plaine de Djibouti au S, permet en particulier de démontrer la plus grande complexité du dispositif faillé méridional qui se marque par (i) la présence de structures extensives transverses N140°E et (ii) de grandes variations latérales du style tectonique. Celles-ci témoignent d'un gradient croissant de la déformation vers l'W, en direction d'une discontinuité transverse, la zone d'Arta. A l'inverse des modèles cinématiques précédents qui interprétaient ce couloir décrochant subméridien comme partie intégrante du système transformant de Maskali, la zone d'Arta est considérée dans ce travail comme une structure héritée, à polarité Mer Rouge, qui entrave la propagation axiale, vers l'W, des structures extensives du système Golfe d'Aden. Ce blocage frontal de la déformation provoque le saut du rift vers le SW, depuis le Golfe de Tadjoura vers la zone du Ghoubbet, selon un modèle de type 'hard linkage', en opposition avec les conceptions précédentes qui favorisaient un transfert du rifting par l'intermédiaire de structures néo-formées disposées en échelon ('soft-linkage').

(2) L'étude structurale et pétro-géochimique des séries synrift des domaines Danakil et Ali Sabieh fournit de nouvelles contraintes (i) sur la nature des mécanismes responsables de

l'édification des reliefs bordiers à l'E du domaine Afar, et (ii) sur la distribution spatiale des complexes volcaniques lors des stades initiaux du rifting Afar.

Les séries mafiques les plus anciennes présentes au cœur de l'antiforme d'Ali Sabieh (ex séries d'Adolei) sont réinterprétées en termes de laccolithe basaltique et complexe filonien associé (dyke-sill), alimentant lui-même des séquences effusives datées entre 27 et 19 Ma.

L'analyse géochimique de ces séries (intrusives et effusives) révèle l'existence de deux groupes de basaltes : (i) les basaltes porphyriques (microbasaltes), moins évolués et dont la teneur en éléments majeurs est contrôlée par l'accumulation de phases minérales précoces (olivines et diopsides) et (ii) les basaltes non porphyriques, plus enrichis en alcalins. De nature transitionnelle à tendance tholeiitique, les basaltes porphyriques et non porphyriques se distinguent aussi par leurs teneurs en terres rares lourdes. Le rapport élevé La/Yb des microbasaltes suggère leur origine profonde (domaine de stabilité de grenat) par rapport aux basaltes non porphyriques. Les microbasaltes montrent des caractéristiques géochimiques similaires à celles (i) des HT1 (flood basalts enrichis en TiO₂ de type 1) et (ii) des volcans boucliers situés sur les plateaux éthiopiens. Par contre, les basaltes non porphyriques sont géochimiquement plus proches des HT2 (flood basalts enrichis en TiO₂ de type 2).

Sur la base d'arguments structuraux, l'antiforme d'Ali Sabieh est attribué à la mise en place du laccolithe à travers une couverture mésozoïque (Jurassico-crétacée), selon un mécanisme de 'block stopping' exprimé, notamment, par la présence d'un abondant cortège d'enclaves d'encaissant à proximité du toit de l'intrusion. De simples considérations géométriques permettent de préciser les dimensions 3D du laccolithe dont le contact basal doit se situer vers 2.5 km de profondeur, probablement à proximité du toit du socle protérozoïque. D'un point de vue chronologie de mise en place de l'intrusion, les dernières étapes du doming sont intervenues postérieurement à l'événement acide Mablas (15-11 Ma), dont les séquences sont impliquées dans la structure, et antérieurement à l'éruption des traps Somali (7.2-3.0 Ma) et du Dalha (8.6-3.8 Ma) qui reposent en discordance sur les deux flancs de l'antiforme.

Les résultats obtenus à propos du rift récent de Tadjoura, d'une part, et des dispositifs plus anciens des domaines Danakil et Ali Sabieh, d'autre part, fournissent de nouvelles contraintes qui permettent de discuter, à plus grande échelle, de certains aspects des modèles cinématiques appliqués au rift Afar pour la période Miocène-Actuel.

- (a) Concernant la cinématique des deux axes de rift jalonnant les marges E et W de la dépression Afar, une synthèse critique de données publiées ne nous paraît pas confirmer le

modèle généralement accepté depuis Tapponnier et al. (1990) ; modèle qui implique deux propagateurs migrant, l'un vers le S le long de l'escarpement occidental - le système Erta Ale-Manda Hararo – interprété comme la partie frontale, émergée, du système Mer Rouge, et l'autre vers le N, longeant l'escarpement oriental – le système Ghoubbet-Asal-Manda Inakir – à l'avant du système Golfe d'Aden ; les deux dispositifs déterminant une zone de recouvrement dominée par des déformations de type 'bookshelf faulting'.

Un modèle alternatif consiste à interpréter la totalité des segments de rift recoupant la moitié méridionale du système Afar, cad. le segment Manda Hararo à l'W et l'ensemble des segments Ghoubbet-Manda Inakir à l'E, comme la partie frontale du dispositif d'accrétion 'Golfe d'Aden', se propageant vers le N, suite à leur transfert le long du système transformant Maskali-BOL, auquel se rajoute les complications (saut de rift) liées à la discontinuité d'Arta. Seuls les segments de rift de l'Erta Ale au N se propageraient vers le S, à l'avant du dispositif 'Mer Rouge' ; la vergence opposée des deux systèmes de propagateurs déterminant ainsi, non pas une zone de recouvrement, mais une zone de confrontation.

- (b) L'absence de magmatisme de type trap, équivalent aux complexes à 30 Ma d'Ethiopie et du Yemen, au niveau des domaines Danakil et Ali Sabieh démontre le caractère discontinu et composite de la province magmatique Afar à cette période initiale ; celle-ci étant composée de deux sous-provinces, déconnectées de part et d'autre d'un domaine crustal intermédiaire, amagmatique, de direction subméridienne, centré sur les domaines Danakil et Ali Sabieh. Cette distribution de surface du magmatisme trap pose le problème des modalités des processus mantelliques en profondeur (nombre de panache(s) ou sous-panache(s), types de connection entre-eux,) .

- (c) La limite orientale du domaine intermédiaire (bordure du proto-bloc Danakil) est considérée comme l'une des discontinuités fondamentales du dispositif Afar, le long de laquelle va s'initier, vers 24 Ma, l'axe du rift Mer Rouge. Au cours du Miocène, les mécanismes de l'extension vont être totalement différents de part et d'autre de cette discontinuité, étant exclusivement associés, soit à de l'accrétion magmatique à l'W (Afar), soit à des structures tectoniques (failles/bassins) à l'E (Mer Rouge).

- (d) D'après le scénario cinématique envisagé, le domaine Danakil ne se comporte en bloc indépendant, soumis à une rotation anti-horaire, qu'à partir de 3Ma, postérieurement à l'événement magmatique Dalha qu'il partage en commun avec le domaine Afar, et non pas dès le Miocène inférieur comme généralement admis.