

1. LES GISEMENTS DE TSAVORITE DE L'EST AFRICAIN

1.1 Introduction

Si la plupart des grenats peuvent avoir une qualité gemme et être utilisés en tant que pierre semi-précieuse, le grossulaire tsavorite occupe néanmoins une place à part. D'un vert clair éclatant, grâce aux actions conjuguées du chrome et du vanadium, souvent d'une pureté excellente, et de surcroît, bien plus rare que le diamant et plus abordable que l'émeraude, la tsavorite est, en ces années 2010, en train de se faire une place de choix en joaillerie.

Mais si ses caractéristiques gemmologiques ont d'ores et déjà été décrites et sont désormais bien connues des experts, sa genèse et ses propriétés minéralogiques et géochimiques, permettant de déterminer son origine géologique et géographique, n'ont pas jusqu'ici été mises en lumière. Une équipe de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) et ses partenaires dressent pour la première fois la carte d'identité des grenats verts en fonction du gisement dont ils proviennent. Un premier pas vers la certification de la nouvelle gemme, une grande plus-value sur le marché de la bijouterie.

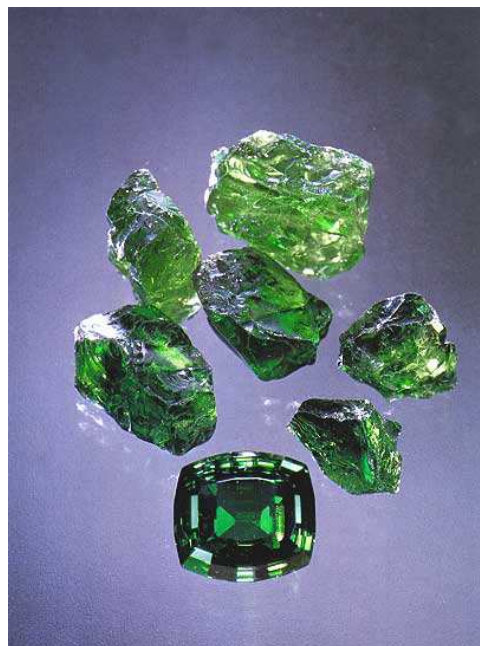


Figure 1 : Afrique de l'est : Grossulaire tsavorite. taille: pierre taillée - 7.59 carats. Localité: mine Lualenyi, Kenya
Collection: Pala International. Photo: Harold et Erica Van Pelt

1.2 Joaillerie

Les bijoutiers new-yorkais Tiffany & C°, qui finançaient les recherches, baptisèrent ce grossulaire «tsavorite», et bien que la Société allemande de minéralogie eût préféré «tsavolite», le premier nom s'est imposé. D'autres gîtes exploités en Tanzanie, dans la région de Komolo, ont fourni des pierres de 10 à 15 carats qui sont apparues à la bourse de Tucson en 1988.

C. R. Bridges avait trouvé une pierre de 7 carats, qui, taillée, mesurait encore 2,17 carats ; un collectionneur américain lui en offrit 20 000 \$. Mais ce prix n'est valable que pour des pièces exceptionnelles, de 2 ou 3 carats, les autres étant moins appréciées.

En 1990, la production fut d'environ 1 500 carats de pierres brutes, soit 375 carats de pierres travaillées.

1.3 Découverte

Un géologue écossais, Campbell R. Bridges, prospectait, en 1967, les montagnes de Leiatema, près de Komolo, au nord-ouest de la Tanzanie, quand il mit à jour, dans des gneiss graphiteux, à proximité

de calcaires cristallins, des sortes de grumeaux au centre desquels scintillaient de magnifiques grains verts entourés d'une pellicule d'altération, mélange d'épidote et de scapolite ; il venait de découvrir les premiers grossulaires d'une couleur verte très soutenue, de qualité gemme.

1.4 Prospection

Suite aux recherches intensives entreprises, le Kilimandjaro (5 895 m) devient une nouvelle fois source de pierres fines (on y avait découvert la tanzanite). À la fin de 1971, cinq riches gisements sont mis à jour au Kenya, près des limites du parc de Tsavo, le plus gros échantillon dégagé accusant 32 carats. En août 1973, c'est le gisement de Lualenyi, dans les monts Mgama, toujours au Kenya, qui est reconnu dans une zone métamorphisée de silicates calciques avec graphite ; ces terrains sont datés du Précambrien.

En 2011, la tsavorite n'a quasiment été répertoriée qu'en tanzanie, au Kenya, à Madagascar, au Pakistan et en Antarctique

Notons qu'en Australie occidentale, la « tsavorite » a été signalée dans les Eastern Goldfields, mais en cristaux peu colorés et trop petits pour être taillés. Sa couleur, très vive, va du vert clair, presque incolore, au vert émeraude intense, la plus recherchée. Ne contenant que peu d'inclusions elle est taillable sans avoir à être retouchée.

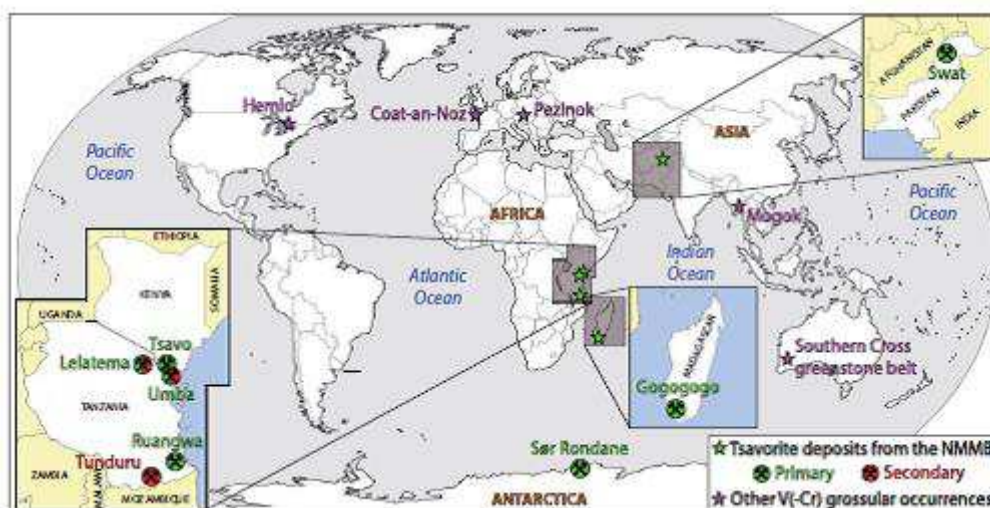


Figure 2 : Afrique de l'est : Localisation des sites de tsavorites à travers le monde
NMMB : sites connus de la Ceinture métamorphique Néoprotérozoïque Mozambicaine
Autre occurrences

L'une des études principales ayant pour sujet à la fois, la pétrologie des sites de tsavorite et l'identification chimique de ces pierres en fonction de leur provenance a été réalisée par Julien FENEYROL, au cours de sa thèse au Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG), intitulée Pétrologie, géochimie et genèse des gisements de tsavorite associés aux gneiss et roches calco-silicatées graphiteux de Lemshuku et Namalulu (Tanzanie) (2012).

L'IRD - Institut de recherche pour le développement a depuis lancé de nouvelles recherches avec le même objectif de qualifier les pierres gemmes par leur origine.

1.5 Gîtologie

Les gisements de tsavorite ont pour origine la convergence des deux supercontinents appelés «Gondwana de l'Est » et «Gondwana de l'Ouest » constitué des cratons du Kalahari et du Congo, il y a quelques 600 millions d'années. Avant que l'actuelle Afrique de l'Est ne se soulève sous l'action de la tectonique des plaques, une mer séparait ces supercontinents: l'océan du Mozambique. Sur le fond de cet océan s'étaient accumulés des sédiments argileux et organiques, riches notamment en vanadium et en chrome.

Lors de la convergence entraînant la fermeture de cet océan, la plaque du Gondwana de l'Est plongeant sous celle du Gondwana de l'ouest, a entraîné avec elle ces sédiments en profondeur. Les hautes pressions et températures, entre 650 et 700° C, générées par les mouvements tectoniques et l'enfouissement ont alors permis de créer des conditions de métamorphisme, propices à la cristallisation des grenats et à la transformation des roches sédimentaires en gneiss graphiteux. C'est ainsi que l'on retrouve aujourd'hui la tsavorite essentiellement dans ces gneiss, sous forme de nodules de 5 à 20 cm de diamètre, à l'intérieur de la ceinture métamorphique néoproterozoïque.

La tsavorite est exploitée dans des gisements primaires : soit sous la forme de nodules, soit au sein de veines de quartz ; ainsi que dans des gisements secondaires de type placer issus du démantèlement des formations minéralisées

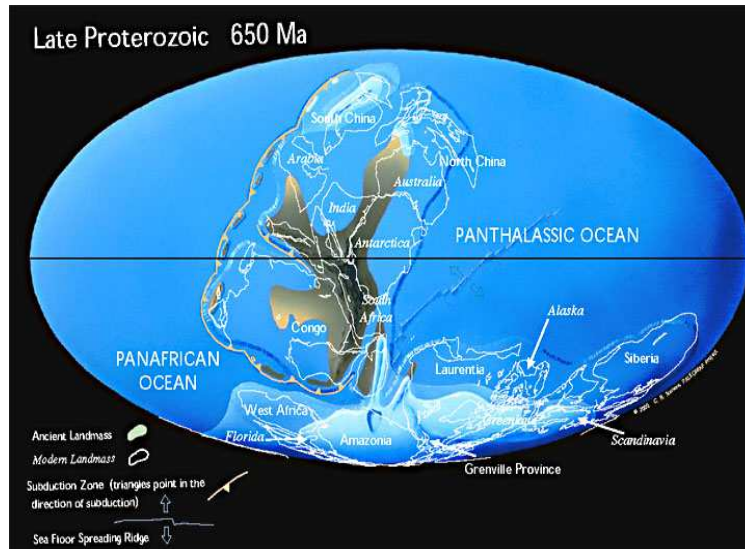
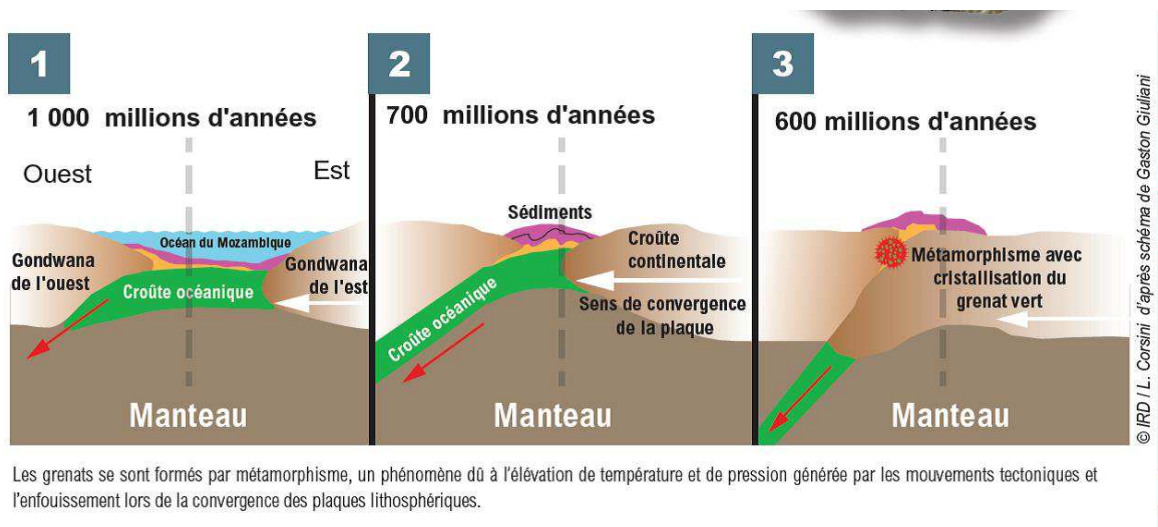


Figure 3 : Afrique de l'est : carte de la terre il y a 650 Ma, lors de la fermeture de l'océan mozambicain et de la collision continentale du Gondwana de l'est et les cratons du Kalahari et du Congo (C. Scotese)

Le Gondwana de l'ouest est constitué des cratons du Congo et du Kalahari, le Gondwana de l'est ou SLAMIN est constitué de la Somalie, des Seychelles, du Sri Lanka, de l'Antarctique de l'est, de Madagascar et de l'Inde.



Les grenats se sont formés par métamorphisme, un phénomène dû à l'élévation de température et de pression générée par les mouvements tectoniques et l'enfouissement lors de la convergence des plaques lithosphériques.

Figure 4 : Afrique de l'est : Schéma représentant dans le temps l'assemblage des deux Gondwana, celui de l'est s'enfonçant sous celui de l'ouest (IRD 2011)

En conclusion, les gisements de tsavorite se sont formés au cours du métamorphisme et de la métasomatose de séries sédimentaires silico-calcaires, enrichies en matière organique et à intercalations d'évaporites, et déposées au sein d'une plate-forme carbonatée associée à la formation d'une sabkha de côte marine sur la marge est des cratons du Congo et du Kalahari au Néoprotérozoïque.

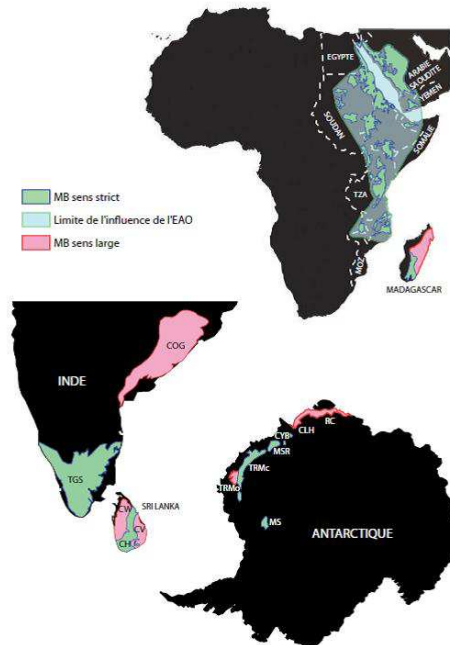


Figure 5 : Afrique de l'est : Proposition de localisation géographique actuelle de la ceinture métamorphique néoprotérozoïque mozambicaine (3)

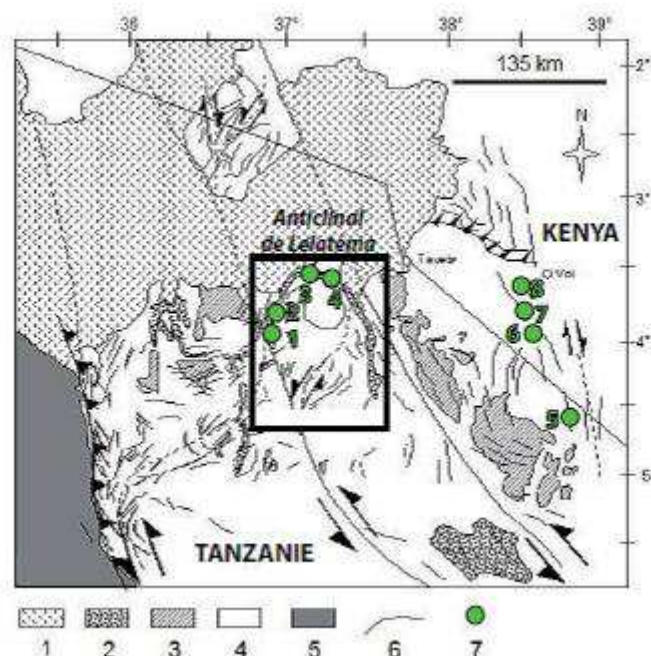
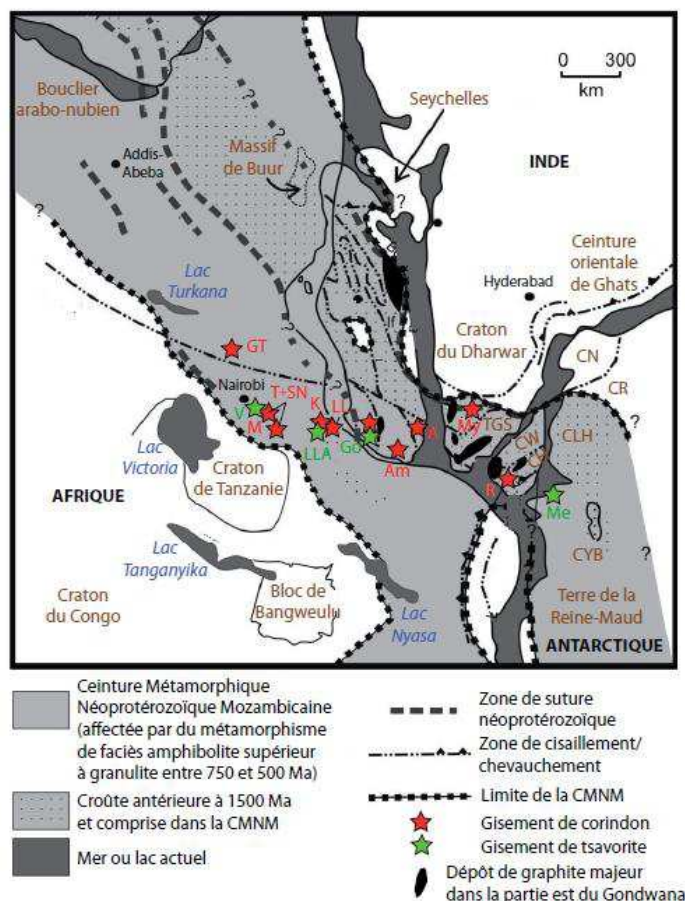


Figure 6 : Afrique de l'est : Carte géologique simplifiée du nord-est de la Tanzanie et du sud du Kenya avec la localisation des principaux gisements de tsavorite (modifiée d'après Le Goff et al., 2010)
 1 : formations volcaniques néogènes et quaternaires; 2 : roches métasédimentaires néoprotérozoïques; 3 : granulites; 4 : gneiss; 5 : gneiss archéens; 6 : foliation; 7 : gisements de tsavorite (1. Namalulu; 2. Lemshuku; 3. Merelani; 4. Moshi; 5. Uмба; 6. district minier de Kuranze; 7. mines de Baraka; 8. district minier de Mwatate).



1.6 Formation des tsavorites

L'étude pétrographique des gisements de tsavorite de Lemshuku et de Namalulu dans le nord-est de la Tanzanie a montré que les gneiss graphiteux et les roches calco-silicatées graphiteuses à tsavorite sont associés à des intercalations de méta-évaaporites, et sont surmontés par des marbres dolomitiques. La colonne lithostratigraphique relevée sur les deux gisements résulte du métamorphisme d'une formation sédimentaire enrichie en matière organique dans le faciès amphibolite supérieur à $P = 7,0 \pm 0,4$ kbar et $T = 677 \pm 14^\circ\text{C}$. Cet événement a été daté à 634 ± 22 Ma par la méthode U-Th-Pb sur monazites.

Le bâti métamorphique s'est refroidi entre 512 et 500 Ma d'après les datations ^{40}Ar - ^{39}Ar sur muscovites.

Les études sur l'ensemble des gisements a permis de déterminer que la formation des tsavorites s'est exprimée au cours de deux stades successifs de métasomatose, au cours des phases prograde puis rétrograde de métamorphisme dans le faciès des amphibolites.

- (1) les nodules de tsavorite se sont formés au cours du métamorphisme prograde jusqu'à $P = 5,0-7,4$ kbar et $T = 580-691^\circ\text{C}$ suite à une métasomatose de diffusion;
- (2) la tsavorite des veines de quartz a précipité au cours du métamorphisme rétrograde, pendant une métasomatose calcique d'infiltration, à $P = 3,6-4,9$ kbar et $T = 505-587^\circ\text{C}$. Les tsavorites des veines de quartz sont datées in situ par Sm-Nd à 606 ± 36 Ma. L'ensemble des éléments nécessaires à la formation de la tsavorite se trouve dans les roches graphiteuses à évaporites.

L'implication des évaporites, de nature continentale, est importante: elles sont directement transformées en tsavorite en fournissant le calcium dans le cas des nodules à partir d'anhydrite CaSO_4 , et les sels fondus forment des fluides qui mobilisent l'ensemble des éléments nécessaires à la cristallisation de la tsavorite dans les veines de quartz. Les minéralisations sont également contrôlées

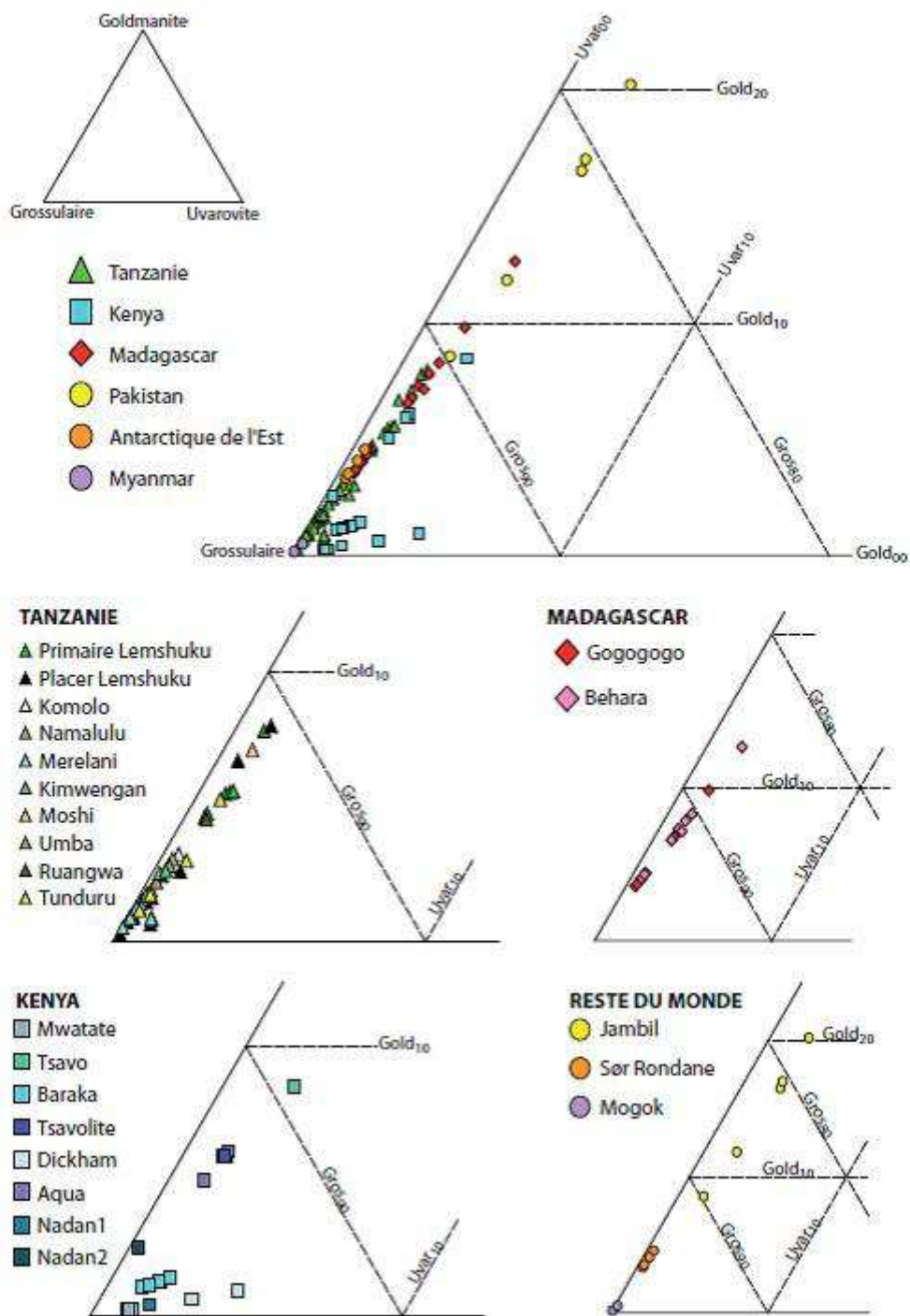


Figure 8 : Afrique de l'est : Diagrammes ternaires Grossulaire-Goldmanite-Uvarovite montrant la composition des tsavorites en fonction de leur provenance (3)

Jambil (Pakistan)
 Sor Rondane (Antarctique)
 Mogok (Birmanie)

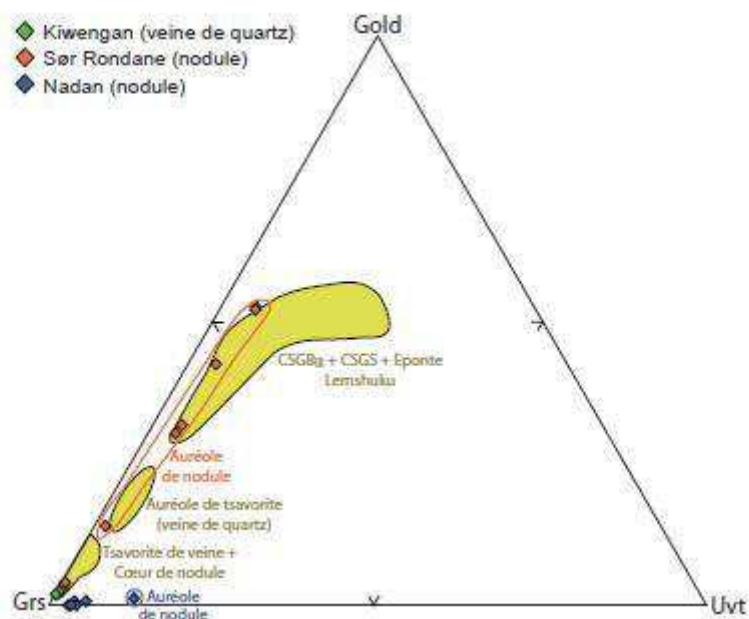


Figure 9 : Composition des tsavorites issues des différents gisements de tsavorite étudiés (3)

par la lithostratigraphie (gneiss graphiteux et roches calco-silicatées graphiteuses à évaporites) et la tectonique (structure de type 'saddle-reef').

1.7 Différentiation des tsavorites

Compte tenu de l'origine commune des tsavorites, il n'est pas commode de définir la provenance de telle ou telle pierre. Cependant, la nature même de la pierre provient de la roche mère à partir de laquelle la gemme a pu puiser ces constituants.

L'étude de J. Feneyrolle a porté sur la chimie, et plus particulièrement sur les rapports entre vanadium et chrome, quant à l'IRD, ils se sont focalisés sur les rapports isotopiques entre l'oxygène 18 et l'oxygène 16.

L'étude minéralogique de la tsavorite a permis de proposer un protocole pour certifier l'origine géographique des tsavorites, à partir des rapports V/Cr, de la teneur en manganèse et de la composition isotopique en oxygène.

1.7.1. Rapport isotopique O16/O18

L'étude de ce rapport isotopique a déjà montré toute son efficacité pour retracer l'origine des émeraudes, des rubis et des saphirs. Forts de leurs découvertes antérieures sur les autres gemmes, les chercheurs ont donc appliqué cette méthode d'analyse isotopique au grossulaire vert. Pour ce faire, ils ont collecté des échantillons dans 24 gisements, situés dans chacun des cinq pays où le minéral est exploité, et ont analysé le rapport des deux isotopes de l'oxygène, appelés « oxygène 18 » et « oxygène 16 ». À chaque gisement a ainsi pu être attribuée une valeur caractéristique de ce rapport, exprimé en pour mille (‰). Par exemple, les tsavorites provenant du nord de la Tanzanie affichent les valeurs les plus élevées, comprises entre 15 et 21 ‰, tandis que celles venant du sud du pays présentent des valeurs faibles, de 9 à 11 ‰ seulement.

Les grenats kenyans, malgaches, pakistanais ou antarctiques présentent un rapport isotopique intermédiaire, compris entre 11 et 15 ‰.

1.7.2. Analyse chimique V/Cr

C'est ensuite leur couleur, avec leur teneur en vanadium, chrome et manganèse, qui permet d'affiner la distinction des grenats de chacun de ces pays.

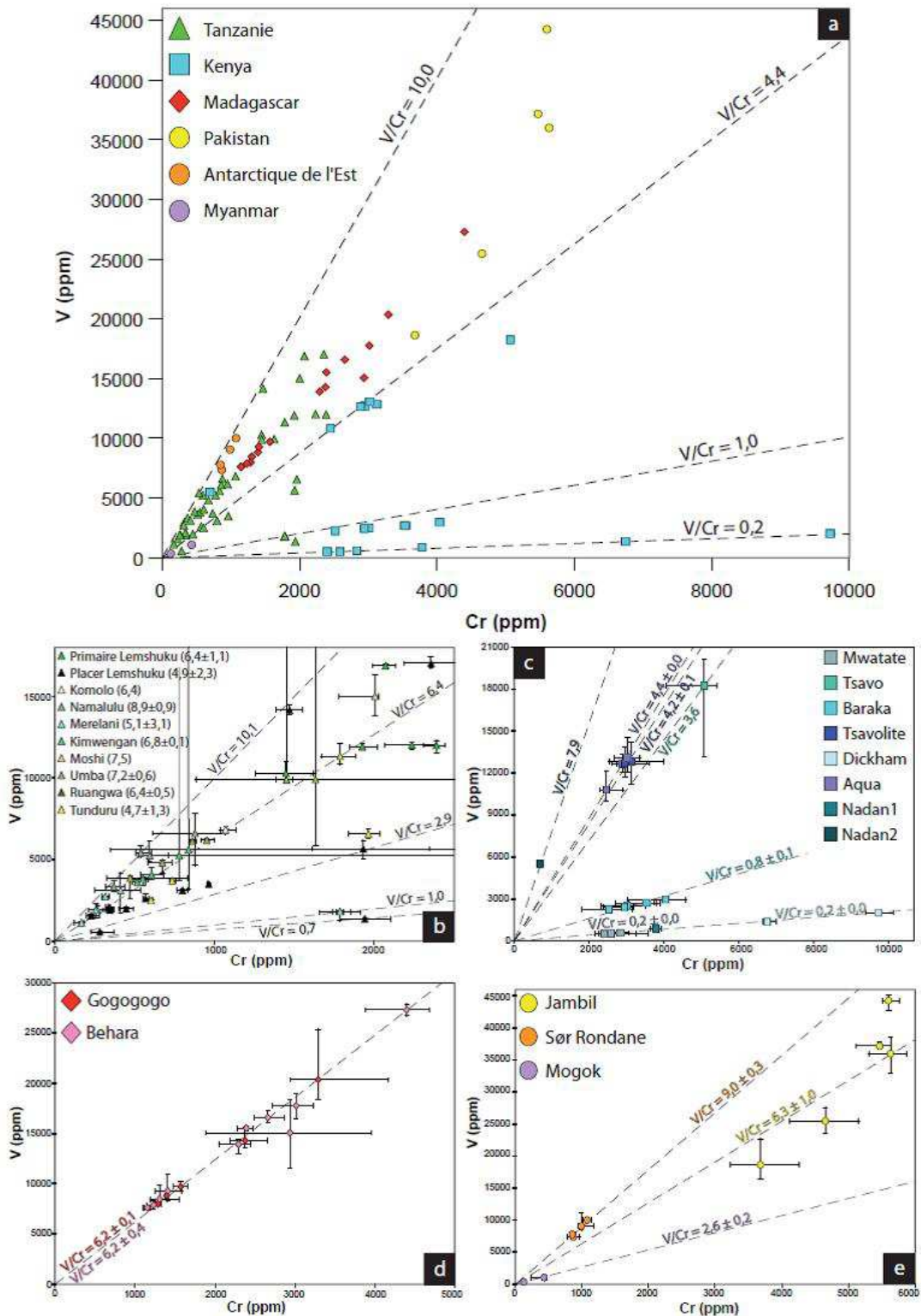


Figure 10 : Afrique de l'est : Diagrammes V en fonction de Cr montrant les rapports V/Cr des tsavorites
 a) Diagramme des tsavorites issues de l'ensemble des gisements étudiés
 b) Diagramme des tsavorites tanzaniennes.
 c) Diagramme des tsavorites kenyanes
 d) Diagramme des tsavorites malgaches.
 e) Diagramme des tsavorites provenant de Jambil, Sør Rondane et Mogok.

1.7.3. Conclusion

Nouvel arrivant sur le marché de la bijouterie, de la couleur de l'émeraude, avec une brillance et une dureté de très haut niveau, le grenat vert devient l'une des pierres les plus remarquables de la joaillerie. Mais pour accroître son potentiel commercial international, cette nouvelle gemme doit obtenir sa certification : autrement dit, on doit pouvoir tracer avec précision l'origine géographique de chaque pierre.

L'IRD et ses partenaires et l'Université de Lorraine ont démontré que les analyses isotopiques sur l'oxygène, fréquemment pratiquées en gemmologie et l'étude du rapport chimique V/Cr permettaient de bien distinguer les sites d'exploitation des tsavorites de la ceinture métamorphique néoprotérozoïque mozambicaine.

1.8 Tsavorites afghanes

Depuis la parution de ces études dans les années 2011-2013, d'autres gisements ont été découverts, notamment en Afghanistan.

Il est possible que les gisements afghans est la même origine que ceux découverts au Pakistan, puisque les sites pakistanais sont situés non loin de la frontière afghane.

Quoiqu'il en soit, leur genèse n'appartient pas à celle de la ceinture néoprotérozoïque mozambicaine puisque ces gisements ne sont pas situés le long de la ligne de subduction présentée dans ce tiré à part entre Gondwana de l'ouest et Gondwana de l'est. Il existe donc au moins un second mécanisme tectonique qui a permis la formation des grenats tsavorites.

En l'absence de bibliographie sur ces tsavorites afghano-pakistanaïses, il ne m'est pas possible de présenter les origines de leur formation.

Mais par analogie avec les tsavorites de l'Afrique de l'est dont le mécanisme est bien établi et présente probablement des conditions nécessaires à l'apparition des grenats verts, comme la présence de sédiments marins enrichis en matière organique contenant du chrome et du vanadium, puis un métamorphisme HP-HT (haute pression- haute température) que l'on trouve principalement lors de chevauchement de plaques continentales et enfouissement profond. Dans ce cas, les tsavorites d'Afghanistan pourraient datées de -400 Ma environ lors de la fermeture des océans paléozoïques et formation de la Pré-pangée.

Références

- (1) Les Gisements de Tsavorite au Kenya - Projets de recherche - Les activités - Kenya - IRD - Sites de représentation - IRD - [www_kenya_ird_fr.htm](http://www.ird.fr/la-mediathèque/fiches-d-actualite-scientifique/371-vers-une-certification-du-grenat-vert-est-africain)
- (2) <http://www.ird.fr/la-mediathèque/fiches-d-actualite-scientifique/371-vers-une-certification-du-grenat-vert-est-africain>, Vers une certification du grenat vert est-africain, IRD, Rédaction DIC — Gaëlle Courcoux
- (3) Pétrologie, géochimie et genèse des gisements de tsavorite associés aux gneiss et roches calcosilicatées graphiteux de Lemshuku et Namalulu, Tanzanie par [Julien Feneyrol](#) Soutenue le 16-02-2012 à l'[Université de Lorraine](#)



Photo 1 : tsavorites : tsavo, kenya – Afghanistan

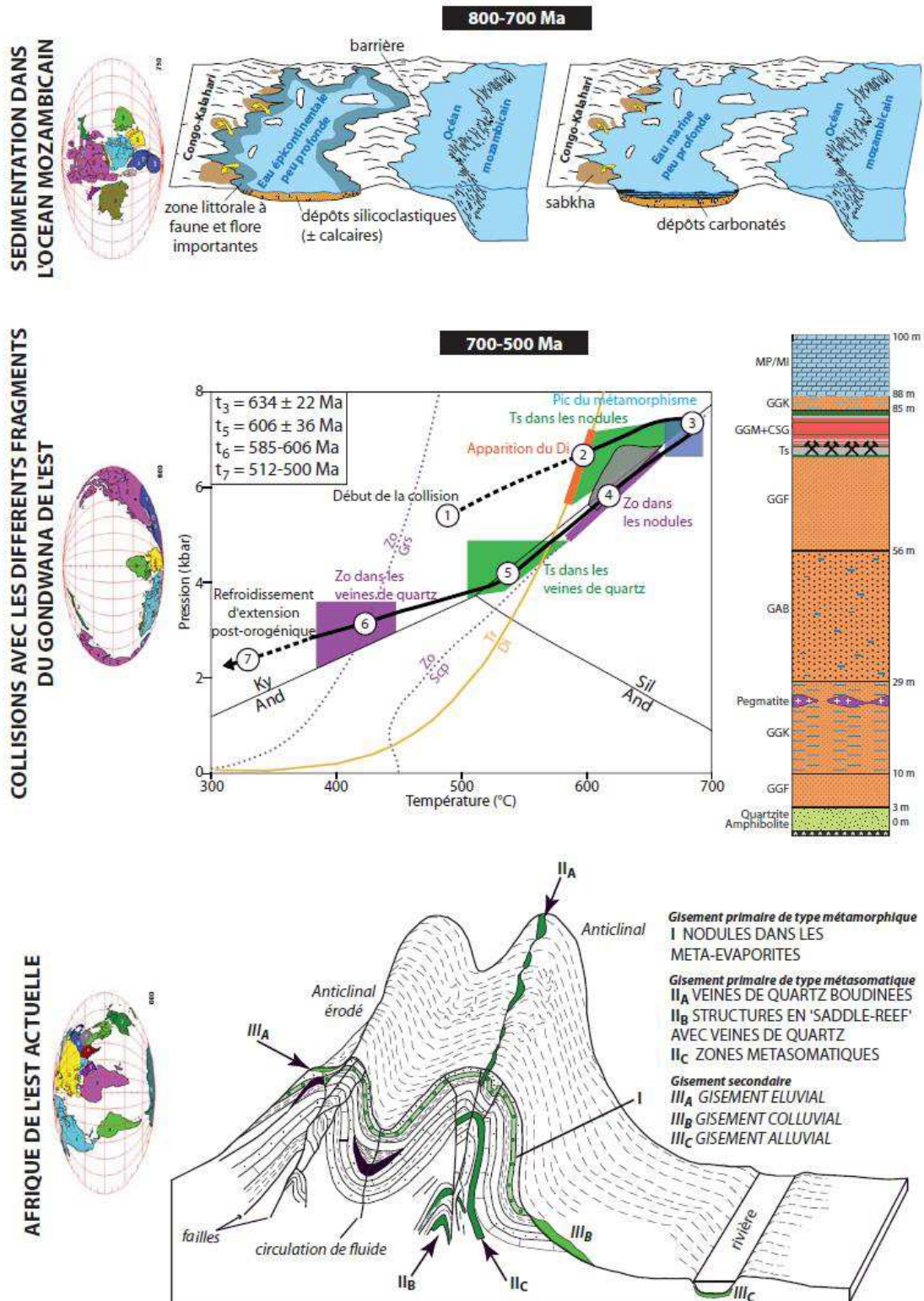


Figure 11 : Afrique de l'est : Modèle génétique de genèse des gisements de tsavorite associés aux gneiss graphiteux (3)

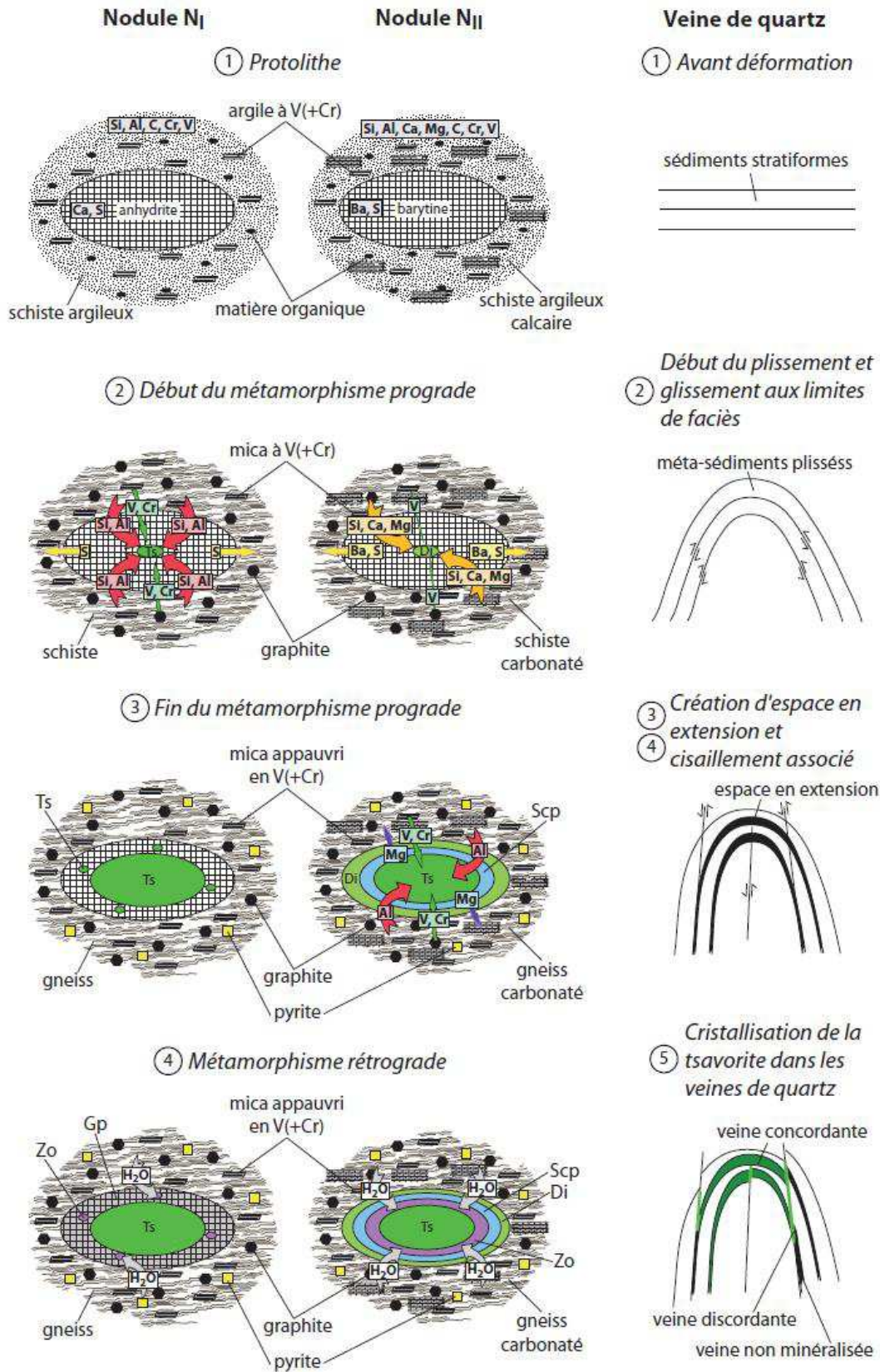


Figure 12 : Modèle métallogénique de formation de la tsavorite des nodules et schéma de formation des minéralisations à veine de quartz (3)