

le Règne **M**inéral

Minéralogie - Géologie - Paléontologie



NUMERO

55

Janvier
Fevrier
2004

SAPHIRS & RUBIS

*Classification
des Gisements de Corindon*

Les gisements de corindon : classification et genèse

Virginie GARNIER¹⁾, Gaston GIULIANI^{2,3)}, Daniel OIHENSTETTER¹⁾, Dietmar SCHWARZ³⁾

1 : CRPG/CNRS, BP 20, 15 rue Notre Dame Des Pauvres, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France.

2 : IRD, Département Milieux et Environnement, 213 rue Lafayette, 75480 Paris, France.

3 : Gübelin Gemmological Laboratory, 102 Mühlhofstrasse, CH-6000 Lucerne 9, Suisse.

Résumé : Le corindon est constitué d'aluminium et d'oxygène, éléments très abondants dans la croûte terrestre. Cependant, si le corindon est si rare, c'est parce qu'il ne cristallise que dans des environnements géologiques pauvres en silicium, qui est également très abondant sur Terre.

Le rubis, rouge à rose, est la variété chromifère du corindon alors que les autres variétés colorées sont des saphirs. La plus grande partie des rubis et saphirs disponible sur les marchés aux gemmes est issue de l'exploitation de gisements secondaires, les placers, formés par l'altération, le plus souvent en milieu tropical humide, de gisements primaires.

Selon le contexte géologique dans lequel ils se développent – magmatique ou métamorphique – les gisements primaires de corindon se subdivisent en deux groupes. Les gisements magmatiques contenus dans des basaltes représentent la principale source mondiale de saphirs bleus, verts et jaunes. Les gisements métamorphiques sont contenus dans des roches-hôtes variées et de degrés de métamorphisme contrastés. Parmi ces gisements, ce sont les marbres qui constituent la plus importante source de rubis, à l'image des fameux rubis couleur "sang de pigeon" de Mogok au Myanmar (ex-Birmanie). Ils se rencontrent depuis l'Afghanistan en Asie Centrale, jusqu'au Viêt-nam en Asie du Sud-est. Les autres gisements ont pour roches-hôtes des gneiss, des anatexites, des granulites et des roches mafiques à ultramafiques. Enfin, des gisements de rubis et saphirs peuvent être spatialement reliés à la mise en place de pegmatites et/ou de granitoïdes dans des marbres ou dans des roches mafiques à ultramafiques. C'est notamment le cas des fameux gisements de Sunjam au Cachemire.

Les gisements secondaires sont sédimentaires, d'origine détritique. Plusieurs types se distinguent : les placers éluviaux, alluviaux et les cordons littoraux. Dans le premier cas, la roche-mère des corindons est proximale et connue. Les autres types de placers peuvent se former par remaniement de paléoplacers, et la roche-mère de corindons est difficile à déterminer : on renferme des gemmes de différentes origines géologiques. L'étude des caractéristiques gemmologiques, des inclusions fluides et solides des gemmes, ainsi que leur signature géochimique et isotopique, permet souvent de remonter à leur origine géologique.

Abstract : Corundum is composed of aluminium and oxygen, elements which are both among the most abundant elements in the Earth's crust. Corundum crystallises only in silica-depleted geological environments. However, silica is also an abundant element in the Earth and thus gem corundum is very rare.

Ruby is the chromiferous variety of corundum, with red to pink colour. Sapphires are the other coloured varieties. Most of the rubies and sapphires for sale on the international gem markets come from the exploitation of secondary deposits (placers), formed by the weathering of primary deposits, commonly in tropical and rainy environments.

The primary deposits can be divided into two groups, depending on their geological setting – magmatic or metamorphic. Basalt-hosted deposits represent the main source in the world of blue, green and yellow sapphires. The metamorphic deposits are hosted by different kinds of rocks of variable grade of metamorphism. Among these deposits, marbles represent the most important source of ruby, such as the famous pigeon-blood-coloured rubies from Mogok in Myanmar (ex-Burma). They are encountered from Afghanistan in Central Asia to Northern Vietnam in South-east Asia. The other metamorphic deposits are hosted by gneisses, anatexites, granulites and mafic to ultramafic rocks. Finally, the formation of ruby and sapphire deposits is also linked to the intrusion of pegmatites and/or granitoids in marbles or in mafic to ultramafic rocks, like the famous Kashmiri sapphire deposits of Sunjam.

The secondary deposits are sedimentary and of detrital origin. Several types are distinguished : eluvial and alluvial placers and beach ridges. The minerals contained in eluvial placers are not or little transported and the mother-rocks of the gemstones can thus be constrained. In the other cases, the placers can form by the weathering of paleoplacer and transport of the minerals. Sometimes, gemstones coming from several types of deposits are mixed in a single basin. The study of the gemmological characteristics, the solid and fluid inclusions as well as the geochemical and isotopic signatures of the gemstones might be tools for the determining of their geological origin.

Mots-clés : typologie de gisements – rubis – saphir – gisements primaires – placers – métamorphisme – magmatisme – métasomatisme – genèse – tectonique des plaques

Key-words : deposits typology – ruby – sapphire – primary deposits – placers – metamorphism – magmatism – metasomatism – genesis – plate tectonics

INTRODUCTION

Le terme corindon vient du Sanskrit "kuruvinda" qui signifie "pierre dure", devenu en langage populaire dravidien ("kurund" toujours appelé Kurund en Allemand) puis transcrit "corindon" en Occident. Ce terme pourrait aussi avoir pour origine le mot tamoul "kurmidam" (Anthony et al., 1997). Le corindon est un oxyde d'aluminium, sa formule chimique est Al_2O_3 (Al = 52,91 % et O = 47,09 %). Il cristallise dans la classe $\bar{3}2/m$ du système rhomboédrique. Les cristaux automorphes peuvent présenter des faces qui correspondent à sept formes cristallines (Cesbron et al., 2002) : le pinacoïde {00.1}, les prismes hexagonaux de premier ordre {10.0} et de second ordre {11.0}, le prisme hexagonal {hk.0}, la dipyramide hexagonale {hh.l}, le scalénoèdre ditrigonal {hk.l} et le

rhomboèdre {h0.l}. Dans certains cas, le corindon cristallise en une morphologie particulière dénommée "trapiche", formée de six bras squelettiques et de six secteurs de croissances (Garnier et al., 2002). Le corindon présente une gamme de couleurs très variées : depuis l'incolore lorsqu'il est chimiquement pur, jusqu'à des couleurs allant du rouge "sang de pigeon" (rubis de Mogok, Myanmar) au bleu profond (saphir du Cachemire), en passant par toute une gamme de jaunes, oranges, roses ou violets. Ces couleurs sont liées à la présence d'impuretés appelées "éléments chromophores" qui se substituent à l'aluminium dans le réseau cristallin. Ces éléments chromophores sont des ions métalliques appartenant à la famille des éléments de transition. La couleur rouge du rubis est notamment liée à la présence de chrome, la couleur bleue du saphir à la présence de fer et titane.

Le corindon gemme a fait l'objet de plusieurs travaux de référence en minéralogie (Cesbron *et al.*, 2002) et en gemmologie (Bariand et Poirot, 1985 ; Weise, 1998). L'ouvrage de Hughes (1997) présente une synthèse complète sur la minéralogie du corindon, sur l'économie du corindon gemme et ses traitements, et répertorie l'ensemble des gisements connus dans le monde pour lesquels une classification génétique est proposée. Par ailleurs, Thémelis (1992) consacre un ouvrage aux traitements du corindon gemme.

La plupart des gemmes disponibles sur le marché international sont issues des gisements de type marbre pour les rubis et de type basalte pour les saphirs bleus, verts et jaunes. Certains de ces gisements ont fait l'objet d'études détaillées, comme les gisements de Mogok au Myanmar et de Jegdalek en Afghanistan : ces deux gisements historiques, peu accessibles pour des raisons politiques ou de conflit, ont été décrits respectivement par Iyer (1953), qui fut le premier géologue à cartographier et étudier les gisements de Mogok, et Bowersox et Chamberlin (1995) qui détaillèrent les gisements afghans déjà cités par le voyageur al-Biruni au XI^{ème} siècle. Les gisements de saphirs bleus, verts et jaunes, associés aux basaltes australiens ont fait l'objet de nombreuses études par l'équipe de l'Australian Museum de Sydney (Sutherland, 1996 et Sutherland *et al.*, 2003). De même, l'intérêt économique suscitait par les saphirs bleus et le saphir "padparadscha" du Sri Lanka, a poussé les équipes universitaires Cinghalaises à une recherche intensive sur la genèse et la prospection de ces gisements (Rupasinghe et Dissanayake, 1985). Dans d'autres cas, l'inventaire systématique des minéraux de provinces gemmifères a permis de recueillir d'importantes données sur les corindons, notamment à Madagascar (Lacroix, 1922).

Le corindon cristallise de manière privilégiée dans des environnements appauvris en silice et enrichis en alumine. En présence de silice, l'aluminium est préférentiellement incorporé dans des minéraux plus courants comme les silicates d'alumine, les feldspaths et les micas. Les paragenèses de corindon sont essentiellement constituées de minéraux alumineux : plagioclase, saphirine, phlogopite, silicates d'alumine, etc. Le corindon est théoriquement incompatible avec le quartz. Cependant, un assemblage métastable à quartz et corindon en contact mutuel a été signalé dans un porphyre quartzifère de Tasmanie ayant subi une argilisation hydrothermale prononcée (Bottrill, 1998).

La rareté des corindons gemmes résulte de la nécessité d'un environnement non seulement appauvri en silice et enrichi en alumine, mais aussi la présence de chromophores (Cr pour le rubis, Fe et Ti pour le saphir) et de conditions de température et de pression adéquates pour leur cristallisation (Muhlmeister *et al.*, 1998). Les corindons se rencontrent dans des roches variées : marbres, gneiss, roches mafiques et ultramafiques, syénites... Les marbres forment un environnement dépourvu de silice et d'alumine, contrairement aux gneiss. Dès lors, le transport de l'alumine par une phase fluide semble nécessaire à la cristallisation du corindon alors que l'aluminium est réputé inerte. De même, la source des chromophores peut être énigmatique dans de nombreux gisements, notamment pour ceux qui se développent dans des marbres. Dans les roches métamorphiques, le corindon cristallise dans des conditions de pression et de température très variées : il peut se former aussi bien dans les sols bauxitiques lors d'incendies de forêt (à très haute température) que dans des conditions qui permettent la présence de diamants en inclusions dans les cristaux de corindons (Dao *et al.*, 1996) !

Il existe peu de données relatives aux gisements primaires de corindons gemmes. En effet, les plus célèbres ne sont pas toujours accessibles, pour des raisons de conflits ou d'instabilité politique (par exemple, les gisements du Cachemire et d'Afghanistan, lire LRM n° 46,

p. 28-29). En outre, la plupart des études sont menées à des fins économiques et restent confidentielles (Malik, 1994). Notons qu'une grande partie des travaux relatifs aux corindons gemmes sont des travaux de gemmologie où le contexte géologique et les mécanismes de formation des gisements ne sont pas réellement abordés. Ainsi, dans la littérature, on ne trouve que très peu de données sur le contexte tectonique dans lequel les gisements se sont formés, sur l'origine des chromophores ou encore sur les conditions thermodynamiques de leur genèse (Okrush *et al.*, 1976 ; Mercier *et al.*, 1999). Relativement peu d'études isotopiques sur les corindons ont été réalisées (Gauthier *et al.*, 1995 ; Pomian-Srzednicki, 1997 ; Upton *et al.*, 1999 ; Yui *et al.*, 2003). Les gisements dans les basaltes constituent, avec les placers, la plus importante source de corindon gemme, et ont, de ce fait, été étudiés de manière plus exhaustive. De nombreux auteurs se sont intéressés à leurs mécanismes de formation (Coenraads *et al.*, 1990, 1995 ; Levinson et Cook, 1994 ; O'Reilly et Zhang, 1995 ; Guo *et al.*, 1996a, 1996b ; Sutherland et Coenraads, 1996 ; Sutherland *et al.*, 1998a, 1998b ; Limkatrun *et al.*, 2001 ; Sutherland et Schwarz, 2001 ; Suthirat *et al.*, 2001) et les ont datés (Coenraads *et al.*, 1990 ; Guo *et al.*, 1992 ; Coenraads *et al.*, 1995) par les méthodes U-Pb et traces de fission sur zircons ainsi que la méthode K-Ar sur les basaltes. Pour les gisements métamorphiques, encore peu de données géochronologiques (Paquette *et al.*, 1994 ; Garnier, 2003) sont disponibles.

CLASSIFICATION DES GISEMENTS PRIMAIRES

Plusieurs classifications typologiques des gisements de corindon ont déjà été proposées :

1. Classification basée sur l'habitus des corindons

Ozerov (1945) a émis l'hypothèse que l'habitus du corindon dépend à la fois du milieu chimique et des conditions thermodynamiques dans lesquels celui-ci a cristallisé. Les cristaux tabulaires sont présents dans des roches métamorphiques contenant des silicates d'alumine (sillimanite, andalousite ou disthène). Les roches ignées alcalines et les marbres contiendraient des cristaux rhomboédriques, pyramidaux ou prismatiques.

2. Classification basée sur le contexte géologique des gisements

Hughes (1990, 1997) classe les gisements d'après le contexte géologique dans lequel ils se sont formés :

- dans des roches ignées intrusives (Yogo Gulch, Montana, États-Unis) ou extrusives (basaltes alcalins),
- dans des roches issues du métamorphisme régional ou de contact (par exemple, les gisements dans les marbres comme au Myanmar, ou au Nord du Viêt-nam),
- dans un contexte géologique mixte (migmatites, granulites et charnockites),
- et les gisements alluviaux et éluviaux formés par le remaniement de gisements primaires.

3. Classification basée sur la lithologie des roches-hôtes

La classification de Schwarz (1998) est basée sur la lithologie des roches encaissant les corindons : basaltes alcalins (Asie du Sud-est, Australie, Thaïlande, Chine), marbres (Mogok, Myanmar ; la Vallée d'Hunza, Pakistan), skams (Andranondambo, Madagascar), pegmatites (vallée de l'Umba, Tanzanie), amphibolites (Longido au Nord de la Tanzanie, Groënland, Finlande), gneiss (Russie ; Mysore, Inde ; la ceinture métamorphique de Hida, Japon) et autres roches métamorphiques plus rares (anateksites à disthène-corindon-phlogopite de Ngorongoro, Tanzanie).

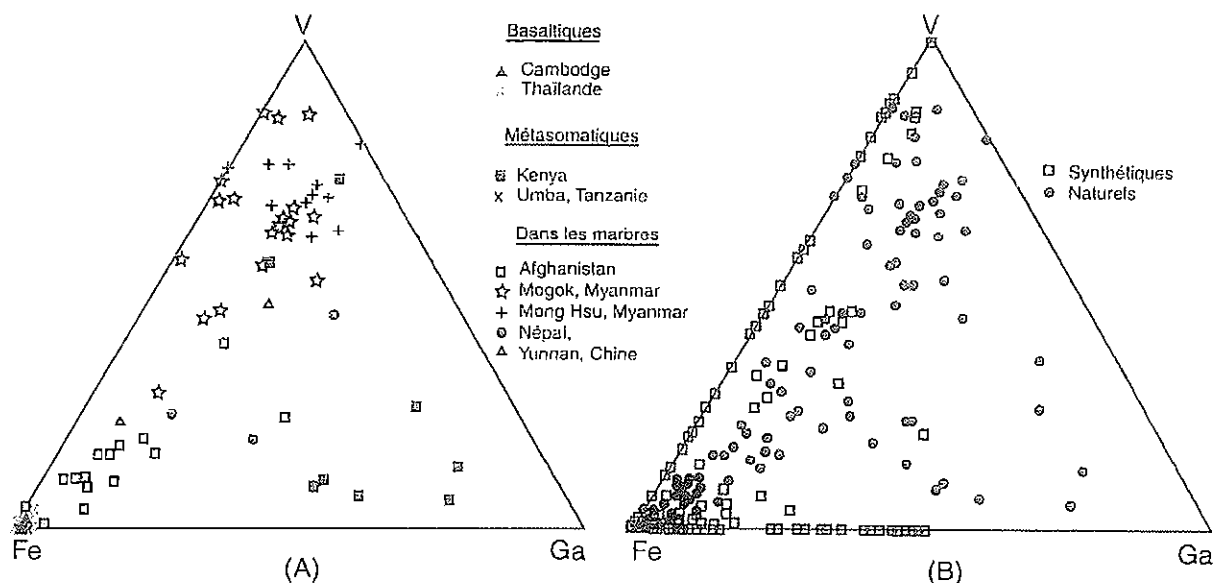


Fig. 1 : Composition chimique des rubis synthétiques et naturels. Diagrammes ternaires Gallium (Ga) - Vanadium - Fer (Fe) montrant la répartition : (A) des rubis naturels issus de différents types de gisements et (B) des rubis synthétiques et naturels (d'après Muhlmeister et al., 1998). Les valeurs reportées correspondent aux proportions de Ga_2O_3 , V_2O_5 et FeO en % poids

4. Classification des rubis selon leur composition chimique

En se basant sur les différences de composition chimique des rubis analysée par fluorescence X, Muhlmeister et al. (1998) classent les gisements de rubis en trois catégories : les gisements basaltiques, les gisements dans des marbres et les gisements métasomatiques (incluant les gisements d'Umba, Tanzanie et du Kenya). Les teneurs en éléments traces (Fe, V, Ga et Ti) varient d'un type de gisement à l'autre (figure 1). Les rubis provenant de gisements basaltiques (Thaïlande et Cambodge) sont riches en fer et pauvres en vanadium et en gallium. Les rubis provenant de marbres (Afghanistan, Myanmar, Népal et Chine) sont riches en vanadium et pauvres en gallium et en fer (excepté ceux d'Afghanistan). Etant donnée la grande variabilité de leurs roches-hôtes, les rubis métasomatiques présentent des teneurs en éléments-traces disparates. Ils permettent également de distinguer les rubis synthétiques des naturels : la présence de Mo, La, W, Pt, Pb ou Bi dans un rubis prouve qu'il est d'origine synthétique. En outre, bien que la présence d'un seul élément-trace dans un rubis ne suffise pas à indiquer une origine naturelle, la chimie et la quantité des éléments-traces permettent de distinguer presque toutes les origines : cependant une expertise doit combiner ces observations chimiques avec les observations gemmologiques standards (Muhlmeister et al., 1998). Pour réaliser une classification des gisements de rubis d'après les caractéristiques chimiques des gemmes, il serait nécessaire d'étudier plusieurs échantillons de chaque gisement.

5. Classification basée sur les processus génétiques de formation des gisements

Simonet (1997, 2000) subdivise les gisements de corindons gemmes en quatre catégories : les gisements "magmatiques", les gisements "métamorphiques", les gisements "volcaniques" et les gisements secondaires. Il considère deux types de métamorphisme : le métamorphisme général isochimique (gneiss granulitiques et charnockites à corindon du Sri Lanka, marbres à corindon de l'Oural, d'Afghanistan et du Pakistan ou encore les amphibolites à rubis de Longido en Tanzanie) et le métamorphisme métasomatique (Andranondambo, Madagascar ; vallée de l'Umba, Tanzanie ; les gisements du Cachemire...). Il s'agit d'une classification pertinente

basée sur une synthèse bibliographique exhaustive de tous les gisements, et notamment ceux associés aux basaltes. Cependant, les mécanismes mis en jeu dans la genèse des rubis restant encore mal définis pour de nombreux gisements, il est parfois difficile de distinguer l'importance et le rôle joué par les deux types de métamorphisme, d'autant plus qu'il semble que certains gisements, comme ceux de Mogok au Myanmar, se soient formés au cours d'épisodes métamorphiques successifs (Kammerling et al., 1994).

UNE NOUVELLE CLASSIFICATION BASEE SUR LA LITHOLOGIE DES ROCHES-HOTES DES CORINDONS

Les mécanismes physico-chimiques intervenant dans la genèse des corindons restant encore mal connus, une revue générale des caractéristiques géologiques et géochimiques des gisements est proposée, à partir d'une classification fondée sur la nature du type de gisement et sur la lithologie des roches-hôtes des corindons. Cette classification a été réalisée à partir d'une synthèse bibliographique exhaustive et de nos travaux de recherche sur les gisements de rubis et de saphirs de l'Asie Centrale et de l'Asie du Sud-Est.

Ainsi, les gisements peuvent être classés en deux grands types : primaires et secondaires.

Les gisements primaires se subdivisent ensuite en deux sous-groupes, selon qu'ils se développent en contexte magmatique ou métamorphique. Ici seront considérés comme gisements primaires, tout gisement où les corindons sont trouvés soit dans la roche dans laquelle ils ont cristallisé, soit dans la roche qui les a transportés depuis leur lieu de cristallisation dans la croûte terrestre jusqu'à la surface de la Terre.

Les gisements secondaires sont sédimentaires, d'origine détritique. Ils correspondent à l'accumulation, dans des bassins d'extension très variable, de matériaux issus des gisements primaires, remaniés par l'érosion. Ces matériaux sont transportés sur des distances plus ou moins importantes, essentiellement par les cours d'eau.

LES GISEMENTS EN CONTEXTE MAGMATIQUE S. S.

De nombreux gisements de corindon gemme se trouvent dans des roches magmatiques intrusives ou volcaniques.

1. Les gisements dans des roches intrusives mafiques

Le gisement de saphirs de Yogo Gulch, Montana (États-Unis ; figure 2), tout comme celui de Loch Roag en Ecosse (Jackson, 1984), est un exemple typique de gisement igné in-situ. A Yogo Gulch, le gisement est formé par un système de filons de lamprophyre ultramafique et de brèches hydrothermales dans lesquels sont disséminés les saphirs (Hughes, 1997). Ces derniers recoupent des calcaires et des shales ayant subi un faible métamorphisme de contact lors de la mise en place de ces filons. Les teneurs en saphir du filon principal sont très variables et peuvent atteindre 70 carats par tonne (ct/t). Celles des brèches hydrothermales minéralisées atteignent 5 ct/t. Par ailleurs, quelques petits gisements secondaires (placers) sont reliés à l'altération météorique des filons minéralisés (Mychaluk, 1995).

prismes rhomboédriques terminés par un pinacoïde basal (figure 3 : Clabaugh, 1952 ; Hughes, 1990 ; DelRe, 1994). Cependant, la plupart des cristaux n'ont conservé que peu de caractéristiques de leur habitus originel : ils sont arrondis, corrodés, érodés ou brisés. Ces modifications de la forme des cristaux ont été expliquées par la résorption des corindons dans le magma (Clabaugh, 1952 ; Dahy, 1988 ; Gauthier et al., 1995) et par l'abrasion mécanique des cristaux lors de la mise en place des dykes (Mychaluk, 1995).

La roche-hôte des saphirs est constituée de mégacristaux de phlogopite et de diopside dispersés dans une matrice de phlogopite, clinopyroxène, calcite, analcime, magnétite et apatite. Les minéraux accessoires incluent spinelle et saphirs (Gauthier et al., 1995). Brownlow et Komorowski (1988) décrivent la présence de mégacristaux d'olivine, de titano-augite, d'hypersthène, de xénolithes de cumulats formés à partir d'un magma parent ; localement, la texture est miarolitique ou ocellaire. Cette roche est un lamprophyre alcalin qui ne correspond pas exactement à une des variétés connues de lamprophyres (Meyer et Mitchell, 1988) : elle présente à la fois des caractéristiques de monchiquites (Brownlow et Komorowski, 1988) et d'ouachitites (Clabaugh, 1952).

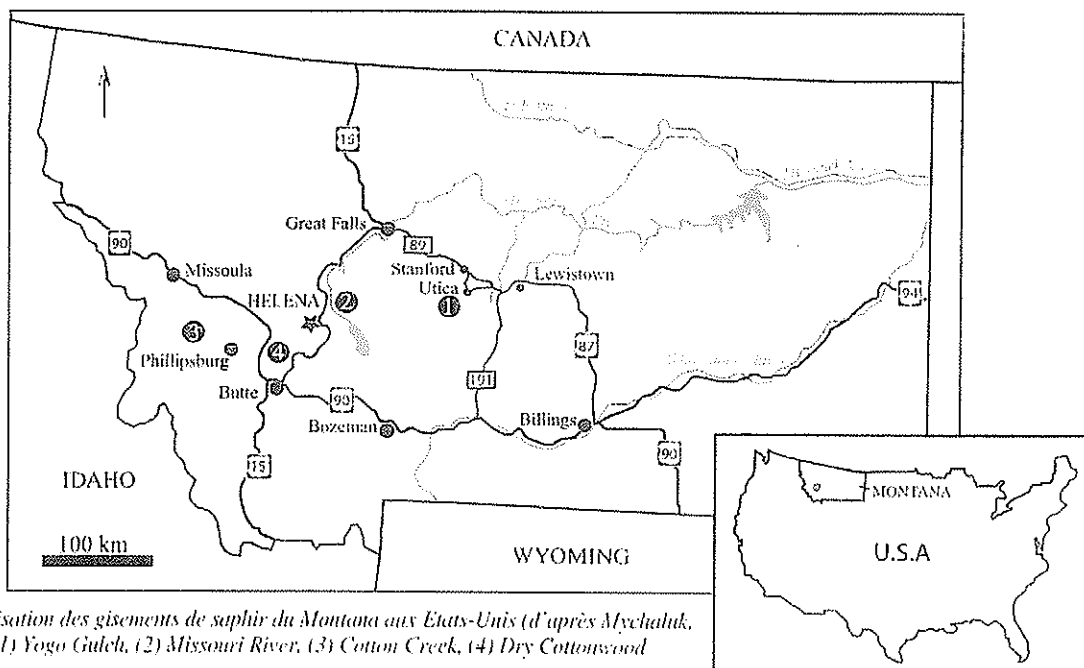


Fig. 2 : Localisation des gisements de saphir du Montana aux États-Unis (d'après Mychaluk, 1995) : (1) Yogo Gulch, (2) Missouri River, (3) Cotton Creek, (4) Dry Cottonwood

Ces saphirs sont célèbres pour leur couleur bleue de bleuet ("cornflower blue") homogène, la rareté de leurs inclusions, l'absence générale de zonation ainsi que leur brillance à la lumière artificielle comme à la lumière naturelle (Mychaluk, 1995). Environ 97% des saphirs sont bleus, les autres ont des couleurs variant du violet au pourpre. Gübelin et Koivula (1986) ont remarqué la présence de petites inclusions de pyrite, de mica noir, de calcite et d'analcime. Les cristaux ont l'aspect de courts

Plusieurs hypothèses sont proposées quant au mode de formation de ce gisement. Clabaugh (1952) suggère l'assimilation, en profondeur, de roches sédimentaires ou métamorphiques fortement alumineuses, permettant la cristallisation tardive du saphir. De nombreux indices supportent l'hypothèse que les corindons de ce gisement soient des xéocristaux préalablement formés en base de croûte au cours d'un événement métamorphique ou lors de la cristallisation d'un magma plus ancien, puis ramenés à la surface lors de la montée du magma lamprophyrique (Meyer et Mitchell, 1988 ; Mychaluk, 1995). Brownlow et Komorowski (1988) proposent la séquence suivante : (1) formation d'un magma fortement alumineux par fusion partielle de roches mantelliques localement enrichies en aluminium ; (2) différenciation magmatique avec cristallisation des saphirs et des cumulats d'olivine et de diopside ; (3) injection dans la croûte d'une partie de ce magma plus ou moins solidifié, suivie par la corrosion des saphirs alors en déséquilibre avec le liquide résiduel ; (4) fractionnement du liquide résiduel en une phase liquide silicatée et une phase gazeuse ; (5) injection explosive du dyke avec une bréchification et une altération hydrothermale intense. Ce mécanisme permet d'expliquer plusieurs caractéristiques des roches remplissant les filons.

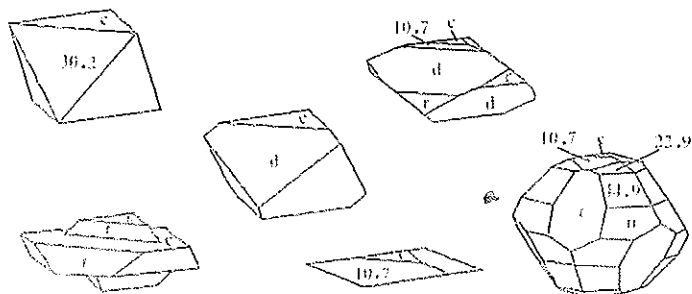


Fig. 3 : Habitus des saphirs de Yogo Gulch, Montana (d'après Hughes, 1997) : r = rhomboédrique {10.1}, c = pinacoïde {00.1}, d = rhomboédrique {10.2} et n = bipyramide hexagonale de second ordre {22.3}

comme la présence de cumulats et de xénolithes, la texture ocellaire d'une grande partie de ces roches et l'aspect corrodé des saphirs. Les simulations numériques de la cristallisation du magma de Yogo Gulch ont également conforté que le corindon n'a pas pu directement cristalliser à partir de ce magma (Mychaluk, 1995).

2. Les gisements dans des basaltes

Des corindons gemmes sont fréquemment trouvés dans des basaltes et dans des dépôts alluviaux et éluviaux provenant de l'altération de ces basaltes. C'est le cas des gisements de la ceinture à corindons de l'Est de l'Australie, qui s'étend depuis le Queensland au Nord jusqu'à la Tasmanie au Sud (Oakes et al., 1996 ; Sutherland, 1996 ; Sutherland et Coenraads, 1996) ; en Asie (figure 4), des gisements de Mingxi, Province de Fujian (Keller et Keller, 1986), de Changle, Province de Shandong (Guo et al., 1992) et de Penglai, île de Hainan en Chine (Furui, 1988), des provinces de Binh Thuan, Lam Dong, Dong Nai et Dak Lak dans le Sud du Viêt-nam (Smith et al., 1995 ; Poirot, 1997 ; Garnier, 2003), de Pailin, Cambodge (Lacombe, 1970 ; Jobbins et Berrangé, 1981), des provinces de Chanthaburi-Trat, Kanchanaburi (Vichit et al., 1978 ; Suttthirat et al., 2001) et de Denchai dans la province de Phrae en Thaïlande (Limkatrun et al., 2001) ; en Afrique, les gisements de saphirs de Cyanguu dans le Sud-Ouest du Rwanda (Krzemnicki et al., 1996), de la région de Kivu dans la République Démocratique du Congo (Frazier et Frazier, 1990), de la région de Turkana dans le Nord du Kenya (Barot et al., 1989 ; Keller, 1992), de la Province de Kaduna au Nigéria (Irving et Price, 1981 ; Kiefert et Schmetzer, 1987), de la région de Mamfe au Cameroun (Lettermann et Schubnel, 1970), dans le massif volcanique de l'Atakor au Sahara algérien (Conquéré et Girod, 1968), du massif de l'Aïr au Niger (Carbonel et Robin, 1972) et de la région d'Ambondromifehy, province d'Antsiranana, Madagascar (Schwarz et al., 2000) ; en Europe, le gisement d'Espaly près du Puy-en-Velay, en France (Carbonel et al., 1973 ; Forestier, 1993), dans le massif de l'Eifel en Allemagne (Hochleitner, 1998), des gisements alluviaux de Jizerská Louka et Trebívlice-Ceské en République Tchèque et du gisement de Wileza Poreba en

Pologne (Maliková, 1999), de Loch Roag en Ecosse (Upton et al., 1983) ; de la région de Mercaderes - Rio Mayo en Colombie (Keller et al., 1985).

2.1 Caractéristiques remarquables

Ces gisements présentent des caractéristiques communes :

- Ils se trouvent généralement dans des basaltes alcalins (sauf pour les gisements du Sud de la Chine et du Niger : Coenraads et al., 1990) intraplaques.
- Les basaltes renferment souvent des xénolithes ultramafiques, ce sont essentiellement des lherzolites mantelliques (Coenraads et al., 1990). Le corindon est fréquemment associé avec la pyrrhotite, le clinopyroxène, le zircon, le spinelle riche en fer et parfois la saphirine (Muhlmeister et al., 1998). Les xénocristaux de corindon renferment de nombreuses inclusions solides de nature variée (Guo et al., 1996a). Ce sont majoritairement des oxydes, notamment de la columbite et de l'uranpyrochlore. Ils renferment également des silicates comme le zircon et les feldspaths, et plus rarement quelques sulfures. Ces inclusions minérales sont souvent riches en Zr, Nb, Hf, Ta et en éléments lithophiles (U, Th).
- Les corindons et les mégacristaux qui leur sont associés présentent des figures de corrosion (Coenraads et al., 1990 ; Sutherland et Coenraads, 1996). Les cristaux ont le plus souvent une forme de barillet ; les corindons présents dans les dépôts alluviaux sont brisés mais certains conservent leurs formes cristallines originelles (Guo et al., 1996a).

Au sein d'une même province gemmifère, on observe des variations de couleur des gemmes sur des distances inférieures à 10 km, ce qui suggère l'existence de sources multiples (Coenraads et al., 1990 ; Sutherland et al., 1998b). Sutherland et al. (1998b) et Sutherland et Schwarz (2001) ont mis en évidence, en se fondant sur l'étude des teneurs en éléments-traces des gemmes, l'existence de deux suites de corindons dans les provinces du New South Wales et de Victoria en Australie (figure 5), de Kanchanaburi /Bo Rai et Nam Yuen en Thaïlande et de Pailin au Cambodge. Les corindons dits "métamorphiques" sont riches en chrome et pauvres en gallium, ont un rapport

Cr_2O_3/Ga_2O_3 supérieur à 3 et sont de couleurs variées, allant de couleurs pastels (bleu pâle, rose, orange) au rouge rubis ; ils renferment des inclusions solides de spinelle chromifère, pléonaste, diopside et saphirine. Les corindons dits "magmatiques" mais d'origine non basaltique car transportés sous la forme de xénocristaux, sont plus riches en Ga, ont un rapport Cr_2O_3/Ga_2O_3 inférieur à 1 et sont généralement verts, jaunes ou bleus ; ils renferment de l'hercynite et hercynite-magnétite en inclusion, de même que des aiguilles d'oxydes de Fe et Ti et du zircon. Ces auteurs proposent des mécanismes de formation différents pour ces deux types de corindons.

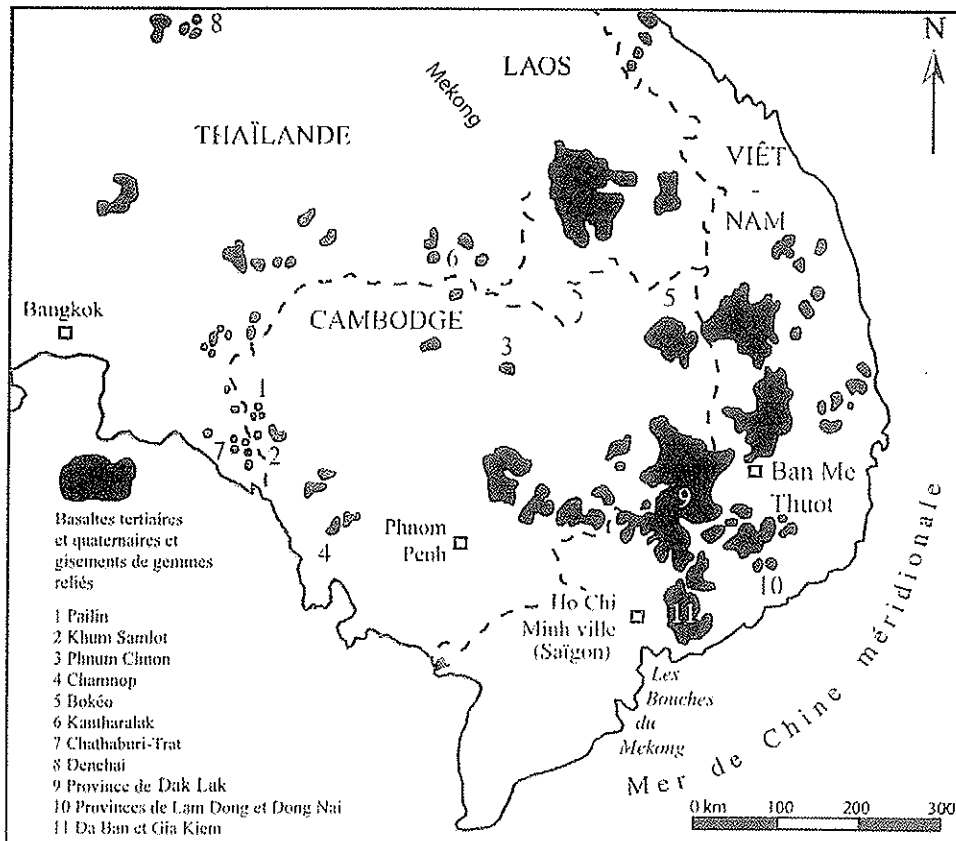


Fig. 4 : Basaltes d'âges tertiaires et quaternaires du sud-est asiatique et les gisements de saphirs associés (modifié d'après Jobbins et Berrangé, 1981)

Les corindons des basaltes



Le placer à saphir de Dak Nong en 2001, découvert en 1991 et abandonné en 2000. Province de Dak Lak, Sud du Viêt-nam. Photo : G. Giuliani.



Saphirs de couleur des gisements basaltiques de Gloucester Tops, volcan de Barrington en Australie. Photo : L. Sutherland.



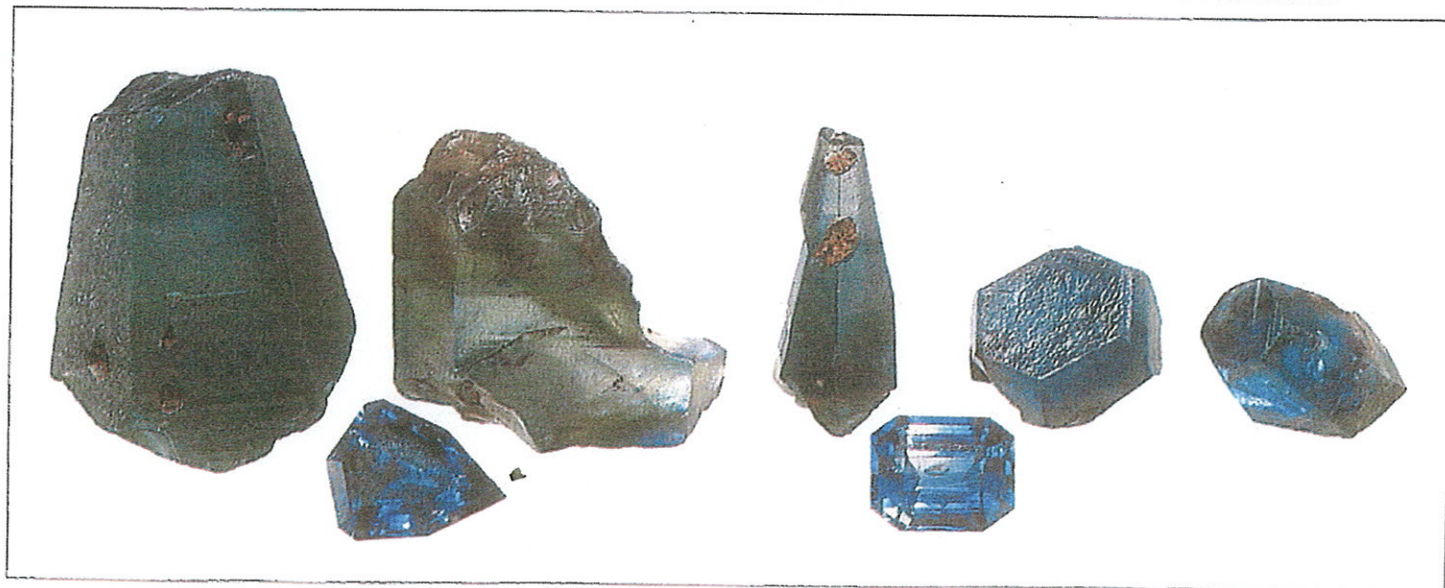
Corindon avec des figures de corrosion formées au cours de son transport par le magma basaltique. Placer de Binh Thuan, province de Lam Dong, Sud du Viêt-nam. Photo : G. Giuliani.



Cristal pierreux de corindon en forme de barillet. Placer de Binh Thuan, Sud du Viêt-nam. Photo : G. Giuliani.



Cristal de saphir en forme de barillet provenant du placer de Binh Thuan, Sud du Viêt-nam. Photo : G. Giuliani.



Saphirs des éluvions/colluvions du Coupet, d'origine basaltique (B. Devouard, com. pers.)
Cristal de gauche : 1,2 x 0,8 x 0,8 cm, pierre facettée de gauche : 5 x 4 mm
Saint-Eble, Haute-Loire (France) - Ancienne collection Jean Béhier (cf. LRM N° 39) - Photo : L.-D. Bayle

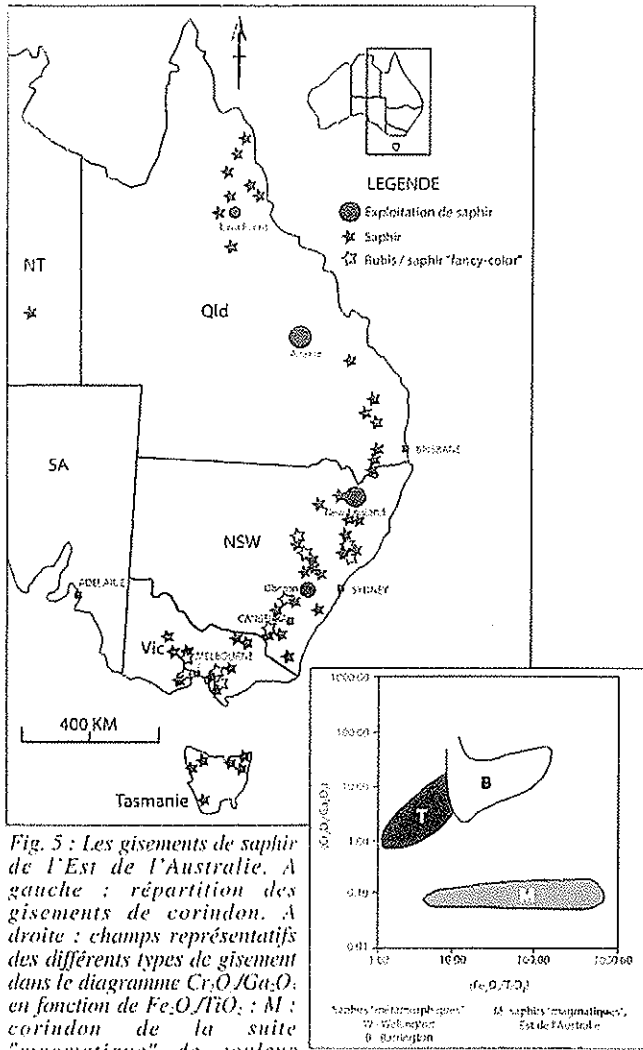


Fig. 5 : Les gisements de saphir de l'Est de l'Australie. A gauche : répartition des gisements de corindon. A droite : champs représentatifs des différents types de gisement dans le diagramme Cr₂O₃/Al₂O₃ en fonction de FeO/Al₂O₃. M : corindon de la suite "magmatique" de couleur bleue, verte et jaune ; B, W et T représentent les corindons de la suite "métamorphique" (d'après Sutherland et Schwarz, 2001)

2.2 Contexte géologique

Les contextes géologiques dans lesquels ces gisements se développent diffèrent selon les aires géographiques.

Les gisements du Nigéria et du Cameroun sont associés au rift de la province volcanique de Guinée, qui se prolonge au Nord par les plateaux basaltiques de l'Aïr et du Hoggar - gisements d'Algérie et du Niger (Wright *et al.*, 1985). Les gisements rwandais, congolais et kenyans sont associés au grand Rift Est Africain (Simonet, 2000).

Les gisements du Massif Central en France sont situés immédiatement dans le prolongement sud du graben de la Limagne (Merle *et al.*, 1998).

Dans le cas de l'Australie, il est généralement accepté que les volcans centraux sont de plus en plus jeunes vers le Sud. Cette variation enregistrée au cours des derniers 35 Ma suggère la migration vers le Nord de la plaque Indo-Australienne au-dessus d'un panache mantellique. Les grandes provinces basaltiques (70-14 Ma) ont été initiées par la remontée d'une région mantellique anormalement chaude le long de l'Australie. Cette région à haut gradient géothermique peut être génétiquement liée à l'extension induite par l'ouverture de la mer de Tasmanie et/ou la fracturation du Gondwana à la fin du Mésozoïque (O'Reilly et Zhang, 1995).

En ce qui concerne le contexte géologique de mise en place des basaltes en Asie du Sud-est, les auteurs ne sont pas tous d'accord. Levinson et Cook (1994) pensent que les basaltes alcalins de Thaïlande, du Cambodge et du Viêt-nam se mettent en place en liaison avec la subduction de la plaque de l'Océan Indien sous la plaque eurasiennne.

Barr et McDonald (1979) proposent un amincissement crustal avec une remontée du manteau pour expliquer les éruptions volcaniques basaltiques de Thaïlande. Barr et McDonald (1981), Whitford-Stark (1987) et Hoang et Flower (1998) considèrent que le volcanisme intraplaque Néogène à Quaternaire, omniprésent en Asie du Sud-Est et formant des plateaux basaltiques, est associé à des bassins en "pull-apart" et des rifts. Cette activité magmatique est postérieure à la collision Inde-Asie et peut être reliée aux processus d'extrusion tectonique de la péninsule indochinoise (Tapponnier *et al.*, 1982 ; 1986).

2.3 Mécanismes de formation

Plusieurs équipes australiennes et canadiennes (Coenraads *et al.*, 1990 ; Levinson et Cook, 1994 ; Sutherland et Coenraads, 1996 ; Guo *et al.*, 1996a) ont essayé de déterminer l'origine des corindons. Tous s'accordent sur le fait que ces corindons sont des xéno cristaux : des études expérimentales mettent en évidence que ces minéraux, ainsi que leurs inclusions solides de zircon et de columbite, ne peuvent pas cristalliser à partir d'un magma basaltique alcalin (Levinson et Cook, 1994 ; Guo *et al.*, 1996a). Les figures de corrosions observées sur les cristaux indiquent une résorption des corindons par le magma basaltique alcalin, ce qui prouve qu'ils n'étaient pas en équilibre avec le magma qui les a transportés. Selon Sutherland *et al.* (1998a), ces figures de corrosion ne sont pas suffisantes pour affirmer que les corindons sont des xéno cristaux car ces figures sont parfois observées sur des phénocristaux d'olivine, pyroxène et plagioclase où elles résultent de changements de pression et de température.

Les xéno cristaux peuvent avoir plusieurs origines :

A - Métamorphique, d'origine crustale :

Levinson et Cook (1994) proposent un modèle simple de genèse de ces gisements en deux étapes (figure 6) :

Étape 1 : genèse des corindons. Ils se forment au cours du métamorphisme de roches alumineuses (shales, équation 1) ou à partir d'oxydes d'aluminium concentrés (bauxite, équation 2), dans la croûte terrestre à des profondeurs comprises entre 20 et 50 km.

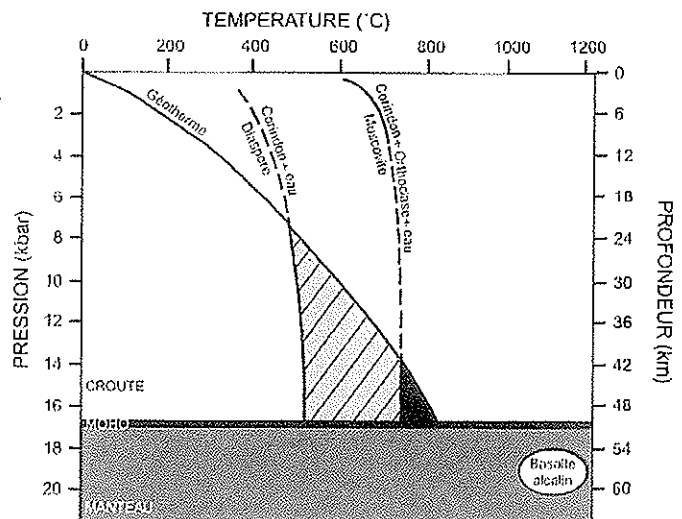
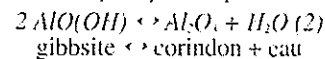
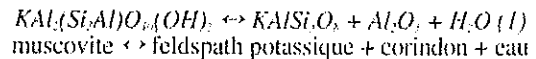


Fig. 6 : Modèle de genèse des corindons contenus dans les basaltes alcalins d'après Levinson et Cook (1994) - Conditions Pression-Température (P-T) de genèse des corindons à partir de diaspore (champ hachuré) ou de muscovite (champ noir) et de genèse des basaltes alcalins

Étape 2 : transport des corindons à la surface. Lors de sa remontée rapide vers la surface, le magma généré dans le manteau incorpore des xéno lithes à corindon. Ces

xénolithes se dissolvent et libèrent les minéraux réfractaires (principalement les corindons et les zircons) qui sont amenés à la surface par le magma basaltique alcalin.

Ce modèle pose le problème de l'existence d'un protolithe aluminieux de type bauxitique ou latéritique, commun à la surface de la terre, dans le plancher océanique subducté. Ensuite, une zone de subduction a effectivement été active avant l'extension crustale en Australie, mais ce n'est pas le cas en Afrique de l'Est ni en Asie du Sud-Est (Saminpanya, 2000), où ce modèle est inadapté.

B - Ignée : dans ce cas, plusieurs mécanismes sont proposés.

- Selon Irving (1986), les corindons sont issus de la cristallisation, à haute pression, de magmas felsiques sous-saturés, ce qui rejoint l'hypothèse d'Aspen et al. (1990) qui pensent que les corindons proviennent de la cristallisation de magmas syénitiques issus de la croûte ou du manteau supérieur.

- Coenraads et al. (1990) proposent que les corindons se sont formés à partir de magmas riches en éléments volatiles et en éléments incompatibles issus de la fusion partielle mantellique à faible taux de fusion, ce qui pourrait expliquer qu'ils ne sont pas en équilibre avec des magmas issus de fusions partielles plus importantes, comme en témoignent les figures de corrosion affectant la surface des gemmes. Coenraads et al. (1995) proposent que les saphirs des gisements d'Australie et de Thaïlande ont cristallisé à partir de magmas phonolitiques à des pressions correspondant à celles de la limite manteau-croûte et que les événements thermiques qui ont généré ces magmas sont intrinsèquement liés aux processus qui ont gouverné la genèse et l'éruption des magmas basaltiques alcalins contenant les corindons.

- A partir de l'étude des inclusions solides des corindons issus de gisements australiens, chinois, thaïlandais, américains et kenyans, Guo et al. (1996a) suggèrent que les corindons se forment par mélange et/ou interaction entre des carbonatites et un système de composition alcaline ou hyperalcaline, à l'état magmatique ou solide (un granite alcalin ou une pegmatite syénitique). Au cours d'un événement extensif lié à la remontée de l'asthénosphère, des carbonatites cristallisent dans la croûte entre 10 et 20 km de profondeur ; elles sont localement recoupées par des intrusions de syénites et des granitoïdes. Les processus d'hybridation entre ces deux systèmes peuvent provoquer la cristallisation rapide de corindons, pouvant aboutir à la formation de lentilles de roches renfermant des corindons et à minéralogie complexe reflétée par la diversité des inclusions solides piégées par ces corindons. Plus tard, un épisode de volcanisme basaltique est généré par fusion du manteau. Le magma basaltique remonte rapidement vers la surface en entraînant des fragments de roches encaissantes, dont les lentilles à corindons (figure 7). Ce modèle est complexe et nécessite la coïncidence de plusieurs événements magmatiques successifs, il semble donc inadapté pour expliquer la présence de gisements basaltiques dans des zones géographiques étendues et dispersées sur le globe. Enfin, Sutherland et al. (1998a) rejettent ce modèle, car dans les gisements du grand rift est-africain, les corindons se trouvent généralement dans les basaltes alcalins périphériques et non pas dans les associations de roches ultramafiques/carbonatites du soulèvement central contrairement à ce qui est suggéré par ce modèle.

- Sutherland (1996) propose que les corindons se forment lors de la cristallisation de magmas felsiques alcalins produits par fusion de la lithosphère métasomatisée. Sutherland et Coenraads (1996), étudiant des assemblages à rubis-saphir-saphirine-spinelle présents dans les formations alluviales à corindon de Barrington en Australie, proposent que la fusion de roches ultramafiques à hautes températures et pressions, lors de l'intrusion de magmas basaltiques, peut produire des petits volumes de

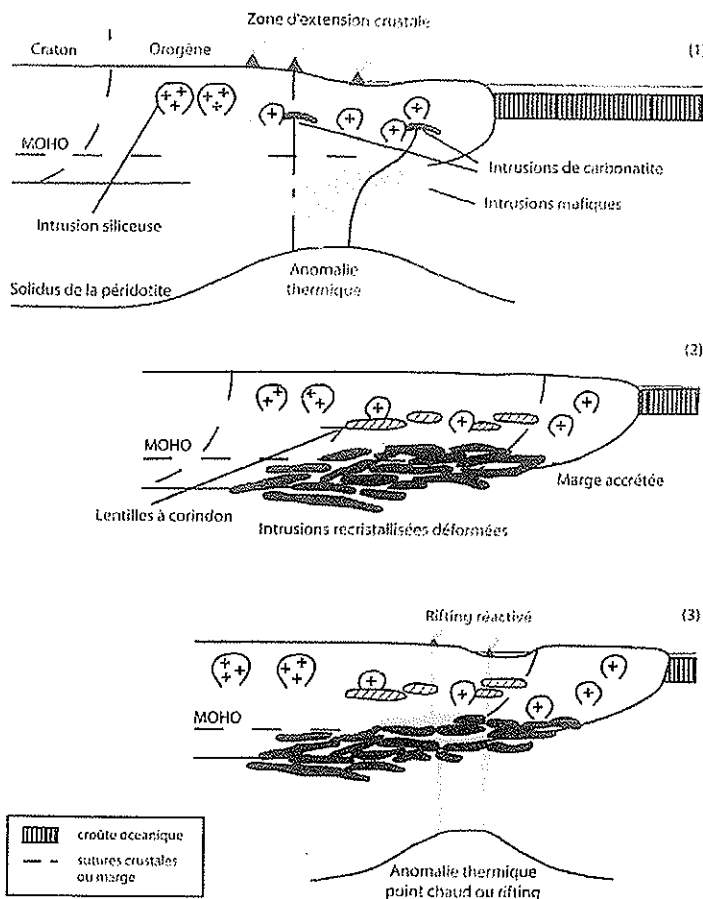


Fig. 7 : Modèle génétique pour la formation des basaltes alcalins à saphir de Guo et al. (1996a) – Schéma illustrant le modèle proposé pour expliquer la formation des gisements de corindon associés aux basaltes (modifié d'après Griffin et O'Reilly, 1987 dans Guo et al., 1996a). (1) : Cristallisation de carbonatites, localement recoupées par des intrusions de syénites, dans un contexte tectonique d'extension crustale. (2) : Les processus d'hybridation entre ces deux systèmes mènent à la formation de lentilles à corindon. (3) : Plus tard, un magma basaltique alcalin se forme par fusion du manteau et entraîne dans sa remontée vers la surface des fragments de lentilles à corindons.

magmas anatectiques capables de cristalliser ces assemblages à minéraux aluminieux et réfractaires. La fusion de phases accessoires riches en Cr, comme du spinelle chromifère ou de la chromite, peut contribuer à concentrer localement le Cr, permettant aux rubis et saphirs de cristalliser ensemble en grains millimétriques.

Sutherland et al. (1998a) proposent un modèle en quatre étapes (figure 8) pour la formation des saphirs "magmatiques" est-australiens, dérivé du modèle de Guo et al. (1996a). Dans ce modèle, la lithosphère se déplace au-dessus d'un diapir mantellique. Le faible taux de fusion initiale va générer des magmas felsiques riches en volatiles, dans les parties de la lithosphère riches en amphiboles, permettant notamment la cristallisation de corindon et de zircon. Ces magmas peuvent également dériver d'un manteau enrichi en amphibole et mica ou d'un manteau pré-enrichi en composants felsiques, entre 45 et 90 km de profondeur. Lorsque la lithosphère arrive à l'aplomb du diapir, des taux de fusion partielle plus importants produisent des magmas basaltiques alcalins qui arrachent et transportent les assemblages à corindons. Lorsque la lithosphère s'éloigne du diapir, les taux de fusion diminuant peuvent à nouveau mener aux conditions nécessaires à la cristallisation de corindon et de zircon. Ce modèle permet d'expliquer l'enrichissement en Hf, Nb et Ta généralement observé dans les minéraux co-génétiques du corindon, les veines à amphiboles des xénolithes péridotitiques étant très enrichies en ces éléments (Sutherland et al., 1998b).

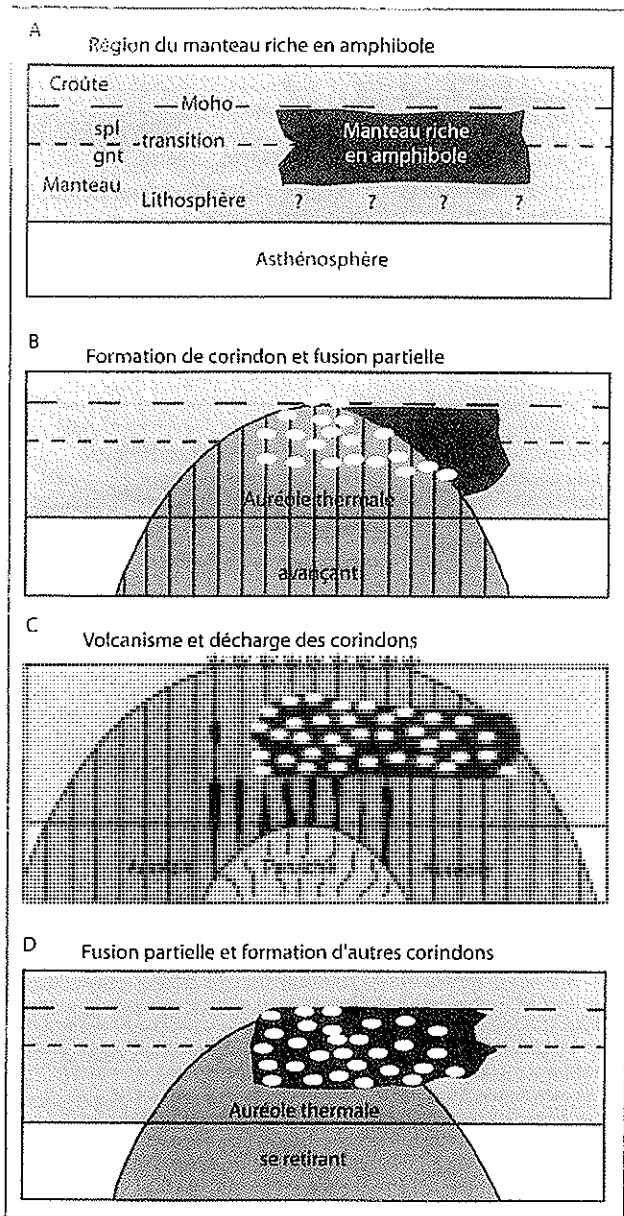


Fig. 8 : Modèle génétique établi par Sutherland *et al.* (1998a).
Diagramme des étapes successives proposées
pour la formation des gisements de corindon dans les basaltes
(gnt = grenat ; spl = spinelle)

Des considérations thermodynamiques sur la stabilité des assemblages minéraux rencontrés dans les gisements de Chanthaburi-Trat en Thaïlande, indiquent des températures de cristallisation des corindons comprises entre 800 et $1150 \pm 100^\circ\text{C}$ et des pressions allant de 10 à 25 kbar, impliquant des profondeurs de 35 à 88 km (Suthirath *et al.*, 2001).

Saminpanya (2000) propose un modèle permettant d'expliquer que dans les gisements thaïlandais de Chanthaburi-Trat et de Kanchanaburi, rubis et saphirs sont toujours associés. Les rubis se sont formés dans des roches métamorphiques mafiques (clinopyroxénite à rubis et grenat ou pyroclase à rubis et grenat) : leur formation est probablement liée à l'intrusion d'un basalte ou d'un gabbro dans une péridotite mantellique. Les saphirs se sont formés lors de l'intrusion d'un magma très différencié dans des roches de base de croûte (probablement des gneiss précambriens) donnant des syénites néphéliniques, des carbonatites et des gabbros. Ce processus a probablement été la conséquence du rifting qui a affecté la Thaïlande au Tertiaire. Au Néogène, lors de l'extension crustale, des basaltes alcalins se sont formés et sont remontés dans des fractures crustales, sous l'effet de la remontée de

l'asthénosphère, arrachant des xénolithes à corindon le long des conduits (Saminpanya, 2000).

3. La syénite de Garba Tula, Kenya

Le gisement de Garba Tula (figure 9) a été découvert par des bergers nomades dans les années soixante. Les séries volcaniques tertiaires et quaternaires de la Chaîne de Nyambene se développent sur un substratum formé de migmatites à hornblende et de gneiss à biotite (Simonet, 2000).

Le gisement de saphir se présente sous la forme d'une veine feldspathique subverticale, de puissance métrique et d'extension horizontale pluri-kilométrique, d'orientation N-S. La veine est constituée de cristaux de mica noir dispersés dans une matrice feldspathique leucocrate à grain grossier. Les corindons y sont dispersés ou regroupés en nids. La roche a une texture équate, mais localement, elle présente de minces zones mylonitisées et des porphyroblastes de feldspath déformés. Il s'agit d'une syénite à corindon hyperalumineuse, pauvre en silice. Les saphirs sont massifs, de taille allant du millimètre à la dizaine de centimètres, parfois en forme de barillets et de couleurs allant du bleu sombre au jaune en passant par le vert. Ils sont riches en fer (entre 0.95 et 1.13 % poids FeO) et pauvres en titane (< 0.04 % poids TiO_2). Les cristaux de corindon n'ont piégé que du zircon sous forme d'inclusions solides : ils sont souvent recoupés par des micro-veinules feldspathiques. Ces observations mettent en évidence que le gisement est magmatique et soulignent l'hypothèse que le corindon était la première phase à cristalliser (Simonet, 2000).

Le gisement de Garba Tula partage des caractéristiques pétrologiques communes avec les gisements basaltiques : la couleur et l'habitus des saphirs, le magmatisme alcalin (même si dans les cas des gisements basaltiques, les corindons n'ont pas cristallisé dans le basalte alcalin). Ces similitudes suggèrent un possible lien entre la genèse des saphirs basaltiques et ce type de syénite à corindons. Par ailleurs, Upton *et al.* (1999) ont décrit des xénolithes de syénite aluminieuse à anorthose et corindons incolores à bruns dans des filons basaltiques, à Loch Roag et Riddon's Point en Ecosse, renforçant ainsi l'hypothèse d'un lien génétique entre syénites à corindon et saphirs basaltiques.

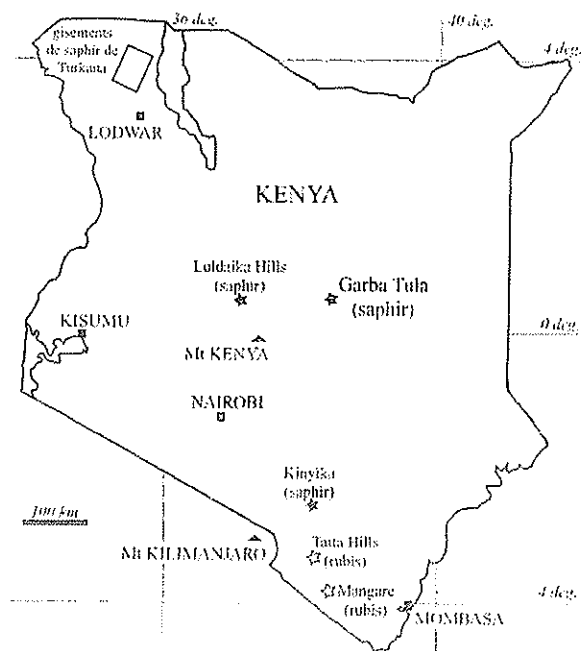


Fig. 9 : Localisation du gisement de Garba Tula et de quelques autres gisements majeurs de corindons du Kenya (d'après Simonet, 2000)

Les corindons des roches métamorphiques



Saphirs bruts et taillés des gisements de Sunjam au Cachemire, Inde
Photo : H. Hämmi, SSEF.



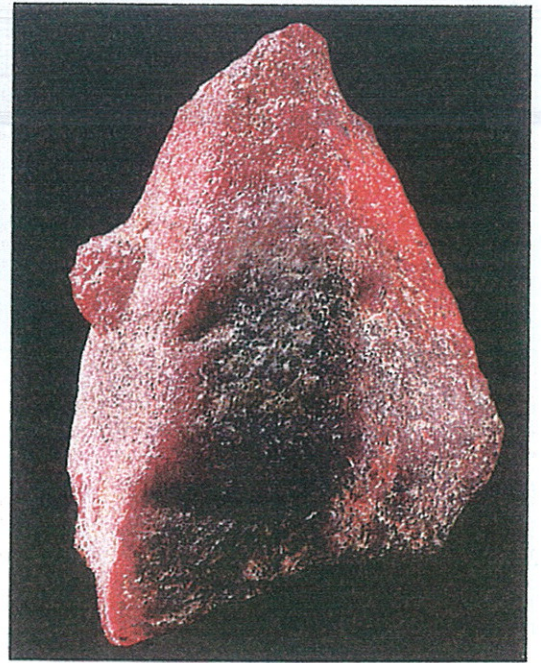
Vue générale de la mine de John Saul, région de Mangari au Kenya.
Au Nord, on distingue les carrières Main Pit et Kimbo Pit et à l'ouest
les installations de la mine - Photo : J. Saul.



Rubis dans une matrice de phlogopite et plagioclase du gisement de Tajmyr, Ourals polaires, Russie - Dimension du cristal 45 x 35 mm. Coll. MNHN, Paris - Photo : E. Costanzo.



Rubis dans matrice feldspathique provenant du gisement de Tajmyr, Ourals polaires, Russie. Dimension du cristal 25 x 25 mm. Coll. MNHN, Paris - Photo : E. Costanzo.



Rubis en forme de champignon appelé "mushroom ruby" typique du secteur de Nganga
Photo : J. Saul.



Zone de contact à rubis (1) séparant les gneiss à sillimanite (2) des roches mafiques de couleur rougeâtre (3) dans le Kimbo Pit
Photo : J. Saul.



Vue de la zone de cisaillement à rubis, épaisseur 20 cm (1) recoupant les gneiss à sillimanite, roche compacte et diaclasée (2) et les roches mafiques et ultramafiques (3) foliées et fortement météorisées.
Photo : J. Saul.



Rubis à zonations caractéristiques de la mine de John Saul - Photo : J. Saul.

LES GISEMENTS EN CONTEXTE MÉTAMORPHIQUE

Les gisements de corindon apparaissent dans des complexes métamorphiques formés de niveaux d'ultrabasites, de marbres, de quartzites, de gneiss et de métapelites qui peuvent être localement recoupés par différentes roches ignées dont des granitoïdes ou des pegmatoïdes. Les mécanismes intervenant dans la formation de ces gisements relèvent soit du métamorphisme isochimique, soit du métasomatisme (métamorphisme de contact et/ou hydrothermal) qui affectent des lithologies très contrastées. Cependant, les mécanismes mis en jeu restent encore peu étudiés et hypothétiques pour de nombreux gisements. En outre, dans certains cas, plusieurs épisodes de métamorphisme, de conditions thermobarométriques et chimiques différentes, se sont succédés : un ou plusieurs de ces événements métamorphiques ayant pu mener à la formation de corindon. Ainsi, la classification proposée repose sur la lithologie et non sur la chimie du métamorphisme ou sur son caractère local ou régional.

Plusieurs types de gisements sont distingués :

- les gisements liés à l'intrusion de pegmatites dans des roches mafiques, ultramafiques ou carbonatées et à leur métasomatose par des circulations fluides.

- les marbres,
- les gneiss, granulites et charnockites,
- les amphibolites,
- les anatexites.

1. Les gisements liés à des pegmatites ou à des granites désilicifiés

Certains gisements de corindon se forment par désilicification de pegmatites au contact de roches mafiques, ultramafiques ou carbonatées, déficitaires en SiO₂.

1.1 - Pegmatites intrusives dans des roches ultramafiques

Lorsqu'une pegmatite intrude une roche ultramafique, il se développe, par réaction métasomatique et/ou hydrothermale au contact de ces deux roches à compositions chimiques très contrastées, et par circulation de fluide contemporaine ou postérieure à l'intrusion, des assemblages à oligoclase (75 %) et corindon (23 %) ; et autres minéraux : 2 %) appelés "plumasites", du nom de la localité de Plumas en Californie aux États-Unis, où ces assemblages ont été décrits pour la première fois (Lawson, 1903).

Les gisements de la rivière Umha (Solesbury, 1967) et de Kalalani (Seifert et Hyrst, 1999) en Tanzanie, du Transvaal du Nord-Est en Afrique du Sud (Robb et Robb, 1986), du Parc National de Yosemite en Californie (Rose, 1957), de Haute-Loire en France (Lasnier, 1977), de

Sunjam au Cachemire indien (La Touche, 1890 ; Peretti et al., 1990 ; Hughes, 1997 ; Simonet, 2000), certains gisements de saphirs du Sud du Kenya, comme ceux de la région de Mangari (Mercier et al., 1999) et également les gisements de rubis de l'Oural polaire contenus dans des plagioclases à phlogopite associées à des méta-ultramafites (Spiridonov, 1998) sont génétiquement liés à la mise en place de pegmatites dans des roches ultramafiques.

Certains des gisements de Haute-Loire en France se sont formés lors de l'intrusion de filons de pegmatites dans des harzburgites à spinelles (Marchand et al., 1989). Les corindons se trouvent dans des plumasites où ils sont associés à de l'oligoclase-andésine, du spinelle, de la biotite, de l'apatite, du zircon, de l'uraninite, du pyrochlore et à des minéraux d'altération comme l'andalousite, le talc, le diaspore, la chlorite, la prehnite et la scapolite (Lasnier, 1977). Les cristaux ont des formes de barillets très allongés selon l'axe c ; ce sont des cristaux colorés en gris à bleu et plus ou moins "astériés" (Simonet, 2000). Ces plumasites se retrouvent également dans les gisements de Kinyiki Hill au Kenya (Simonet, 2000), du Transvaal en Afrique du Sud (Robb et Robb, 1986).

Les saphirs bleu roi - "cornflower blue" - du Cachemire indien, découverts en 1881 par les paysans locaux suite à un glissement de terrain, sont devenus, au fil du temps, les saphirs les plus célèbres et les plus convoités. Mallett (1882) et La Touche (1890) furent les premiers à décrire les gisements de Sunjam. Ils sont localisés dans la région de Paddar au Cachemire indien, dans la chaîne du Zaskar où les formations métamorphiques sont d'âge cambro-silurien (Lydekker, 1883). Ils sont associés à des poches ou des lentilles de roches métamorphiques comportant des niveaux de marbres, de gneiss à biotite et des schistes intrudés par des pegmatites (Atkinson et Kothavala, 1983 ; figure ci-dessous). Ces lentilles sont de taille hectométrique, et sont formées d'olivine, de talc et de spinelle magnésien. Elles sont entourées d'une auréole de trémolite et d'anthophyllite chromifères de couleur verte intense. Elles passent latéralement à des amphibolites à grenat puis à des amphibolites. Au contact entre ces lentilles et les amphibolites se trouvent, de manière irrégulière, des intrusions de pegmatite. Ces pegmatites ont subi une métasomatose alcaline qui a provoqué la dissolution du quartz. Elles sont constituées de feldspath, mica, tourmaline et corindon. Elles sont bordées de roches à biotite, talc, carbonates et tourmaline (Peretti et al., 1990).

En utilisant une platine de chauffage et de refroidissement pour l'étude des changements de phase des inclusions fluides primaires piégées dans les corindons, Peretti et al. (1990) ont mis en évidence trois étapes de croissance pour les saphirs, chacune représentée par une

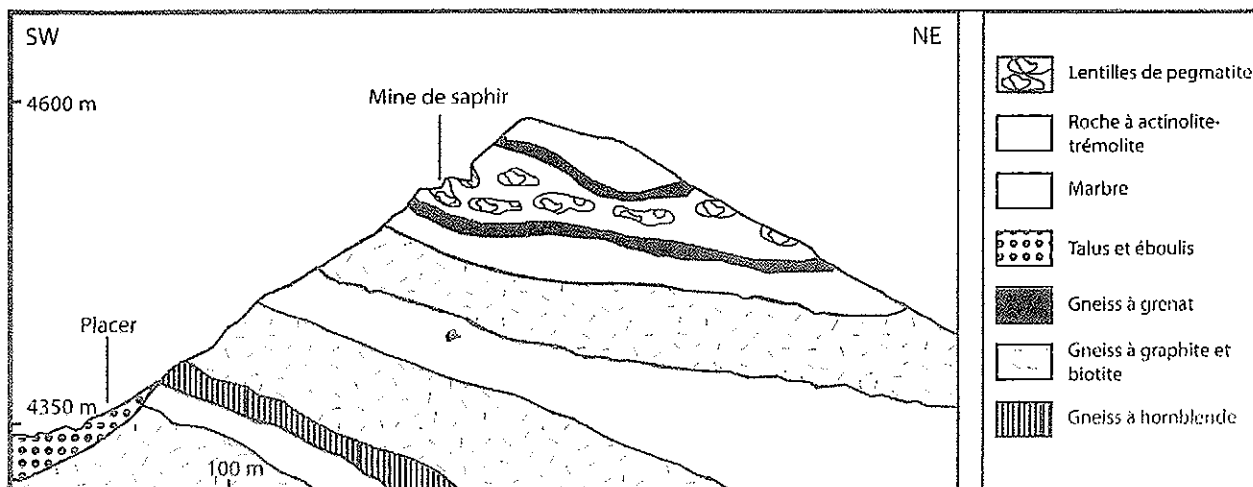


Fig. 10 : Contexte géologique des gisements de Sunjam au Cachemire indien (d'après Atkinson et Kothavala, 1983)



Hauteur : 4 cm - Gulbka, Vall I Vaya, Uva,
Sri Lanka - Coll. : J. Halpern



Hauteur : 3,4 cm - Myanmar
Coll. : California Academy of Sciences

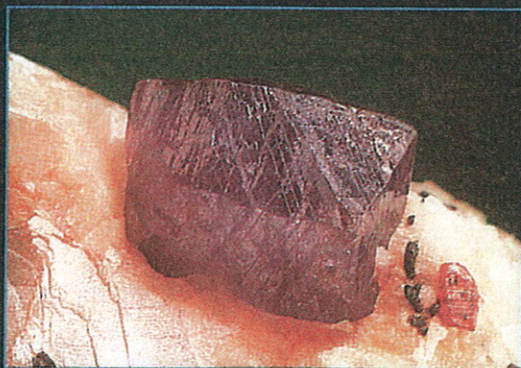


Hauteur : 4,1 cm - Zanska Range, Cashmire,
Inde - Coll. : Clemson University



Les Corindons "Saphir" vus par Jeffrey Scovil

Grand cristal :
5,6 cm de hauteur
Sri Lanka
Coll. : K. Proctor



Cristal : 1 cm - Aliabad, Vallée de la Hunza, Pakistan
Collection Privée

Hauteur : 1,8 cm
Sri Lanka
Coll. : Ariel

Hauteur : 2,8 cm
Sri Lanka
Coll. : Ariel

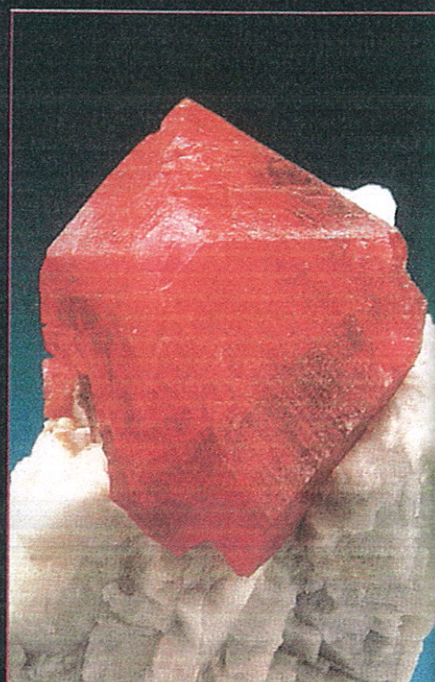




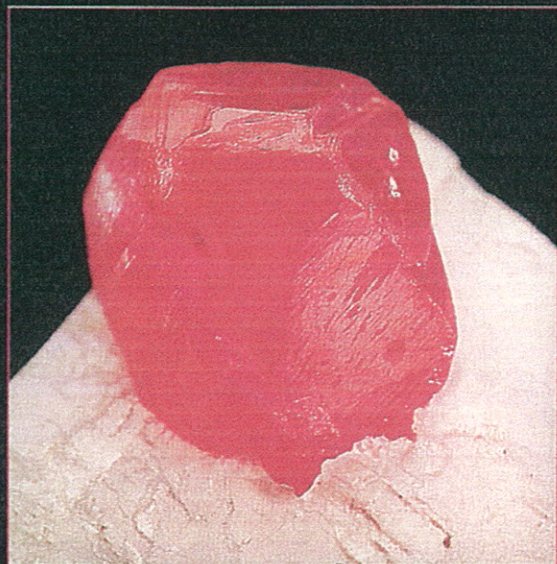
Hauteur : 4,2 cm - Mysore, Inde
Coll. : Musée Canadien de la Nature



Hauteur : 9,5 mm - Mogok, Myanmar
Coll. : E. Asselborn



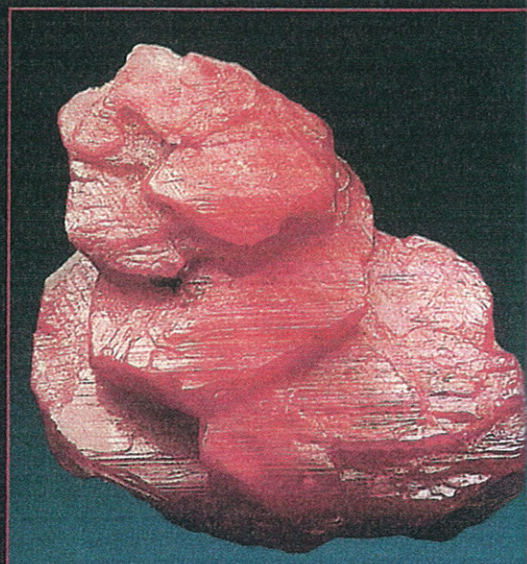
Hauteur : 2,5 cm - Jagdalik, Province de Kab
Afghanistan - Coll. : Smithsonian Institute



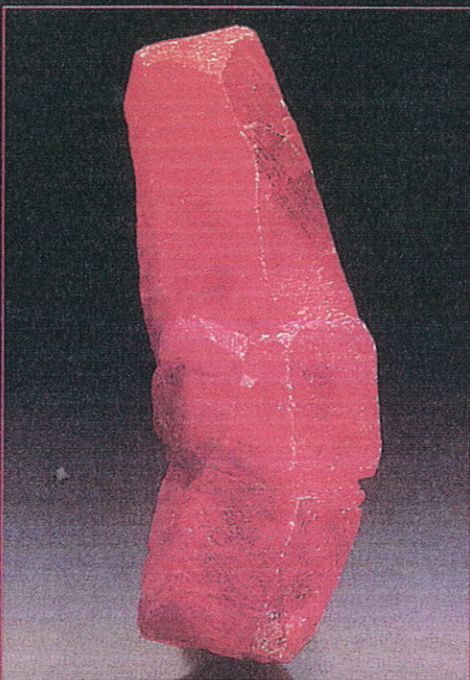
Les Corindons "Rubis" vus par Jeffrey Scovil

Hauteur : 5 mm
Mogok, Myanmar
Coll. : N. et M. Carré

Hauteur : 6,8 cm
Mogok, Myanmar
Coll. : L. Conklin



Hauteur : 9,8 cm - Pakistan
Collection Privée



Hauteur : 4,1 cm - Vietnam - Coll. : J. Rosenthal



Hauteur : 2,2 cm - Mogok, Myanmar
Coll. : N. et M. Carré

famille d'inclusions fluides constituées de CO_2 pratiquement pur et formées dans des conditions thermobarométriques P-T spécifiques : 3,2-5,6 kbar et 680-700°C pour celles du cœur des cristaux, 3,9-4,8 kbar et 590-600°C pour celles de la partie intermédiaire et 2,9-3,1 kbar et 500°C pour celles de la partie externe. Cette étude met en évidence la variabilité des conditions thermobarométriques pendant la cristallisation des saphirs, suggérant soit qu'elle a été très lente, soit qu'elle s'est faite en trois périodes distinctes et séparées dans le temps.

Les gisements de la rivière Umba en Tanzanie ont été décrits par Solesbury (1967) et Seifert et Hyrsl (1999). Ils se trouvent dans des filons de pegmatites désilicifiées à anorthose, vermiculite et corindon, intrusives dans des serpentinites. Les plumasites ont des formes lenticulaires, verticales et mesurent 5 à 10 mètres de long et 2 à 3 mètres

d'épaisseur. Elles ont des textures grenues à gros grains et présentent des figures de réaction au contact des serpentinites. Deux types de veines à corindon sont rencontrés : des veines à plagioclase calcique, vermiculite et corindon, et des veines à vermiculite et corindon. Les cristaux de corindons sont translucides et de couleur variable d'un affleurement à l'autre, de forme tabulaire avec des pinacoïdes et des faces prismatiques hexagonales bien développées mais sans face dipyrramidale. Le développement d'une zonation de couleur en forme de "tube" parallèle à l'axe c, incolore dans les saphirs bleus, et noir dans les rubis, est courant. Solesbury (1967) suggère que les pegmatites dérivent d'une roche anorthositique qui se serait appauvrie en MgO et SiO_2 au contact de la serpentinite, lors de sa mise en place. Seifert et Hyrsl (1999), en étudiant les plumasites de Kalalani situées à 3 km au sud d'Umba, démontrent que ces roches sont le résultat d'une altération hydrothermale poussée (figure 11).

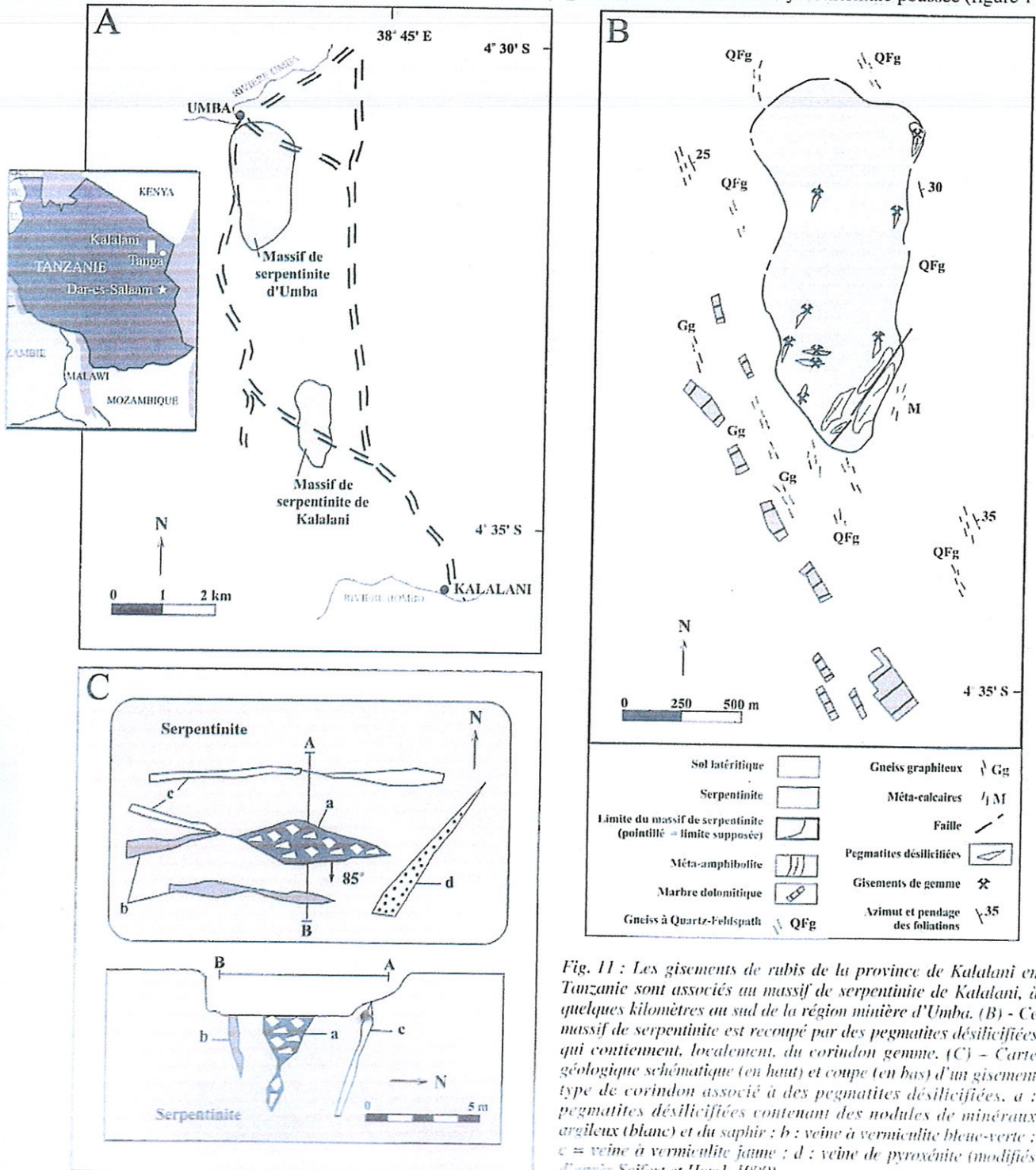
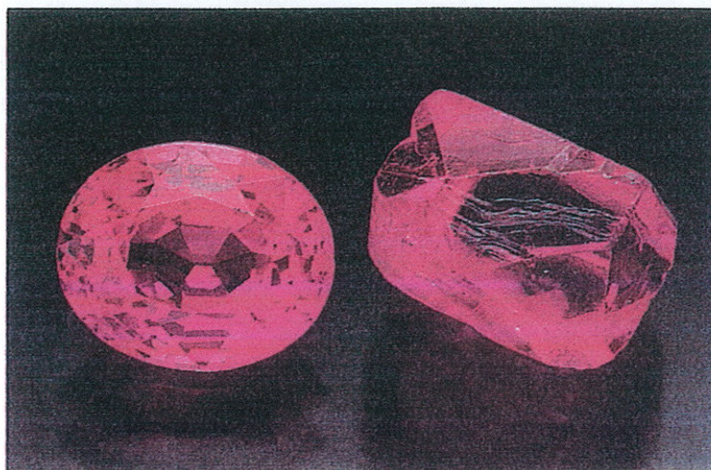


Fig. 11 : Les gisements de rubis de la province de Kalalani en Tanzanie sont associés au massif de serpentinite de Kalalani, à quelques kilomètres au sud de la région minière d'Umba. (B) - Ce massif de serpentinite est recoupé par des pegmatites désilicifiées qui contiennent, localement, du corindon gemme. (C) - Carte géologique schématisée (en haut) et coupe (en bas) d'un gisement type de corindon associé à des pegmatites désilicifiées. a : pegmatites désilicifiées contenant des nodules de minéraux argileux (blanc) et du saphir ; b : veine à vermiculite bleu-verte ; c = veine à vermiculite jaune ; d : veine de pyroxénite (modifiés d'après Seifert et Hyrsl, 1999)

Corindons gemmes de diverses origines...



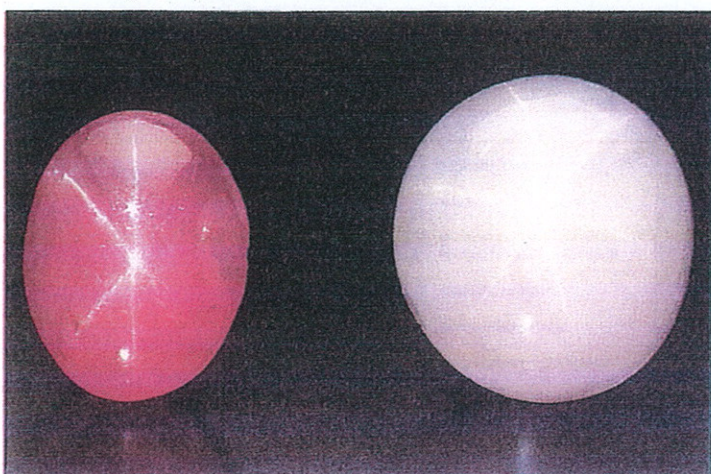
Saphirs et rubis facettés - 8,85 ; 1,85 et 5,2 carats - Origines inconnues - Spécimens : R. Mueller & Associés - Photo : J. Scovil



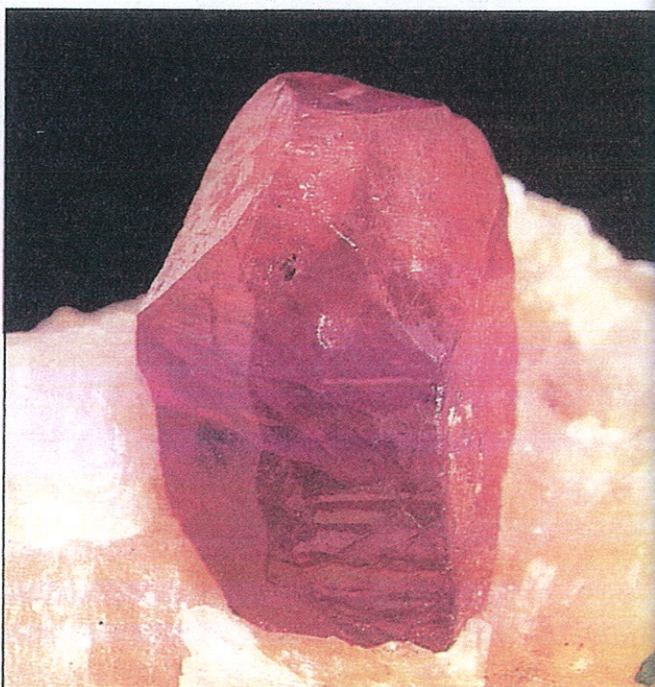
Rubis - Cristal : 9 mm de largeur - Pierre facettée : 3,13 carats
Mogok, Myanmar - Coll. : W. Larson - Photo : J. Scovil



Rubis - Pierre facettée : 2,24 carats
Coll. : R. W. Wise - Photo : J. Scovil



Corindon étoilé en cabochon - Pierre de gauche : 3,07 carats
Mogok, Myanmar - Coll. : Butterfield's - Photo : J. Scovil



Saphir
Cristal : 1 cm de hauteur
Vallée de la Hunza, Territoire du Nord, Pakistan
Coll. : M. Grossmann - Photo : J. Scovil

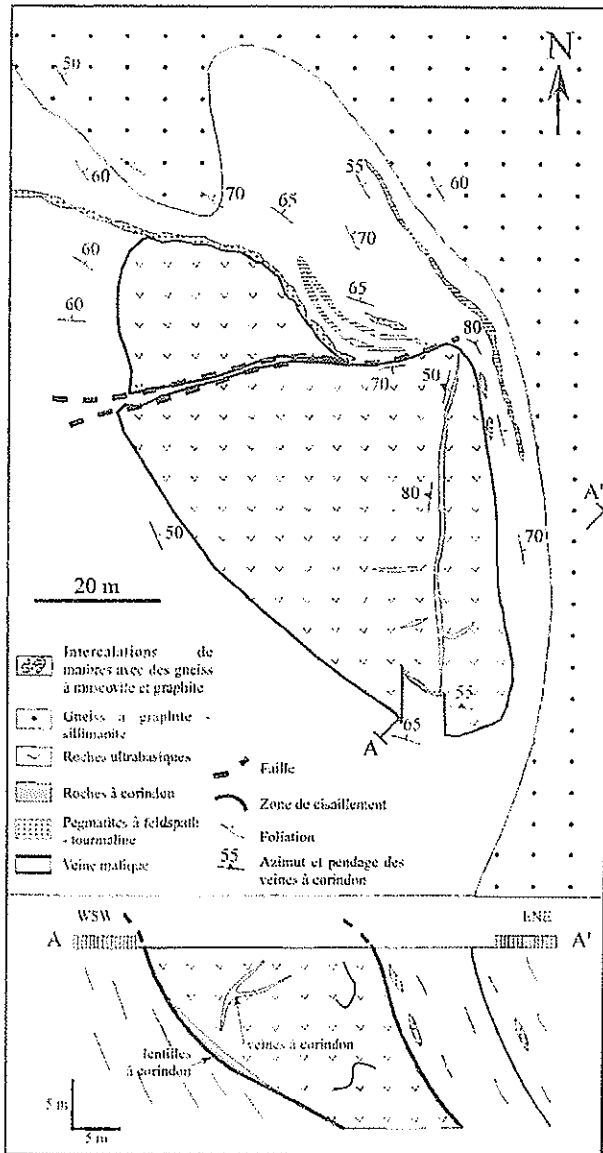


Fig. 12 : Carte géologique du gisement de Hard Rock Mine dans la région de Mangari au Kenya, montrant deux types d'occurrences de gemmes étroitement associées avec les ultrabasites. Coupe géologique A-A' mettant en évidence la relation structurale entre le corps ultrabasique et les roches encaissantes. La foliation du gneiss graphiteux est parallèle au contact du corps ultrabasique dans sa partie Est mais discordante dans sa partie Ouest (d'après Mercier et al., 1999)

A Mangari au Kenya, les gisements de rubis se rencontrent dans des corps de serpentinites encaissés dans des gneiss à graphite et sillimanite. Il s'agit des mines de John Saul, Penny Lane et Hard Rock (Mercier et al., 1999 ; Simonet, 2000). Dans la mine de Hard Rock, la zone de contact entre les gneiss et les serpentinites est tectonique et soulignée par des failles de cisaillement. Les serpentinites sont considérées comme des écaillles tectoniques formées pendant la phase majeure de raccourcissement d'âge panafricain (700 – 600 Ma) de la ceinture du Mozambique (650 à 720 Ma). Le corindon se rencontre dans deux types de structures (figure 12) - des lentilles et des poches minérales situées au contact serpentinite - gneiss - zone de cisaillement. Elles sont composées de rubis ± spinelle ± saphirine et micas mais parfois de rubis, phlogopite et chlorite magnésienne ; - de filons qui recoupent les serpentinites mais pas les gneiss. Le corindon est rare et associé à la zoïsite, au plagioclase avec ± phlogopite et ± muscovite. Ces filons s'apparentent à des pegmatites.

Le corindon s'y est formé par la réaction suivante :

$En + SiO_2 + V \rightarrow Crm + SiO_2 + V$

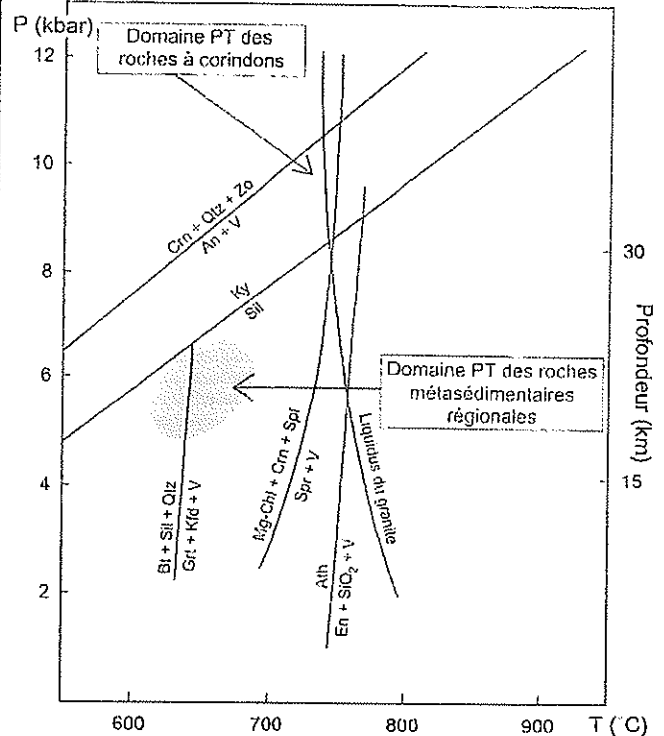
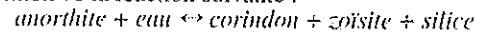


Fig. 13 : Conditions Pression-Température de formation des roches à corindon et des roches métamorphiques de la région de Mangari au Kenya (d'après Mercier et al., 1999). An : anorthite ; Ath : anthophyllite ; Bt : biotite ; Crm : corindon ; En : enstatite ; Grt : grenat ; Kfs : feldspath potassique ; Ky : disthène ; Mg-Chl : chlorite magnésienne ; Sil : sillimanite ; Spl : spinelle ; Spr : serpentine ; Qtz : quartz ; V : vapeur d'eau ; Zo : zoïsite

Dans les veines qui recoupent les corps ultrabasiques, le corindon est associé à l'anorthite et à la zoïsite. Les textures et associations minérales mettent en évidence l'intervention de la réaction suivante :



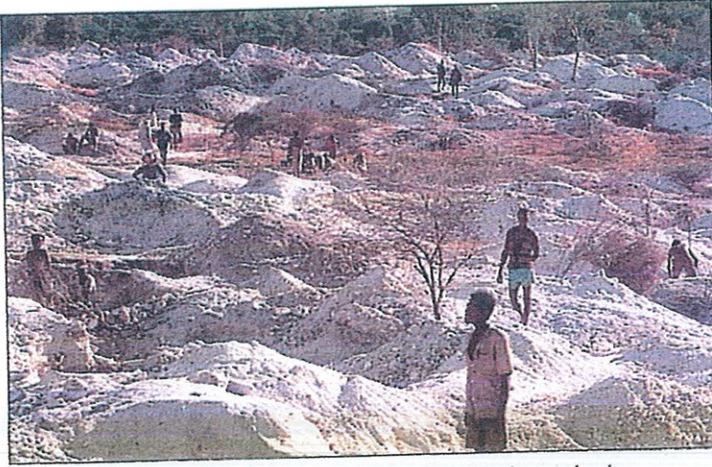
Ainsi, deux phénomènes d'altération hydrothermale se superposent : l'hydratation et la désilicification. En considérant l'ensemble des réactions métamorphiques mises en jeu, les conditions de température et de pression prédominant lors de la mise en place des gisements peuvent être approchées : entre 700 et 750°C et 8 à 10,5 kbar. Ces conditions sont supérieures à celles de la formation des gneiss encaissants (figure 13). La comparaison de données minéralogiques et thermobarométriques relatives à une vingtaine de gisements du Kenya et de Tanzanie reliés à l'orogène panafricain met en évidence que les gisements associés à des roches ultramafiques se sont tous mis en place dans des conditions de faciès granulite.

1.2 Pegmatites et granites intrusifs dans des marbres : les skarns métasomatiques

Les gisements de Bakamuna au Sri Lanka (Silva et Siriwardena, 1988) et d'Andranondambo à Madagascar (Rakotondrzaly et al., 1996 ; Schwarz et al., 1996 ; Moine et al., 1998 ; Giubelin et Peretti, 1997) se sont formés lors de l'intrusion de pegmatitoïdes ou de granitoïdes dans des marbres. Iyer (1953) propose que ce soit également le cas des gisements de Mogok au Myanmar. Dans ce cas particulier, tous les auteurs ne sont pas d'accord quant au mécanisme à l'origine de ces gisements.

A Bakamuna, dans la région d'Elahera au Sri Lanka Central, Silva et Siriwardena (1988) décrivent un gisement de corindon gemme dans des skarns (figure 14). Le corps minéralisé est constitué de trois zones minéralogiques distinctes (figure 15) : la zone la plus externe est formée d'une pegmatite à gros grains à orthose et à quartz ; dans les zones médianes et internes se

Les corindons des skarns



Vue générale de l'exploitation de saphir d'Andranondambo.
Région de Tranomaro, Madagascar - Photo : E. Petsch.

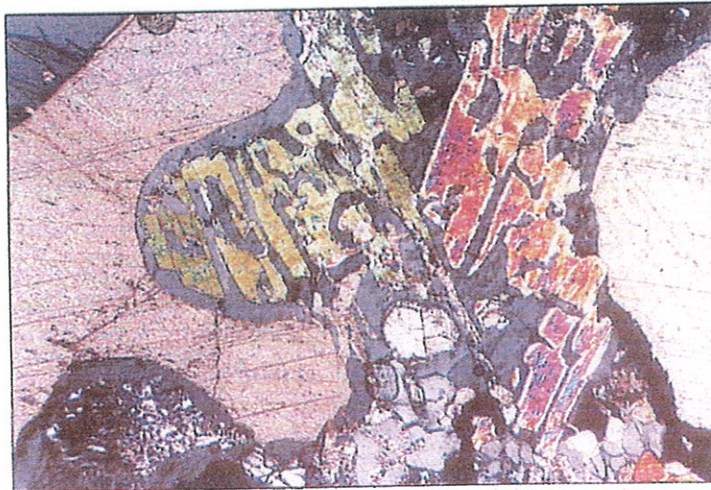


L'exploitation artisanale des saphirs d'Andranondambo, Madagascar
Photo : B. Moine.



Une veine à saphir gemme recoupant le skarn
d'Andranondambo. Puissance de la veine, environ 30 cm.
Madagascar - Photo : B. Moine.

Saphir bleu violacé et hibonite noire
dans une gangue de carbonates et de silicates calciques.
Skarn d'Andranondambo, Madagascar
Photo : D. Schwarz.



Feldspathisation du marbre à proximité
d'une veine à feldspath potassique et saphir.
Vue sous le microscope optique, Nicols croisés.
Le feldspath potassique (en gris) remplace le pyroxène (en vert,
rouge violacé et jaune) et les carbonates (teintes irisées) du marbre.
Skarn d'Andranondambo, Madagascar - Photo : B. Moine.



Association saphir (en jaune) - feldspath potassique (en gris).
Le feldspath se présente sous la forme de cristaux arrondis
à l'intérieur du saphir.
Vue sous le microscope optique, Nicols croisés.
Skarn d'Andranondambo, Madagascar.
Photo : B. Moine.

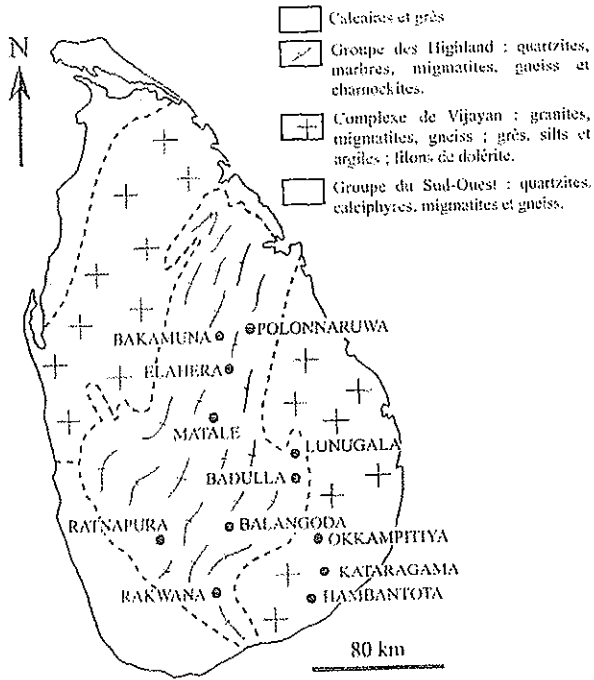
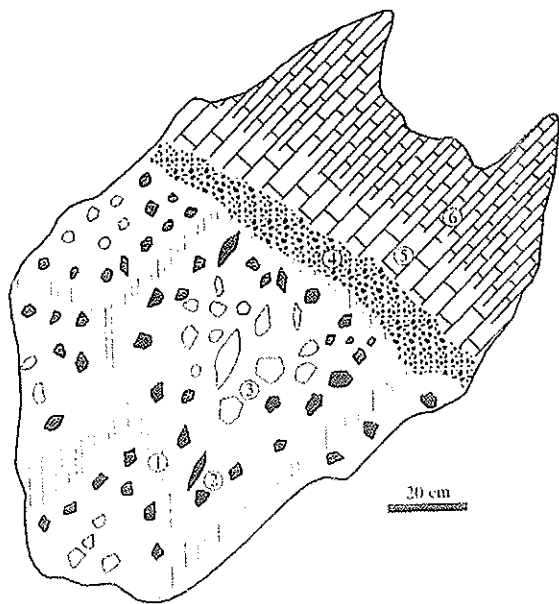


Fig. 14 : Localisation des principaux districts miniers à corindon du Sri Lanka (modifié d'après Rupasinghe et Dissanayake, 1985)

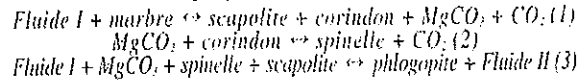


- ① Veine à phlogopite et spinelle
- ② Roche à scapolite et spinelle
- ③ Roche à scapolite et corindon
- ④ Veine à phlogopite et spinelle à la périphérie du gisement
- ⑤ Calcite à grain grossier
- ⑥ Marbre dolomitique à grain moyen à grossier

Fig. 15 : Le skarn de Bakamuna au Sri Lanka – Distribution schématique des différentes zones minérales dans la partie externe du skarn et localisation des corindons (d'après Silva et Sirawardena, 1988)

développe un important réseau de veines. Ces veines renferment de la phlogopite et du spinelle. Les roches encaissantes renferment des grains polygonaux de scapolite et de spinelle, le corindon et la phlogopite sont rares. Le corindon est arrondi et forme le cœur des cristaux de spinelle. Les veines qui recoupent le marbre ont été formées par fracturation hydraulique sous l'effet de contraintes tectoniques (Dyfe et al., 1978).

Le skarn s'est formé par interaction entre des fluides d'origine pegmatitique et le marbre (Silva et Sirawardena, 1988). Le fluide est le moteur du développement des altérations métasomatiques. Trois stades de réactions fluides-roches sont proposés :



Les fluides II, enrichis en Al, réagissent à leur tour avec les marbres suivant la réaction (1), entraînant la cristallisation d'importantes quantités de corindon. La faible teneur en Mg de ce marbre a permis de préserver une partie du corindon en limitant sa transformation en spinelle selon la réaction (2).

Les gisements de saphir de la région d'Andranondambo dans le Sud-Est de Madagascar, sont situés dans les roches métamorphiques du groupe protérozoïque de Tranomaro (Rakotondrzafy et al., 1996 ; figure 16). Cet ensemble sédimentaire riche en calcaire a subi un métamorphisme dans le faciès granulite (pression de 4-5 kbar pour environ une température de 800-850°C) qui a donné lieu à la formation de marbres. Au contact ou à proximité d'intrusions de granites charnockitiques, les marbres ont subi une percolation fluide aboutissant à la formation de nouvelles roches appelées skarns. Ceux-ci sont formés en grande partie par des cipolins, des pyroxénites à diopside, scapolite, spinelle, pargasite et des roches hyperalumineuses à plagioclase et/ou scapolite, spinelle et/ou saphir bleu à gris, hibonite (CaAl_2O_7 , enrichie en Ti, Th et terres rares) et phlogopite (Gübelin et Peretti, 1997).

D'après Rakotondrzafy et al. (1996), les pyroxénites et les roches associées sont le résultat de deux étapes de métasomatose dans des conditions de pression et de température du faciès granulite :

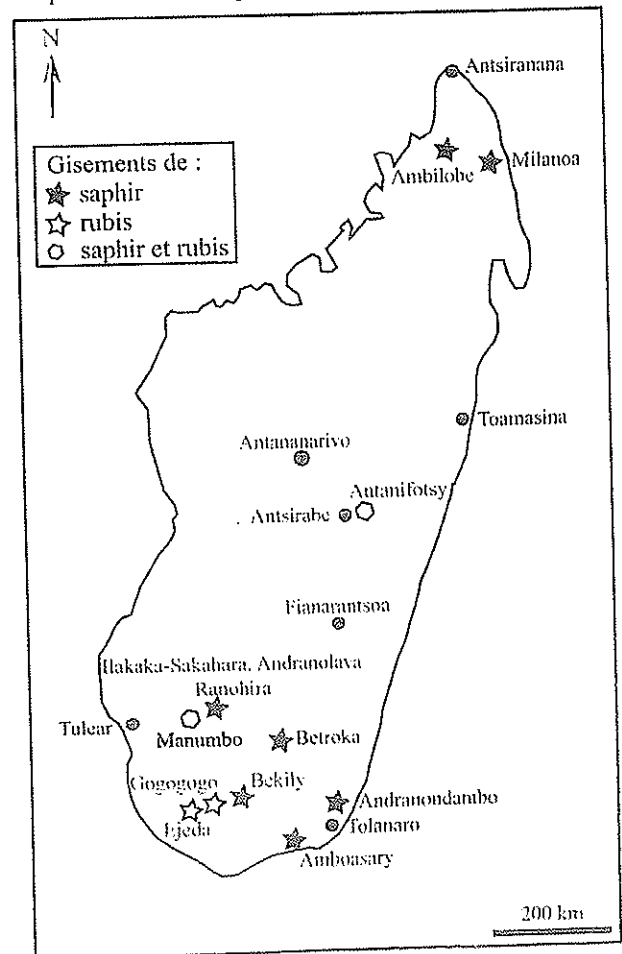


Fig. 16 : Localisation des principaux gisements de rubis et saphirs de Madagascar (d'après Shigley et al., 2000)

D'autres exemples de corindons gemmes d'origines diverse



Saphir chauffé - Hauteur : 5 cm - Sri Lanka
Collection privée - Photo : N. Bariand



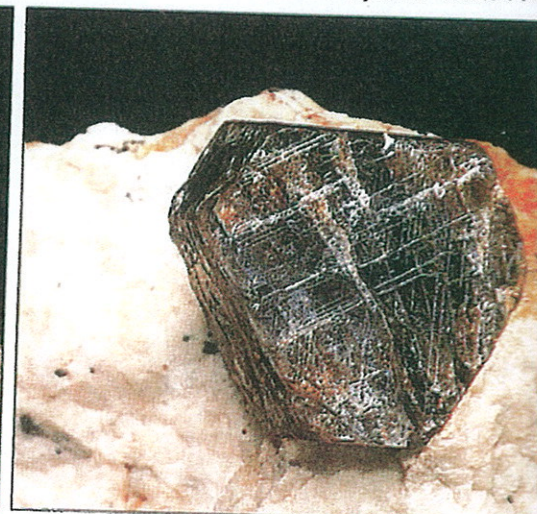
Rubis - Hauteur : 2,7 cm - Mogok, Myanmar
Coll. : W. Larson - Photo : J. Scovil



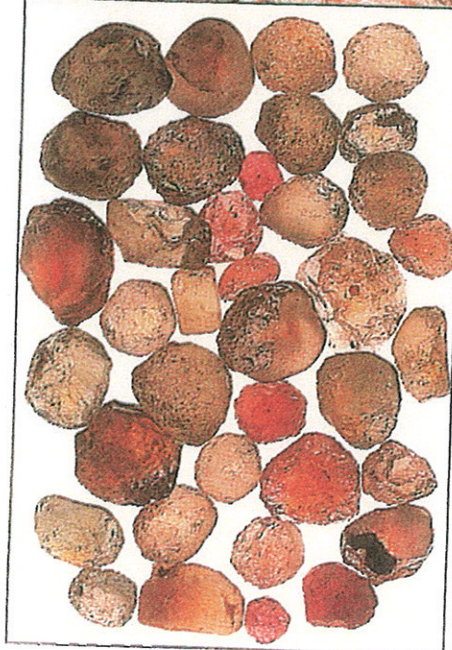
Saphir - Hauteur : 5 cm - Sri Lanka
Collection privée - Photo : N. Bariand



Partie gemme (de la variété saphir)
dans un corindon opaque
3 x 2,4 cm
Madagascar - Collection privée
Photo : N. Bariand



Saphir - Cristal : 1,3 x 1,2 cm - Ilmeny, Oural central
Coll. : J.-C. Goujou - Photo : L.-D. Bayle



Corindons
4,5 x 3 cm
Gem Mountains,
Montana, U.S.A.
Coll. : F. Pough
Photo : J. Scovil

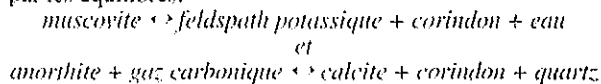


Saphir
Cristal :
1,3 x 0,7 x 0,4 cm
Ifosy, Fianarantsoa,
Madagascar
Coll. : J.-C. Goujou
Photo : L.-D. Bayle

Stade 1 : des ségrégations hyperalumineuses riches en Ca, à scapolite (méionite), spinelle et corindon, se forment dans les skarns à clinopyroxène-scapolite riches en Ti, dans des conditions thermobarométriques de 850°C et 5 kbar lors de l'infiltration de fluides riches en CO₂. Les minéraux stables à ce stade sont : diopside alumineux, carbonate, scapolite, titanite, zircon, spinelle, urano-thorianite et corindon. La désintégration radioactive de l'uranothorianite, qui est marquée par la présence d'une auréole brunâtre caractéristique, altère la couleur des autres minéraux associés au skarn, notamment le saphir bleu qui est toujours opacifié. Un zircon prélevé dans une pyroxénite donne un âge U-Pb à 565 ± 15 Ma (Andriamarofahatra et de La Boisse, 1986), en accord avec les âges U-Pb et Sm-Nd panafricains trouvés pour les roches du faciès granulite de l'Est de Madagascar (Paquette et al., 1994).

Stade 2 : déstabilisation de la scapolite (méionite) en anorthite et calcite, sous l'effet d'une baisse de température (T ~ 800°C et P ~ 3 kbar). Les fluides sont riches en fluor et CO₂. Les terres rares y sont très mobiles. Ces fluides réagissent avec le spinelle et le corindon pour donner de l'hibonite. De la thorianite peut se former, de même que de la phlogopite riche en fluor. Les minéraux stables à cette étape sont la pargasite riche en fluor, l'anorthite, la calcite, la thorianite, la fluorapatite, la phlogopite riche en fluor et l'hibonite. Un zircon prélevé dans une pegmatite donne un âge U-Pb à 516 ± 10 Ma (Andriamarofahatra et de La Boisse, 1986 ; Paquette et al., 1994).

Stade fissural des veines à saphir : Le saphir bleu se trouve dans des veines tardives constituées principalement de feldspath potassique (FK) qui recoupent les marbres (Ravalomiandrinarivo et al., 1997). Les prospecteurs ont creusé à Andranondambo, Antirimena et Analalava des puits dans les marbres dans un domaine de plus de 7000 km². Les veines de FK sont verticales et de puissance centimétrique à métrique. Elles contiennent des saphirs gemmes, du FK, de la fluorapatite, de la calcite et de la phlogopite. A la périphérie des veines, les marbres blancs sont feldspathisés et de couleur blanche à rosée. Les saphirs se sont formés à partir de fluides carboniques (CO₂ pur) et à des conditions P = 2 kbar et T = 500°C. La stabilité de l'assemblage FK-corindon-calcite est contrôlée par les équilibres:



2. Les marbres

De nombreux gisements de corindon gemme se trouvent dans des marbres. C'est notamment le cas des célèbres gisements d'Asie Centrale et du Sud-Est (Garnier et al., 2001) comme les gisements de Luc Yen au Nord du Viêt-nam (Poirot, 1997 ; Kane et al., 1991), ceux de Mogok (Kane et Kammerling, 1992 ; Kammerling et al., 1994) et de Mong Hsu (Peretti et al., 1995) au Myanmar, ceux du Népal (Harding et Scarratt, 1986 ; Smith et al., 1997), ceux de la Vallée d'Hunza au Pakistan (Okrusch et al., 1976) et de Nangimali en Azad-Kashmir (Malik, 1994 ; Pêcher et al., 2002), les gisements d'Afghanistan et des Pamirs au Tadjikistan (Rossovskiy et al., 1982 ; Hughes, 1994 ; Bowersox et Chamberlin, 1995 ; Smith, 1998 ; Terekhov et al., 1999 ; Bowersox et al., 2000). D'autres gisements existent également en Amérique du Nord, en Europe et en Afrique : dans le comté de Sussex, New Jersey aux Etats-Unis (Dunn et Frondel, 1990), à Mercus et Arignac en Ariège, France (Lacroix, 1890), à proximité de Xanthi en Grèce (Andronopoulos, 1964), à Prilep en Macédoine (Hunzinger, 1990) et à Campolungo en Suisse (Hochleitner, 1998), dans l'Oural en Russie (Kissin, 1994) et Morogoro en Tanzanie (Hänni et Schmetzer, 1991). Dans la plupart des cas, ces gisements primaires sont enrichis par des concentrations secondaires de corindon issues de ces gîtes : alluvions et cavités karstiques des marbres (Poirot, 1997).

Les corindons sont généralement associés avec de la calcite, de la dolomite, de la phlogopite, du graphite, du spinelle, de la margarite, de la zoïsite, de l'épidote, de l'anorthite, de la pyrite, de la pyrrhotite, de l'ilménite et du rutile (Iyer, 1953 ; Harding et Scarratt, 1986 ; Kissin, 1994).

Les marbres peuvent se présenter sous forme de bancs métriques intercalés avec des bancs gneissiques et schisteux comme dans la Vallée de la Hunza (Okrusch et al., 1976 ; Gübelin, 1982) ou à Mogok (Kammerling et al., 1994). A Luc Yen (Viêt-nam), les marbres sont présents sous forme de bancs puissants : localement, ils sont recoupés par des pegmatites à muscovite et tourmaline. Dans les Pamirs, Tadjikistan (Terekhov et al., 1999), les rubis et saphirs roses sont associés à de la phlogopite, de la fuschite, de la scapolite, du disthène, du rutile et de la tourmaline. Cette minéralisation se développe sous forme de lentilles présentes au contact entre des roches silicatées et des marbres, et reliées à des structures linéaires (zones de cisaillement) concordantes avec les principales structures tectoniques locales.

2.1 Caractéristiques de ces gisements

La plupart de ces gisements présentent des caractéristiques communes :

La majorité des corindons ont un habitus dipyramidal hexagonal ou prismatique hexagonal : ils sont automorphes (Peretti et al., 1995 ; Smith et al., 1997 ; Smith, 1998).

D'une manière générale, la couleur des saphirs et des rubis de ce type de gisement est variable et peut parfois présenter des zonations : rouge à rouge violacé pour les rubis de Tanzanie (Hänni et Schmetzer, 1991) et du Népal (Smith et al., 1997), rouge, rose, brun, jaune, bleu, violet ou encore incolore pour certains corindons des gisements de l'Oural (Kissin, 1994). En outre, les rubis de Mong Hsu (Myanmar) sont formés d'un cœur de saphir bleu foncé à violet entouré par une couronne de rubis rouge (Peretti et al., 1995).

Ces corindons présentent souvent des structures de croissance en forme de coin, des effets de croissance en tourbillon, des mâcles bien développées, des inclusions solides de calcite, apatite, pyrrhotite, phlogopite, des nuages de particules minuscules et des "essaims" de rutile (Hänni et Schmetzer, 1991 ; Kane et al., 1991 ; Smith et al., 1997). Ces inclusions constituent des critères de diagnostic pour ces gisements.

Les rubis de Morogoro en Tanzanie présentent trois habitus particuliers : des cristaux plats à tabulaires, des cristaux pseudo-cubiques et des cristaux corrodés avec des terminaisons irrégulières ; les cristaux pseudo-cubiques se confondent facilement avec des spinelles (Hänni et Schmetzer, 1991 ; figure 17).

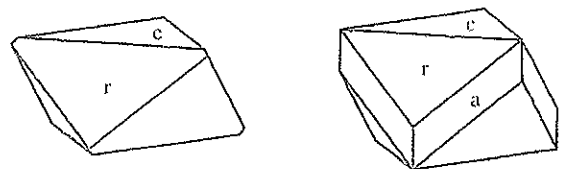
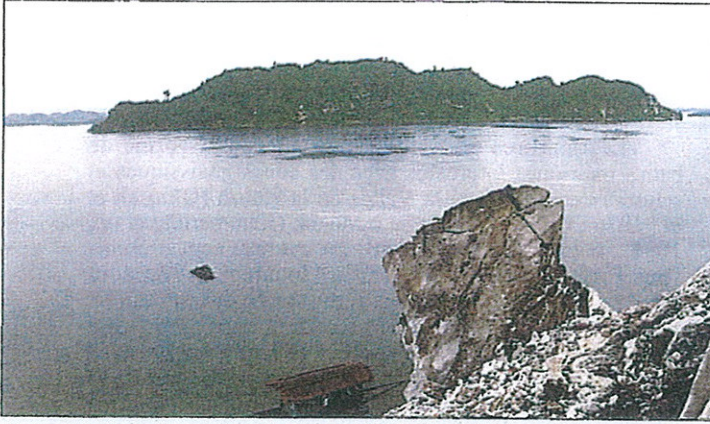


Fig. 17 : Habitus des rubis de Morogoro, Tanzanie (d'après Hänni et Schmetzer, 1991) : c = pinacôïde basal {00.1}, a = prisme hexagonal de second ordre {11.0}, r = rhomboèdre {10.1}

2.2 Mécanismes de formation

Les gisements d'Asie Centrale et du Sud-Est associés aux marbres seront abordés en détail dans un prochain article du Règne Minéral.

Les corindons des marbres



Vue générale de la carrière à rubis de Bai Da Lan située sur le lac de barrage de Thac Ba, région de Luc Yen, Viêt-nam - Photo : G. Giuliani.



Aspect des marbres lités de la région de Luc Yen
Photo : G. Giuliani.



Détail des marbres lités où alternent des lits de marbres à graphite et rubis rose avec des marbres blancs. Région de Luc Yen - Photo : G. Giuliani.



Vue du gisement de Forthar dans les marbres de la Vallée d'Hunza, Pakistan - Photo : G. Giuliani.



Vue de la partie supérieure du gisement de rubis de Nangimali situé à 4250 m d'altitude, mine de Nangimali Top (on devine les déblais de l'exploitation), Azad Kashmir, Pakistan - Photo : G. Giuliani.



Rubis trapiche de Mong Hsu, Myanmar (ex-Birmanie)
Photo : H. Hänni, SSEF.



Rubis et graphite disséminés dans un marbre de Luc Yen, Viêt-nam.
Taille du cristal : 8 mm - Photo : G. Giuliani.



Paragenèse à pyrite, rubis et phlogopite des marbres de la Vallée d'Hunza
Photo : D. Schwarz.



Rubis et phlogopite contenus dans un marbre de Minh Tien, district de Luc Yen, Viêt-nam
Longueur du cristal : 1 cm - Photo : G. Giuliani.

Carte topographique de la région de l'Oural permettant de localiser le complexe métamorphique à rubis et saphir

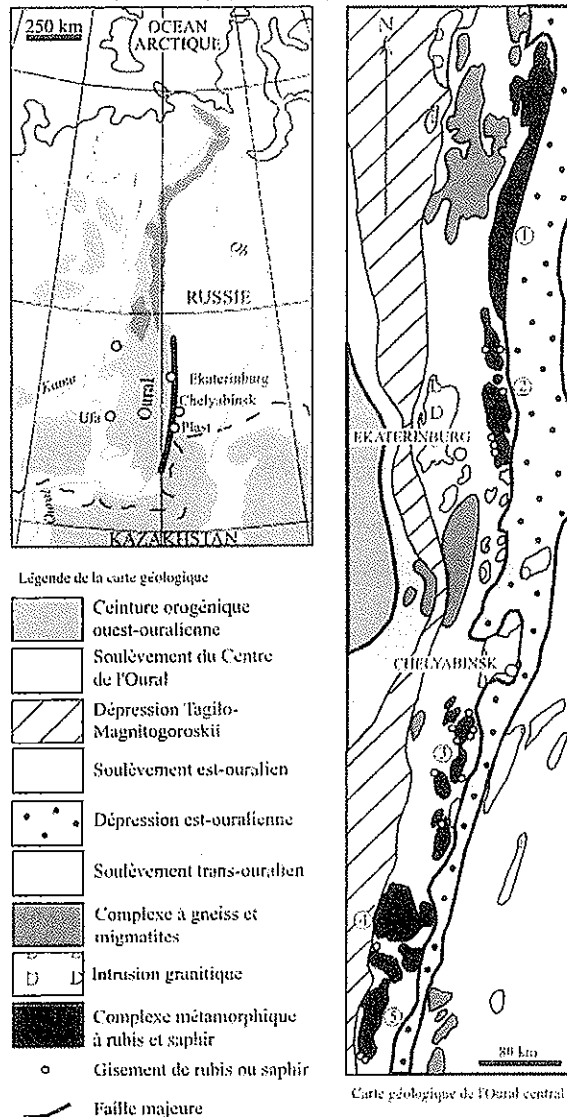


Fig. 18 : Carte géologique du Sud de l'Oural avec la localisation des gisements de corindon gemme (1) : Gaievskii (pas de corindon trouvé mais fort potentiel probable) ; (2) Murzinsko-Adviskii ; (3) Kochkarskii ; (4) Jabyk-Karagaïskii ; (5) Suunduskii (d'après Kissin, 1994)

Des minéralisations à rubis et saphirs dans des marbres sont présentes dans quatre complexes métamorphiques de l'Oural : Murzinsko-Adviskii, Kochkarskii, Jabyk-Karagaïskii et Suunduskii (figure 18). Le gisement de Kootchinskoye, dans le complexe métamorphique de Kochkarskii a été étudié en détail par Kissin (1994). Ce complexe métamorphique est d'âge paléozoïque moyen à tardif. Le métamorphisme a débuté il y a environ 300 Ma, avec un premier épisode prograde (température ou pression plus élevée) durant 30 Ma, et un dernier épisode rétrograde (de plus basse pression ou température) à environ 260 Ma.

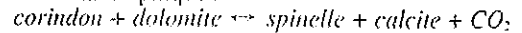
A Kootchinskoye, les gisements de rubis et de saphir sont localisés dans la partie axiale d'une structure synclinale. Trois types de marbres sont identifiés :

- des marbres à calcite ne renfermant pas de corindon,
- des marbres à calcite magnésienne (0,1 à 0,9 % poids de MgO dans la calcite), de couleur bleue, verte, gris pâle ou blanche, à grains moyens à gros, à corindon, spinelle, apatite, pyrite, pyrrotite, rutile, fluorine, tourmaline verte, pargasite chromifère, sulfure, margarite, diaspore, anhydrite, grossulaire (tsavorite), phlogopite et chlorite aluminieuse.

- des marbres à calcite dolomitique (entre 1 et 22 % poids de dolomite dans la calcite), de couleur blanche à

jaune pâle, à grains fins avec une texture porphyroblastique, à corindon, spinelle, pyrite, rutile, phlogopite, tourmaline, pargasite chromifère, titanite, fluorite, norbergite ($[\text{SiO}_3]_{\text{Mg}}\text{-Mg}(\text{OH}, \text{F})_2$), graphite, chlorite riche en alumine et trémolite.

Le calcaire a subi des températures de 620-660°C et des pressions d'environ 2,5 kbar (Kissin, 1994). Les corindons des gisements de l'Oural se sont formés selon la réaction métamorphique :



L'étude théorique et expérimentale de cet équilibre montre que les conditions de température et de pression auxquelles les phases minérales se forment dépendent de la pression partielle de CO_2 et de l'activité du magnésium. Si l'activité du magnésium augmente, une augmentation de CO_2 est nécessaire à la stabilité du corindon. Une augmentation de température ou une diminution de la pression déplace l'équilibre chimique vers la droite. Ainsi, les changements de conditions de température et de pression de CO_2 qui ont lieu au cours des différentes étapes du métamorphisme (prograde et rétrograde) peuvent avoir une influence majeure sur la stabilité du corindon (Kissin, 1994).

Selon Kissin (1994), bien que le métamorphisme soit le principal facteur géologique qui intervient dans la formation des rubis et saphirs dans les marbres, d'autres facteurs sont tout aussi importants. Ainsi, c'est la teneur en magnésium du marbre qui influence fortement la stabilité du corindon par rapport à celle du spinelle. Quant à la teneur en alumine du marbre, elle ne semble pas être un facteur critique.

3. Gneiss, granulites et charnockites

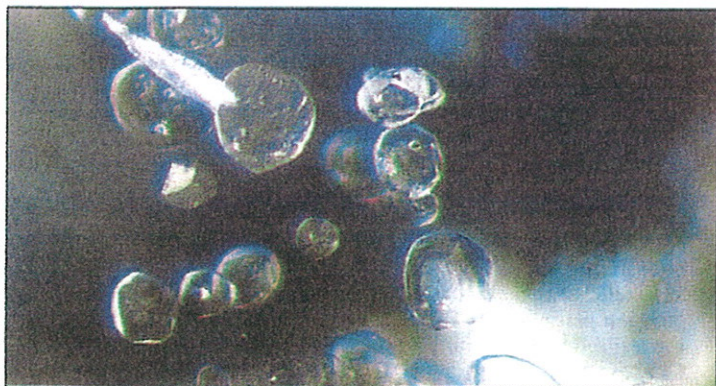
Certains gisements de corindon gemme se trouvent dans des gneiss (Schwarz, 1998) : les gisements d'Azov en ex-URSS (gneiss à sillimanite et corindon), de Froland en Norvège (gneiss à biotite, sillimanite et corindon), de Mysore en Inde (gneiss à perthite, biotite, sillimanite et corindon), de la ceinture métamorphique de Hida au Japon (gneiss à feldspaths alcalins et corindon), d'Ihossy et d'Antsirabé à Madagascar ; mais aussi ceux d'Indaia dans le district de Minas Gerais au Brésil (Epstein *et al.*, 1994) et de la ceinture du Mozambique (Simonet, 2000). Grew *et al.* (1989) décrivent des schistes à biotite-plagioclase corindon-spinelle dans le craton d'Aldan dans l'Est de la Sibérie.

Les saphirs de couleurs variées (gris, miel, brun, bleu pâle, rose et pourpre) des gisements alluvionnaires de Twiga au Kenya ont pour source un gneiss à biotite - corindon \pm disthène \pm grenat ; les rubis d'Ushindi et de Si Ndoto Tena au Kenya proviennent respectivement de gneiss à plagioclase, biotite et corindon et de gneiss à graphite (Simonet, 2000).

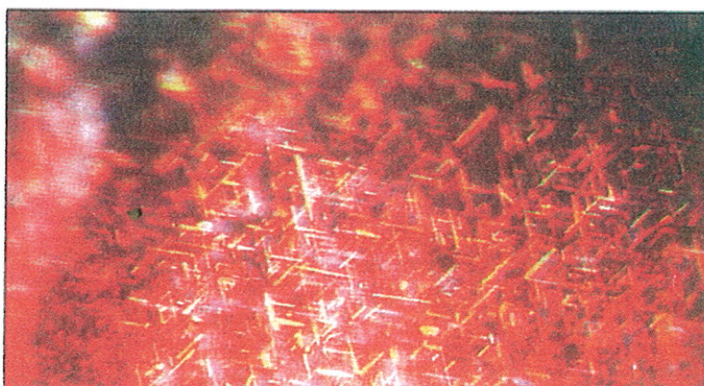
Au Sri Lanka, la plupart des gisements de corindon gemme se situent dans les régions d'Elahera et de Ratnapura appartenant aux formations géologiques des Highland (figure 14 : Munasinghe et Dissanayake, 1981). Ces roches de faciès granulite, incluant des charnockites, des gneiss à quartz - feldspath - grenat - sillimanite - graphite, des quartzites, des marbres et des gneiss calciques (Dissanayake et Chandrajith, 1999). Plusieurs auteurs montrent l'importance des gneiss, granulites et charnockites du groupe des Highland au Sri Lanka dans la genèse des gisements de corindon gemme de ce pays (Coomaraswamy, 1903 ; Coates, 1935 ; Wells, 1956 ; Cooray et Kumarapeli, 1960 ; Katz, 1972 ; Dahanayake, 1980).

Dahanayake et Ranasinghe (1981) montrent par des études minéralogiques que les gemmes présentes dans les gisements secondaires du district de Ratnapura dérivent de gneiss à grenat et de granulites. D'après cette étude, il semble que les conditions de pression et de température élevées (700-800°C et 6 kbar), correspondant au faciès granulite, aient été les plus favorables à la genèse des

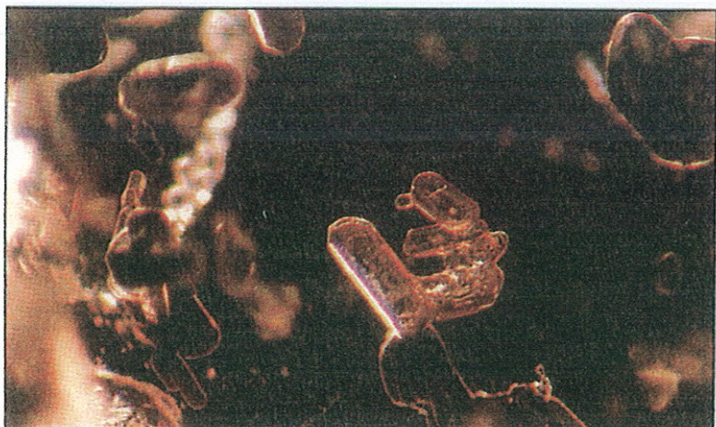
Les inclusions solides et fluides des corindons gemmes



Essaim d'inclusions solides incolores et arrondies dans un saphir d'Andranondambo (Madagascar) - Photo : Dietmar Schwarz.



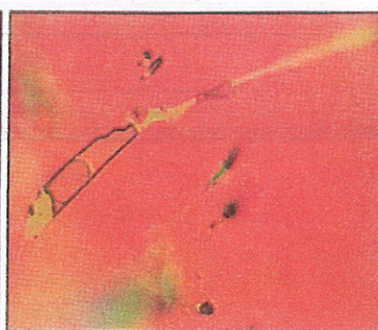
Nuage d'aiguilles de rutile dans un rubis de Mogok, Myanmar (ex-Birmanie) - Photo : D. Schwarz.



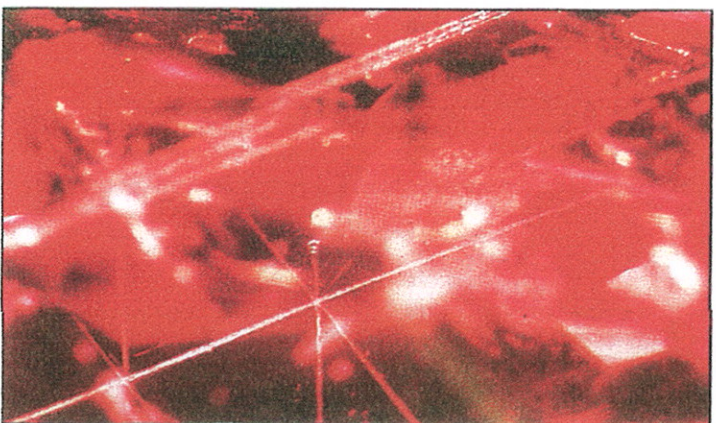
Amas de cristaux hexagonaux d'apatite dans un saphir de couleur magenta du gisement alluvionnaire de Tunduru (Tanzanie).
Photo D. Schwarz.



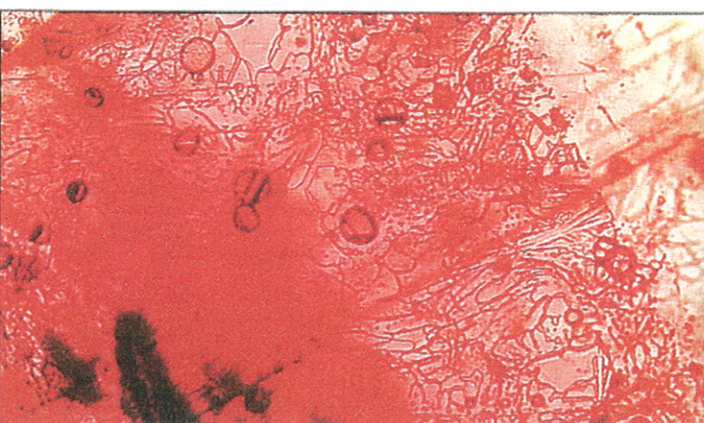
Zonation typique d'un rubis de Mong Hsu chauffé, avec un cœur bleu foncé et une périphérie de couleur rouge. Marbre de Mong Hsu, Myanmar
Photo : D. Schwarz.



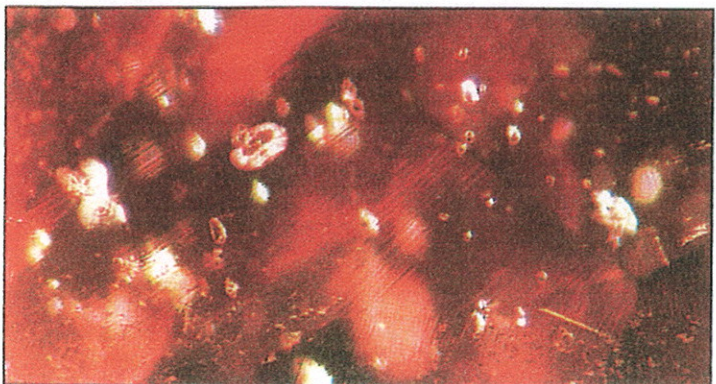
Cavité d'inclusion fluide primaire piégée par un rubis de Luc Yen, Viêt-nam. L'inclusion fluide est carbonique et constituée par une phase liquide et gazeuse. Longueur de l'inclusion : 50 microns.
Photo : G. Giuliani.



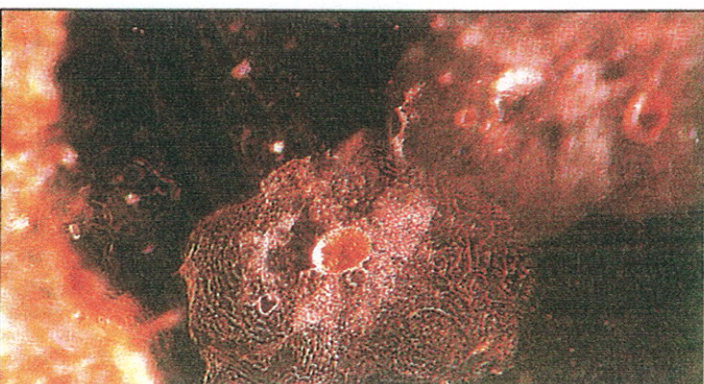
Rubis de Thaïlande présentant une distribution tridimensionnelle d'inclusions solides tubulaires - Photo : D. Schwarz.



Fissures de retrait typiques dans un rubis traité provenant de Thaïlande
Photo : D. Schwarz.



Cristaux métamictes de zircon et de xénotime inclus dans un saphir rose du placier d'Ilakaka, Madagascar
Photo : D. Schwarz.



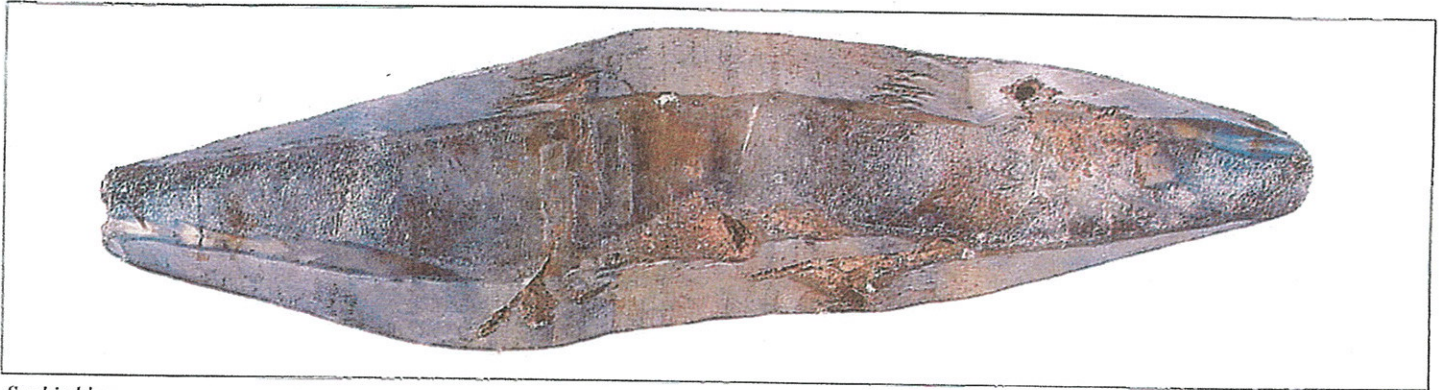
Saphir chauffé du gisement de Tunduru, Tanzanie. Présence de fractures remplies de liquide et développement de textures d'altération thermique avec une fusion partielle des inclusions solides.

Les corindons des gneiss, granulites et charnockites



Rubis rosé à violacé associé au grenat (en orangé),
à la biotite, l'amphibole et le plagioclase (en blanc)
d'un gneiss de la région d'Ihossy, Madagascar.
Dimension du plus gros cristal de rubis : 1,5 cm - Photo : G. Giuliani.

Rubis de Reddil, Mysore, Inde.
Dimensions du cristal : 20 x 15 cm.
Coll. Fondation Elf-MNHN Paris, n° 194-10.
Photo : L.-D. Bayle.



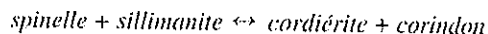
Saphir bleu
de 2 cm de longueur
du Sri Lanka.
Collection privée.
Photo : N. Bariand.



Saphirs taillés de toutes les couleurs
notamment "padparadscha".
Collection privée - Photo : N. Bariand.

gemmes. Heilmann et Henn (1986), en se basant sur la nature et la chimie des inclusions solides de saphirs provenant d'Elahera, concluent que les gneiss à grenat constituent la source des saphirs.

Rupasinghe et Dissanayake (1985) proposent que les gisements de corindon de Ratnapura se soient formés par un processus de désilicification probablement causé par le métamorphisme de contact, à basse pression, lié à la mise en place de charnockites basiques et d'autres intrusions comme des filons et des sills riches en diopside dans des métasédiments alumineux. Ces auteurs envisagent que les sédiments alumineux résultent de l'altération et du transport de matériaux provenant d'une croûte riche en aluminium et qui auraient été déposés dans les bassins des Highland. Ces sédiments pélitiques auraient été déformés et métamorphisés dans des conditions du faciès granulite lors d'une collision continentale. La mise en place simultanée d'intrusions de charnockites basiques ou de nature basaltique dans ces sédiments alumineux a provoqué leur désilicification et la formation de corindon et de spinelle suivant la réaction :



Dissanayake et Weerasooriya (1986) ont montré que la limite entre la formation des Highland et du complexe de Vijayan, correspondant à une ceinture minéralisée, présente un enrichissement en fluor (visible notamment dans les nappes d'eau). Ils postulent que cette limite est une zone de rift profond ou bien une limite de "mini-plaque" le long de laquelle s'effectuent d'importantes exhalations de volatiles. Ce processus a probablement été le résultat d'un magmatisme granitique associé avec une collision continentale. Le fluor semble avoir joué un rôle minéralisateur important, notamment pour le transport de nombreux métaux comme Ag, Cu, Zn, Co, Ni, Bi, Be, Pb et V.

4. Amphibolites

Une autre source importante de corindon est formée par les amphibolites issues du métamorphisme de roches gabbroïques. Ces roches sont rarement sources de corindon gemme, mais elles sont appréciées en ornementation, comme "l'anyolite" de Longido en Tanzanie ou encore la "ruby-smaragdite" de Caroline du Nord aux Etats-Unis. De tels gisements sont également répertoriés à Kittila en Finlande (Haapala et al., 1971), à Fiskenaesset au Groënland (Herd et al., 1969), à Sittampundi en Inde (Janardharan et Leake, 1974), dans la zone ophiolitique des Dinarides en ex-Yougoslavie (Pamir et al., 1973), à Chantel en France (Forestier et Lasnier, 1969), à Losongoni en Tanzanie (Dirlam et al., 1992), à Kilui au Kenya (Barot et Harding, 1994), dans le Sud du Malawi et à Tete au Mozambique (Andreoli, 1984), dans le Sud du Vohibory à Madagascar (Nicollet, 1986), à Harts Range en Australie (McCoff et Warren, 1980), dans la région de Dir au Pakistan (Aboosally, 1999) et à Hokkaido au Japon (Morishita et Kodera, 1998).

Ces gisements présentent des caractéristiques communes :

- Les amphibolites à corindon sont associées à des complexes basiques à ultrabasiques métamorphisés dans le faciès granulite : par exemple, des amphibolites, pyroxénites et péridotites serpentinitisées intercalées de gneiss (Chantel, France ; Forestier et Lasnier, 1969) des migmatites, paragneiss et des reliques de tonalite, dolérite, gabbro et diabase (ceinture du Mozambique ; Andreoli, 1984), des serpentinites, amphibolites à grenat et des granulites à grenat (Vohibory, Madagascar ; Nicollet, 1986) ; dérivant de complexes stratifiés ou de séries ophiolitiques.

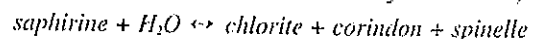
- Une paragenèse de base à corindon, anorthite, amphibole et margarite (Tenthorey et al., 1996) qui peut être, selon les gisements, complétée par la présence de

saphirine (Forestier et Lasnier, 1969 ; Nicollet, 1986 ; Tenthorey et al., 1996), grenat (Nicollet, 1986), spinelle (Forestier et Lasnier, 1969 ; Morishita et Kodera, 1998), gédrite (Nicollet, 1986), phlogopite et zoisite (Longido, Tanzanie ; Dirlam et al., 1992).

- La composition basique du protolithe, notamment gabbro (Morishita et Kodera, 1998) et troctolite (Nicollet, 1986 et 1990 ; Tenthorey et al., 1996).

Selon Nicollet (1986), les amphibolites à corindon du Vohibory à Madagascar dérivent du métamorphisme de leucotroctolites dans des conditions intermédiaires entre le faciès amphibolite de haut degré et le faciès granulite de haute pression ($P \pm 9-11,5$ kbar et $T = 750-800^\circ\text{C}$).

Le complexe ultramafique de Buck Creek en Caroline du Nord aux Etats-Unis est formé de dunite et d'une série d'unités lenticulaires décrites par Hadley (1949) comme des troctolites et des troctolites amphibolitisées. Le métamorphisme de ces lentilles a produit plusieurs assemblages minéraux : des couronnes de symplectites à orthopyroxène et clinopyroxène/spinelle, suggérant des températures élevées et des conditions métamorphiques anhydres, et des assemblages hydratés à amphibole, zoisite, margarite et corindon (Tenthorey et al., 1996). Les couronnes à clinopyroxène et spinelle se sont formées à environ 800°C et 5-7 kbar. La saphirine se forme aux dépens du spinelle situé dans les couronnes, à environ 850°C et 10 kbar. Les assemblages de minéraux hydratés situés en bordure reflètent des conditions anhydres de haute pression et/ou des événements rétrogrades ; ils se sont formés suivant la réaction (Tenthorey et al., 1996) :



Tenthorey et al. (1996) proposent que ce complexe ultramafique représente des cumulats de croûte océanique subductés (formation des couronnes à pyroxène et spinelle) puis entraînés à 30 km de profondeur (formation des assemblages à saphirine et corindon) lors de la collision liée à l'orogénèse tectonique (limite Ordovicien - Silurien).

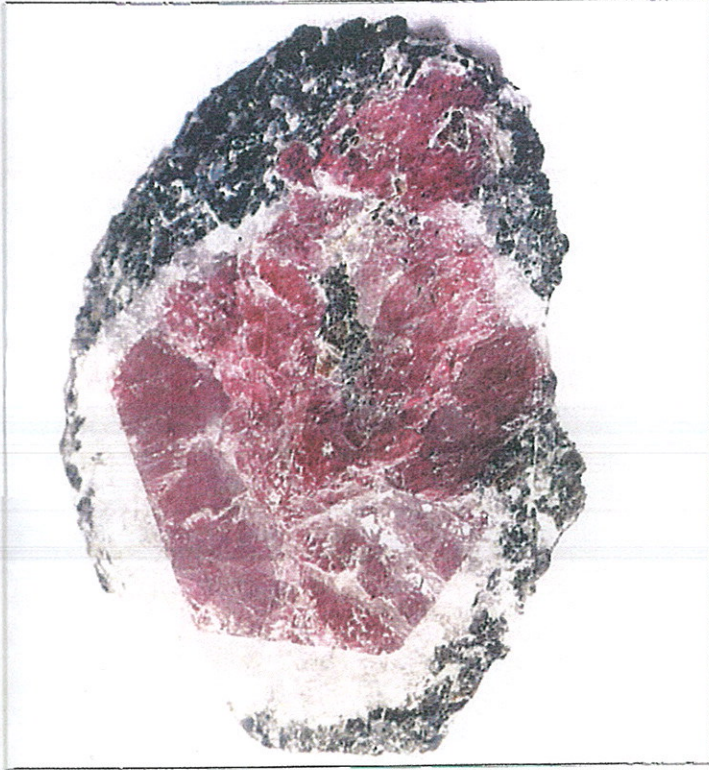
5. Roches mafiques à ultramafiques

A Barberton, dans le Transvaal (Afrique du Sud) et au Zimbabwe, il existe des roches particulières à corindon et fuchsite (muscovite chromifère) formant des lentilles dans les séries volcanosédimentaires de différents grades métamorphiques et intimement associées aux roches ultramafiques (Schreyer et al., 1981 ; Kerrich et al., 1987). Ces roches sont localisées à O'Briens dans la ceinture de roches vertes de Salisbury, constituée de métavolcanites, de quartzites ferrugineuses ("banded iron formation"), de calcaire siliceux, de quartzites et de schistes quartzeux. Elles contiennent plus de 89 % poids d'Al₂O₃ et leur teneur en Cr₂O₃ atteint 2,8 % poids (Schreyer et al., 1981). Ces roches sont dénommées "verdites", terme commercial désignant une roche verte ou brune, tendre, à grain fin et qui se prête bien à la sculpture. Elles ne renferment généralement pas de corindon gemme (Simonet, 2000).

Outre le corindon et la fuchsite, les verdites du Zimbabwe sont constituées d'andalousite, de chlorite, des associations complexes de margarite, de tourmaline, de diaspore et de rutile ; gersdorffite (NiAsS) et bismuth natif sont accessoirement présents ; celles du Transvaal sont plus pauvres en Cr₂O₃, elles ne contiennent pas de diaspore, de tourmaline et de margarite, mais de la biotite et du plagioclase, le disthène remplace l'andalousite et le rutile renferme des exsolutions complexes d'oxydes de Cr-Fe-Al. Ces roches sont globalement fortement enrichies en Al, Cr, B, V et As, et localement en K, Rb, Ni, Sb, Bi et Te, et appauvries en Si, Mg, Fe, Mn, Na, Ca, S, Cu, Zn, Ga, Sr et Y (Schreyer et al., 1981).

Selon Schreyer et al. (1981), les roches du Zimbabwe ont été métamorphosées à des températures ne dépassant pas 400°C et des pressions inférieures à 3,5 kbar, tandis que celles du Transvaal ont subi des températures d'environ 600°C et des pressions supérieures à 5 kbar.

Les corindons des amphibolites



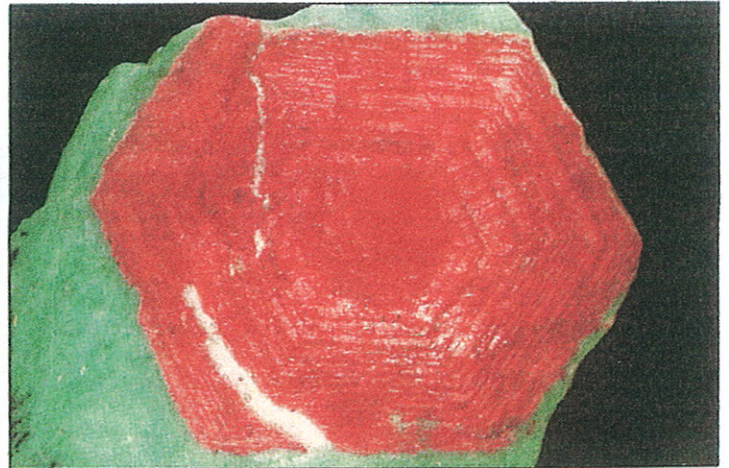
Cristaux de rubis de Longido (Tanzanie) dans une amphibolite (en noir). Les cristaux présentent des tablettes hexagonales accolées. Ils sont auréolés d'une frange de plagioclase (en blanc). Taille du gros cristal, environ 2 cm - Photo : G. Giuliani.



Aspect de l'amphibolite à rubis de Longido (Tanzanie) - Photo : G. Giuliani.



Anyolite léopard de Longido (Tanzanie). Le cristal de forme hexagonale a une largeur d'environ 8 cm. Il est entouré d'une auréole de zoïsité de couleur vert pomme à vert pâle et d'amphibole noire disposée en taches - Collection A.M. Bassett - Photo : G. Giuliani.



Rubis zoné de Merkerstein dans une matrice vert pomme de zoïsité. Le cristal est recoupé par des veinules de feldspath. Largeur du cristal : 50 mm - Collection privée - Photo : N. Bariand.



Prisme hexagonal de corindon gris bleu contenu dans une amphibolite biotitisée du km 15 dans le district à corindons de Yen Bai, Viêt-nam. Le corindon est entouré d'une auréole de plagioclase et de biotite. Longueur du cristal : 2 cm - Photo : G. Giuliani.

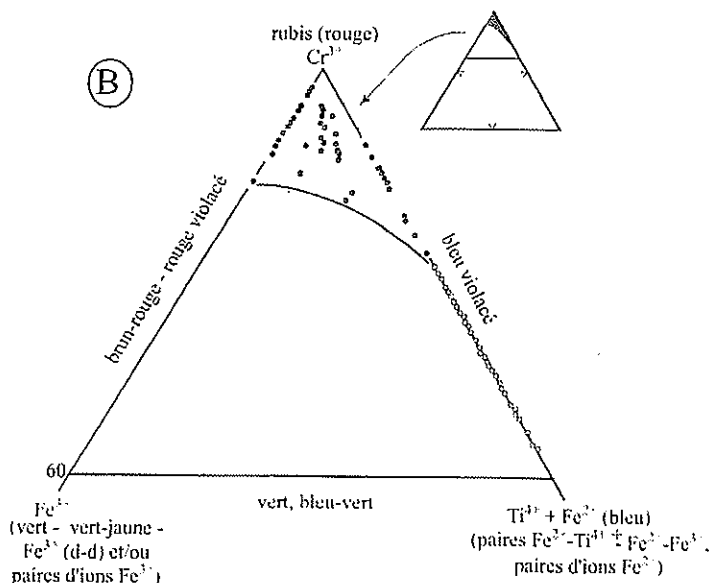
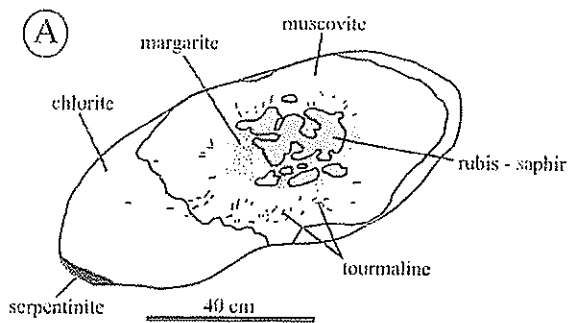
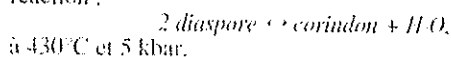


Fig. 19 : A - Section d'un galet à silicates et corindon riche en chrome issu du gisement de Westland en Nouvelle Zélande, montrant la distribution des différentes phases minérales. B - Répartition chimique des rubis (ronds noirs) et des saphirs (ronds blancs) du gisement de Westland en Nouvelle Zélande dans le diagramme $Cr^{3+} - Ti^{3+} + Fe^{3+} - Fe^{2+}$ (d'après Grapes et Palmer, 1996)

Selon ces auteurs, ces roches se seraient formées par altération exhalative postvolcanique et prémétamorphique de komatiites accompagnée d'un apport en B, K, Rb, As, Sb, Bi et Te par les fluides, d'un lessivage de Mg, Si, Fe et Ca et de la concentration résiduelle des éléments immobiles de la roche, c'est-à-dire d'Al, Cr, Ni et V. Cependant, les mécanismes de formation de ces gisements sont sujets à débat (Kerrick *et al.*, 1987 ; Schreyer, 1988 ; Kerrich *et al.*, 1988). En effet, Kerrich *et al.* (1988) privilégient la genèse hydrothermale de corindon et de muscovite chromifère à haute température et à un pH acide.

Grapes et Palmer (1996) proposent que les roches à corindon, muscovite chromifère, margarite et tourmaline de Westland en Nouvelle-Zélande se sont formées par le métasomatisme intense d'enclaves de schistes quartzofeldspathiques dans une serpentinite sous des pressions de 5-6 kbar et des températures de $450 \pm 20^\circ C$ (figure 19). Ces roches sont dénommées "goodeleite" : les teneurs en Cr_2O_3 du corindon sont comprises entre 0,5 et 13,0 % poids. La formation de ces corindons a impliqué une réduction de masse (78 %) et de volume (83 %) de la roche avec un appauvrissement en Si, Ca, K, volatiles et Sr et un enrichissement en Al.

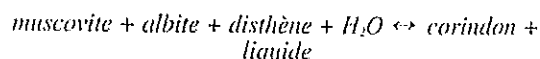
De même, les schistes à pyrophyllite et corindon de Caroline du Sud (Ranson, 2000) se sont formés lors du métamorphisme d'un protolithe alumineux à pyrophyllite, diaspore et calcéite, probablement à l'Ordovicien, selon la réaction :



6. Anatectites

Des anatectites à corindon ont été décrites dans les formations précambriennes de Tanzanie, à proximité de Morogoro (Altherr *et al.*, 1982) et dans les formations du Lewisien du Nord-Ouest de l'Ecosse (Cartwright et Barnicoat, 1986).

Les anatectites à corindon de Tanzanie sont en fait des gneiss anatectiques formés de plusieurs domaines (Altherr *et al.*, 1982) : (1) un gneiss à grain moyen avec les assemblages albite + muscovite + phlogopite + corindon et albite + disthène ou sillimanite + phlogopite et accessoirement rutile et baddéleyite ; (2) un gneiss à gros grains avec des nids à corindon et antiperthite et, comme phases mineures, albite, muscovite, phlogopite, rutile, baddéleyite et tourmaline. Les assemblages à albite + muscovite + phlogopite + corindon sont interprétés comme des restites tandis que ceux à disthène ou sillimanite sont considérés comme des paléosomes. Ces anatectites se seraient formées dans des conditions d'activité de l'eau $a_{H_2O} = 1$, pression fluide (H_2O) de 7.7 kbar et température de $695^\circ C$. Le remplacement du disthène par l'assemblage corindon + antiperthite peut être expliqué par une réaction du type :



Cartwright et Barnicoat (1986) décrivent des roches litées, alumineuses, à corindon et riches en muscovite, en Ecosse. Ce sont des gneiss à mica blanc formant une série de boudins discontinus, d'épaisseur inférieure ou égale à 1 m, dans des gneiss semi-pélitiques à quartz - plagioclase - biotite - grenat - amphibole ± muscovite. L'assemblage supposé stable dans les conditions du pic de métamorphisme comprend des cristaux de staurotite centimétriques et des porphyroblastes de corindon bleu pâle sub-automorphes et disthène (5-10 % du total) dans une matrice de mica blanc (85-90 %) et de plagioclase (5-10 %), avec quelques opaques et du zircon. Cartwright et Barnicoat (1986) suggèrent que les ségrégations felsiques représentent les produits anatectiques et que les boudins micacés à corindon sont les restites de cette anatectie. Les conditions du pic de métamorphisme sont estimées à une température de $900-925^\circ C$ et une pression supérieure à 11 kbar.

Conclusions

Les gisements de corindon en contexte métamorphique sont très nombreux et de types différents, tant du point de vue de la lithologie des roches-hôtes que des conditions thermobarométriques et des mécanismes de leur formation.

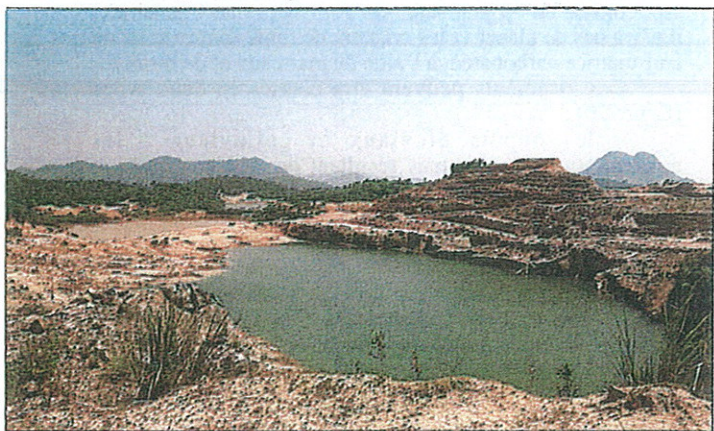
Ces gisements sont associés aux ceintures orogéniques panafricaines d'âges compris entre 700 et 600 Ma (ceinture du Mozambique, Sri Lanka, Madagascar, figure 25) ayant été affectées par plusieurs épisodes de métamorphisme de haut grade, et dans la chaîne himalayenne qui a subi un fort métamorphisme lors de la collision entre les plaques indiennes et eurasiennes (âges inférieurs à 53 Ma).

Outre les gisements dans les marbres et quelques gisements particuliers comme ceux du Sud de Madagascar, de la rivière Umba en Tanzanie ou encore de Samjam au Cachemire, très peu de gisements métamorphiques primaires sont exploités, en raison de la faible quantité de corindons gemmes. Cependant, ces gisements primaires constituent des sources importantes pour les gisements secondaires, plus faciles d'exploitation, où les pierres, après transport, sont débarrassées des parties les plus fracturées.

Les corindons des placers



Vue générale du placer à rubis de Khoan Thong en 1998. Ce gisement fut exploité de 1989 à 1995. Remarquer le relief karstique caractéristique de la région de Luc Yen - Photo : G. Giuliani.



L'ancien placer à corindon gemme de Ho Ty (Billion hill mine) dans le district minier de Quy Chau, Viêt-nam central. Cette mine fut exploitée par plus de 10 000 mineurs indépendants de 1989 à 1990. Photo : G. Giuliani.



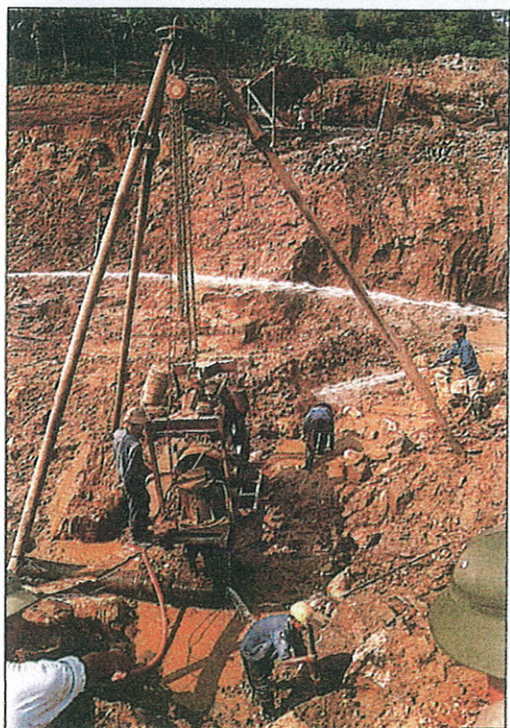
Exploitation mécanisée dans le placer éluvial à saphir de Bang Kacha, Thaïlande du Sud-est - Photo : D. Schwarz.



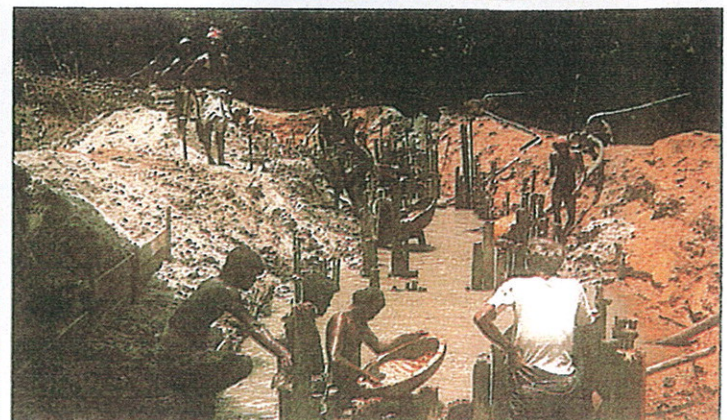
Stèle commémorant l'exploitation du premier gisement de rubis découvert au Viêt-nam : Khoan Thong dans la région de Luc Yen. Découvert en février 1987, exploité du 1/11/1989 au 30/04/95 par la Société Vinegemco qui a extrait 244 kg de rubis gemme. Photo : G. Giuliani.



Exploitation par la société Yen Bai Gem and Gold Compagny du placer à rubis de Tan Huong, région de Yen Bai. Photo : G. Giuliani.



Exploitation des placers à saphir dans les basaltes situés près de la frontière entre la Thaïlande et le Cambodge. Photo : D. Schwarz.



Activités minières dans les placers alluviaux à saphir de la région de Ratnapura, Sri Lanka - Photo : D. Schwarz.

Les placers à corindon gemme

Virginie GARNIER⁽¹⁾, Gaston GIULIANI^(2,3), Daniel OHNENSTETTER⁽¹⁾, Dietmar SCHWARZ⁽³⁾

1 : CRPG/CNRS, BP 20, 15 rue Notre Dame Des Pauvres, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France.

2 : IRD, Département Milieux et Environnement, 213 rue Lafayette, 75480 Paris, France.

3 : Gübelin Gemmological Laboratory, 102 Mathofstrasse, CH-6000 Lucerne 9, Suisse.

D'une manière générale, mis à part les rubis associés aux marbres, très peu de gemmes de très haute qualité sont issues de l'exploitation de gisements primaires. La plupart proviennent de l'exploitation de gisements secondaires sédimentaires, d'origine détritique, plus faciles à exploiter et moins coûteux.

1. Généralités

1.1 Mécanismes de formation des placers

Dans les régions tropicales à forte pluviosité, les roches sont très exposées à l'altération par les eaux météoriques. C'est notamment le cas de l'Asie du Sud-Est où l'on trouve de nombreux gisements secondaires dérivant de protolithes (gisements primaires des roches en place) aussi bien métamorphiques que volcaniques. La plupart des minéraux constitutifs de ces roches ignées s'altèrent en minéraux argileux, en oxyde(s) de fer et autres minéraux stables dans les conditions de surface. Ces minéraux secondaires s'accumulent dans les sols et peuvent aussi conduire à la formation de latérites si le processus d'altération météorique est suffisamment long et intense. Certains minéraux (dont le corindon et le zircon résistent à cette altération et s'accumulent dans les sols et les latérites et, ils se concentrent fréquemment dans des niveaux graveleux reposant sur les roches érodées qui les contenaient avant l'altération. Au Myanmar, ces niveaux gemmifères riches en minéraux argileux, en oxydes de fer et en sables sont localement nommés "byon" (Kane et Kammerling, 1992).

Le climat est un facteur déterminant dans la formation des gisements secondaires. En effet, les gisements de rubis associés aux marbres se rencontrent dans la zone des moussons de l'Asie Centrale et du Sud-Est, depuis l'Afghanistan à l'Ouest jusqu'au Viêt-nam à l'Est. Dans les régions tropicales et de basse altitude comme le Viêt-nam et le Myanmar, les gisements primaires de type marbre sont érodés et la majeure partie des gemmes se concentre dans des placers, souvent situés à

une distance relativement faible de la roche-source. Dans les régions de plus haute altitude, au climat plus froid et sec, comme en Afghanistan, au Pakistan et au Cachemire, il n'y a pas de placer et les cristaux de rubis sont extraits de leur matrice carbonatée, à l'aide de marteaux et de burins.

Ces gisements peuvent être classés en deux types (figure 20) :

- les dépôts éluviaux et colluviaux : les concentrations de gemmes résultent de la décomposition sur place de la roche-hôte. C'est souvent le cas des gisements basaltiques où la majorité des gemmes sont récupérées dans les formations éluviales, et très peu dans les roches magmatiques.

- les dépôts alluviaux : les gisements se forment par concentration après transport par les rivières, ce qui implique un éloignement significatif de la source. Dans ce cas, l'origine géologique des gemmes est parfois difficile à déterminer ; elle peut être étudiée à partir de l'analyse des inclusions solides et fluides piégées dans les gemmes et désormais approchée par leur composition isotopique en oxygène (figure 21).

Les gisements de type cordon littoral sont très peu décrits ; seul Goujou (2002) rapporte la présence de telles occurrences sur les plages vendéennes, en France. Le placer est de couleur rouge sombre, du fait de la présence d'une forte proportion de grenat, ilménite et magnétite qui représentent une fraction importante des sables rencontrés. Staurotite, zircon et rutile constituent une fraction intermédiaire. Tourmaline, épidote, amphibole, silicates d'alumine, apatite, anatase et limonite sont les minéraux rares de ce placer, associés au saphir. Le saphir a une couleur bleu marine à bleu nuit évoluant parfois vers l'incolor, une petite fraction montre une couleur bleu turquoise à bleu-vert, un seul cristal est de couleur jaune ; quelques cristaux sont automorphes. Les valeurs des isotopes de l'oxygène ($\delta^{18}O$ en pour mille, ‰) obtenues sur trois saphirs sont homogènes (figure 21). Elles indiquent que la source géologique de ces corindons est unique et probablement métamorphique.

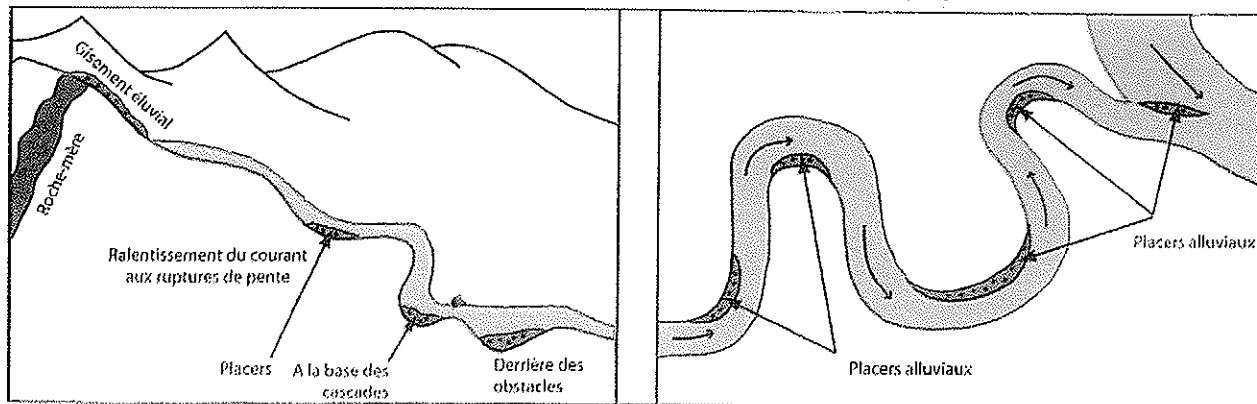
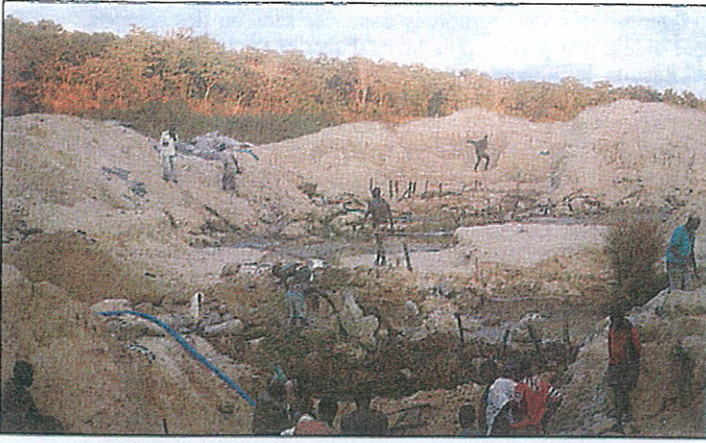


Fig. 20 : Modes de formation des placers. Après altération de la roche source, les gisements alluviaux se forment dans les zones des rivières et fleuves où la vitesse du courant chute : aux ruptures de pente, à la base des cascades, derrière des obstacles, aux points de confluence de plusieurs cours d'eau et sur la rive concave des méandres (Hughes, 1997)

Les corindons des placers



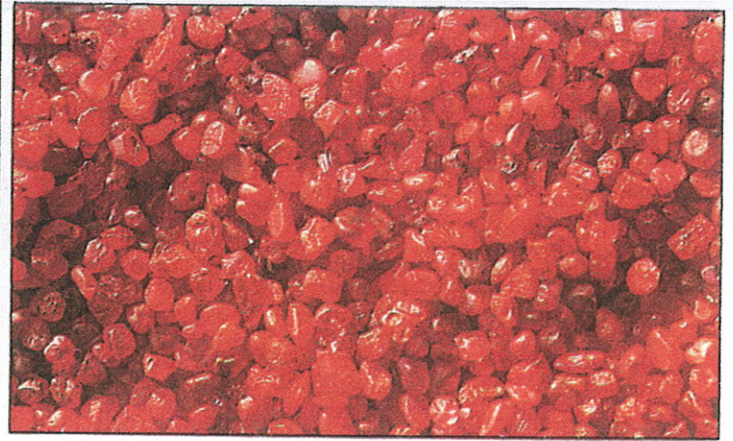
Exploitation des placers alluviaux à corindon gemme du gisement de Tundururu en Tanzanie - Photo : D. Schwarz.



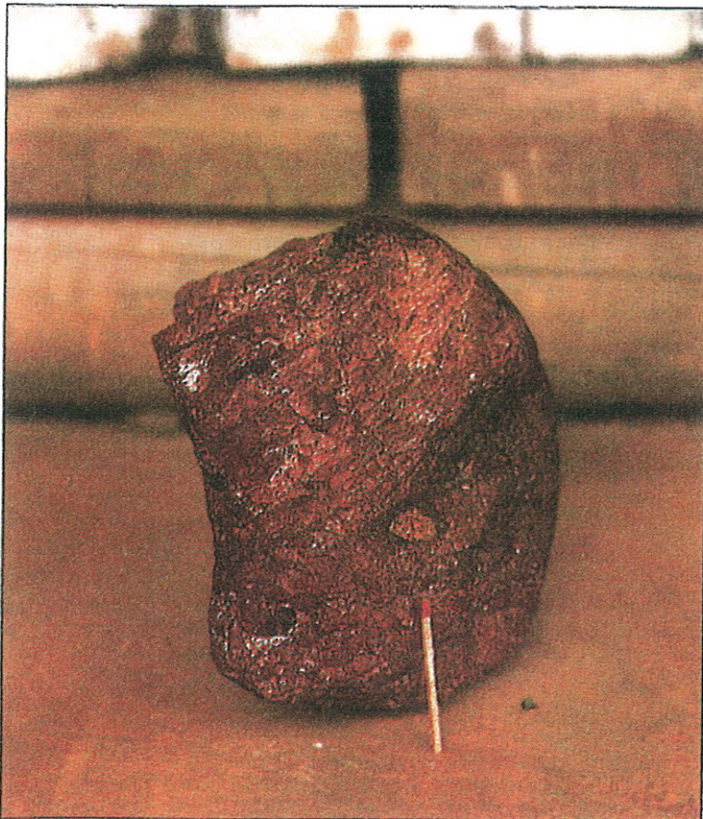
La rizière de Truc Lau en 1998. Ce site correspond à un paléopliacrer reconnu par sondages et tranchées. Il est formé par 10 mètres de sédiments au dessus du bed-rock dont un niveau de graviers et galets minéralisés pouvant atteindre 5 m d'épaisseur - Photo : G. Giuliani.



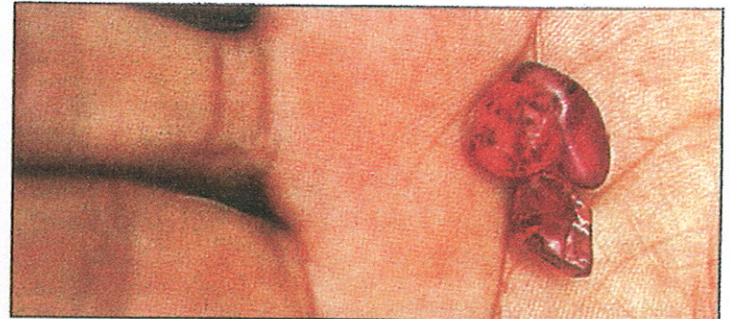
Grattage dans les cavités karstiques de la région de Khoan Thong, district de Luc Yen, Viêt-nam - Photo G. Giuliani.



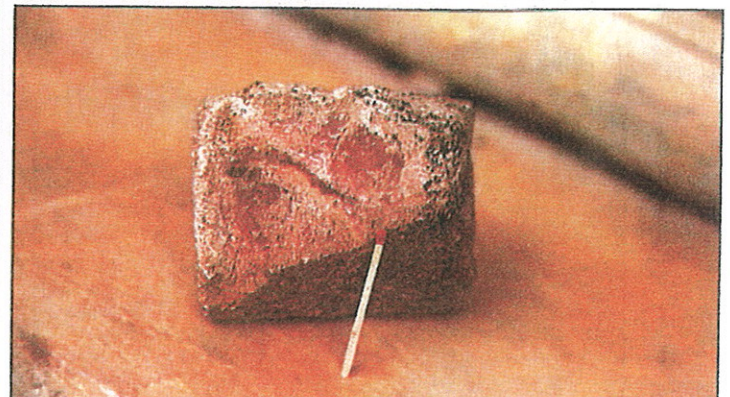
Les rubis gemmes issus des placers de Luc Yen exploités par la Société minière Yen Bai Gem and Gold Compagny à Yen Bai. Taille des cristaux émoussés : environ 5 mm - Photo : G. Giuliani.



Galet de corindon présentant des portions de rubis gemme. Hauteur du galet : environ 15 cm. Mine de Tan Huong, Région de Yen Bai, Viêt-nam - Photo : V. Garnier.



Rubis issus des placers de Luc Yen et vendus sur le marché de Luc Yen - Photo : G. Giuliani.



Cristal émoussé de spinelle provenant du placier de Tan Huong, Région de Yen Bai, Viêt-nam - Photo : V. Garnier.



Fig. 21 : Composition isotopique de l'oxygène des corindons colorés de quelques placers, notamment ceux associés aux marbres de l'Asie du Sud-Est. Le domaine isotopique représenté par une étoile noire correspond à celui des rubis et saphirs roses primaires trouvés dans les marbres. La totalité des rubis des placers s'inscrit dans ce domaine. SMOW = Standard Mean Ocean Water (eau moyenne des océans), standard de référence pour les analyses isotopiques d'oxygène

Un même placer peut renfermer des gemmes provenant de plusieurs sources. Le transport abrase les parties non gemmes des minéraux et en améliore la qualité. C'est notamment le cas des placers d'Ilakaka à Madagascar et de Tunduru-Songea en Tanzanie. Ces derniers s'étendent sur plusieurs kilomètres le long du fleuve. Les données isotopiques de l'oxygène mettent en évidence une source commune pour les deux placers avec des valeurs comprises entre 4 et 6 ‰, et deux sources bien distinctes à Tunduru avec des valeurs supérieures à 12 ‰ (figure 21).

1.2 Exploitation des placers

Une grande variété de méthodes sont utilisées pour exploiter les placers.

Dans les pays en voie de développement, la découverte d'un nouveau gisement entraîne souvent le déplacement d'importantes populations qui espèrent faire fortune ou tout au moins acquérir un meilleur niveau de vie. Ces mineurs indépendants, appelés "garimpeiros" au Brésil et "guaqueros" en Colombie, sont souvent équipés de pelles et de pioches avec lesquelles ils creusent des

puits, parfois profonds de plusieurs dizaines de mètres, jusqu'à atteindre la couche minéralisée. Les graviers gemmifères sont remontés dans des sacs ou des seaux à l'aide d'une poulie, puis lavés dans des tamis, à la rivière. Ensuite, les graviers sont triés à la main.

Les exploitations mécanisées permettent l'exploitation intensive des placers, notamment en Asie du Sud-Est, en Australie et en Amérique du Nord, plus rarement en Afrique et à Madagascar. Les couches stériles sont déplacées à l'aide de pelles mécaniques et de bulldozers. Les graviers gemmifères sont apportés à la laverie soit par camions, soit par un système de pompe. Ce type d'exploitation est classiquement utilisé en Asie du Sud-Est et à Madagascar.

Une laverie classique est composée d'un ou plusieurs trommels qui permettent d'éliminer les fragments de tailles inférieures ou supérieures aux tailles de coupures considérées dans l'exploitation et de jigs qui permettent de trier les galets selon leur densité. En fin de journée, les jigs sont vidés et les galets triés à la main.

Dans le cas de placers localisés dans le lit d'une rivière, une drague peut être utilisée pour racler le fond du lit et récupérer les graviers. Ce type d'exploitation a été mis en œuvre à Rock Creek, dans le Montana aux Etats-Unis, pour exploiter les gisements secondaires issus de l'érosion des filons de lamprophyre à saphir bleu. La laverie est directement fixée à la barge qui drague le fond de la rivière et fonctionne grâce au courant hydraulique.

Quand l'exploitation est développée en tenant compte de l'environnement, les impacts sur le milieu naturel sont minimes. De plus, les techniques de séparation mécanique (jigs) n'utilisent pas de produits chimiques polluants (contrairement à l'extraction de l'or par amalgamation au mercure, par exemple). La réhabilitation des sites après fermeture de la mine est assez aisée.

Cependant, dans les pays en voie de développement la législation minière n'est pas ou peu suivie par les compagnies minières et peu surveillées par les ministères des mines. Les rivières sont engorgées par un afflux de sédiments et de boue, les sites ne sont pas réhabilités.

2. Quelques exemples

2.1 Les placers basaltiques d'Australie

Les premiers saphirs des Nouvelles Galles du Sud ont été découverts en 1851, par le géologue S. Strutchbury dans des *sluices* utilisés pour la récupération d'or dans les rivières Cudgong et Macquarie. En 1854, W.B. Clark a observé des saphirs dans des *sluices* utilisés pour la récupération d'étain dans le district d'Inverell. Bien que la présence de saphirs ait été mise en évidence dans ce district, aucune opération minière ne fut engagée car ces saphirs furent jugés de basse qualité, alors que d'importantes quantités des ces minéraux furent découvertes entre 1869 et 1870.

Les opérations minières débutèrent en 1919, dans la localité de Fraser Creek, proche d'Inverell. Cette année-là, environ 250 grammes de saphirs seulement furent extraits du lit de la rivière, mais ce fut suffisant pour continuer le développement des activités minières, qui progressèrent dans les régions d'Inverell et de Glen Innes. L'industrie du saphir demeura stable jusqu'à la Grande Dépression de 1930, après quoi la production chuta brutalement jusqu'à la cessation des activités au début des années soixante.

King's Plain est une des régions les plus riches, dans le district de la Nouvelle Angleterre dans les Nouvelles Galles du Sud. Cette région a été exploitée par la société Great Northern Mining. Les rendements moyens y étaient de 100 US \$/m³, ils atteignirent 1500 US \$/m³ (plus de 1 kg de corindon par m³) en 1993 et 1994. Ces rendements sont remarquables et jamais atteints par ailleurs dans le monde.

Madagascar : ruée sur les saphirs !

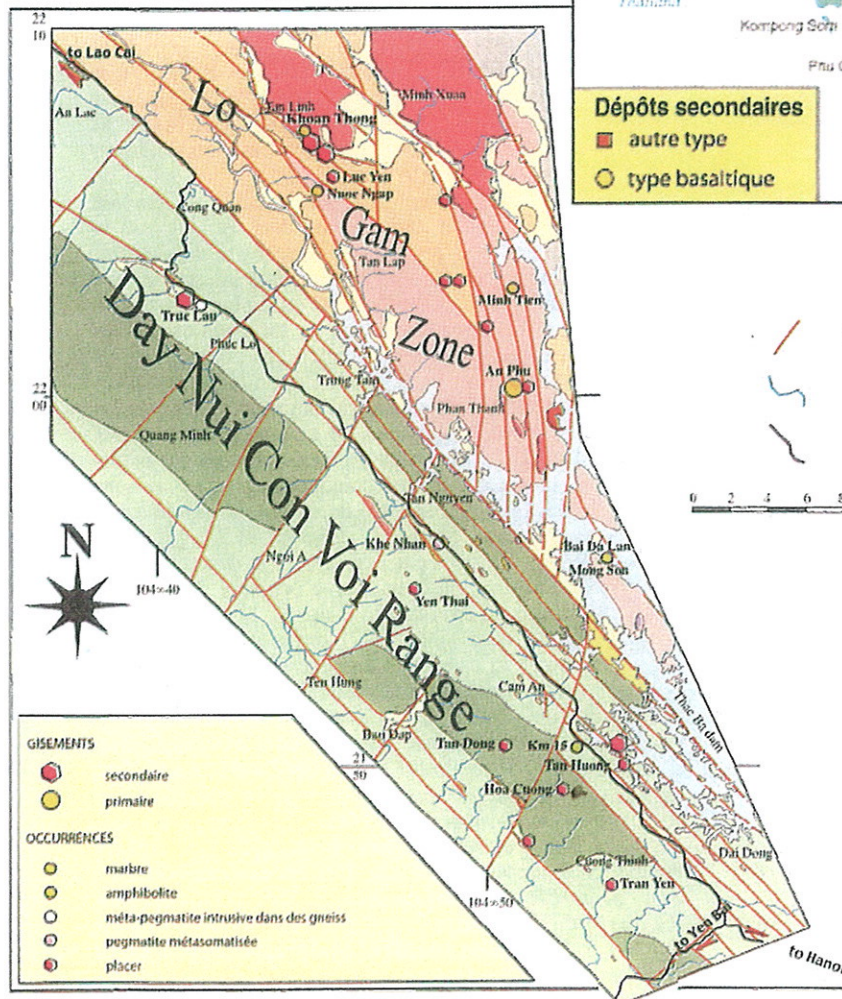
"Succédant au gisement de Fort Dauphin (sud-est de Madagascar) et à celui de Diego (nord de l'île), la rivière Ilakaka, au sud de l'île, sur 150 km x 10 km, aurait été le siège en 1999 d'une ruée minière estimée à 150 000 personnes, suite à la découverte d'un gîte alluvionnaire de saphirs. On y trouve des pierres roses, des chrysobéryls œil de chat, des saphirs gueudas, blanc laiteux, et de beaux saphirs bleus. Le commerce en est organisé par des thaïlandais mais constituerait hélas une méthode de blanchiment d'argent..."

Chronique Rech. Min. 538 - 2000.

Fig. 22 : Carte de l'Indochine avec la localisation des différents types de gisements de corindon et l'emprise de la carte ci-dessous



Fig. 23 : Carte géologique montrant les domaines tectoniques majeurs de la zone de cisaillement du Fleuve Rouge et la localisation des principaux gisements et occurrences à rubis et saphirs (modifié d'après Phan Trong et Hoàng Quang, 1997)



- Dépôts secondaires**
- autre type
 - type basaltique
- Chaîne de Day Nui Con Voi**
- Sédiments quaternaires
 - Formation de Phan Luong : sédiments néogènes
 - Formation de Ngòi Chi : schiste à quartz-sillimanite-biotite, schiste à grenat-sillimanite-biotite-quartz, gneiss, migmatite et veines de quartz
 - Formation de Núi Voi : plagiogneiss, schiste à grenat-biotite-sillimanite, amphibolite, lentilles de marbre, quartzite
 - Complexe granitique de Tân Hoàng
 - Complexe de Cam An : gabbro, diorite
 - Complexe de Bao Ai : pyroxénite, hornblende
- Zone tectonique de Lo Gam**
- Sédiments quaternaires
 - Formation de Dai Thi : schiste à quartz-mica-feldspath, schiste à quartz-biotite-sérite
 - Formation d'An Phu : Protérozoïque supérieur - Cambrien inférieur : marbre calcitique, marbre dolomitique à phlogopite-graphite-margarite
 - Formation de Thue Ba : Protérozoïque supérieur - Cambrien inférieur : mica-schiste, schiste à quartz-biotite ou à muscovite, gneiss, migmatite, marbre, quartzite
 - Complexe de Núi Chua : gabbro à ilvite ou pyroxène ou amphibole
 - Complexe de Phia Bie : granite à biotite, pegmatite et aplites
 - Complexe de Phia Ma : granosyenite à hornblende-grenat ou à pyroxène
- FAILLES**
- Faille
 - Rivière
 - Route
- GISEMENTS**
- secondaire
 - primaire
- OCCURRENCES**
- marbre
 - amphibolite
 - méta-pegmatite intrusive dans des gneiss
 - pegmatite métasomatisée
 - placier

2.2 Les placers associés aux marbres du Viêt-nam

Des rubis et saphirs ont été découverts et exploités dans de nombreuses régions du Viêt-nam (figure 22). Actuellement, des rubis et des saphirs roses et bleus sont exploités dans les provinces de Luc Yen et Yen Bai au Nord et dans la province de Nghe An au centre (placers de Quy Chau). Au Sud du Viêt-nam, des saphirs bleu foncé, jaunes et verts sont exploités dans les placers de Dak Nong et Binh Thuan, dans les provinces respectives de Dak Lac et Lam Dong.

En 1983, un rubis a été découvert par un cartographe dans la région d'An Phu (district de Luc Yen), à environ 270 km au Nord d'Hanoi (figure 23). Le placer a ensuite été exploré en détail et exploité dès 1987. En mars 1988, le gouvernement vietnamien a fondé la société Vingemco (Vietnam gemstones Company) pour y contrôler les activités minières. La même année, Vingemco et BH. Mining Co. de Thaïlande ont établi une "joint-venture" (un projet commun) dans le but d'exploiter le placer de Khoan Thong. Entre novembre 1989 et mars 1990, 244 kg de corindons de qualité gemme en ont été extraits. La majeure partie de la production a été vendue et taillée à Bangkok.

Entre 1990 et 1994, des milliers de mineurs indépendants ont envahi la région et de nouvelles occurrences primaires de corindon gemme ont été découvertes notamment à Minh Thien, Nuoc Ngap, Hin Om, Khau Nghiem, Vang Sao, May Thuong et May Ha. A la même époque, des rubis et saphirs gemmes ont été extraits des placers. Toutes ces pierres ont ensuite été vendues sur le marché de Luc Yen.

Entre 1994 et 1995, des rubis ont été découverts dans les régions de Tan Huong et Truc Lau. Ces deux mines sont actuellement exploitées par la société Yen Bai Gem and Gold Company. En avril 1997, deux galets de rubis, dont le "Star of Vietnam", de poids respectifs 2,58 et 1,96 kg, ont été extraits du placer de Tan Huong. Ces deux pierres ont été déclarées "Trésor d'Etat" et ne peuvent être vendues.

La mine de Quy Chau est localisée dans la province de Nghe An, à environ 120 km au Nord-Ouest de la ville de Vinh et 300 km au Sud d'Hanoi (figure 22). Le premier rubis y a été découvert en 1988. Entre 1989 et 1990, 10000 mineurs, originaires de l'ensemble du territoire vietnamien, ont migré dans cette région. Les activités minières illégales échappèrent au contrôle de l'Etat et des centaines de personnes périrent dans un effondrement en juillet 1990, dans la mine de Ho Ty. Les rubis issus des placers de Quy Chau sont souvent de belle qualité. Au cours d'une vente, un rubis brut de 56 carats a été vendu 562000 US\$.

Les minéralisations primaires à rubis n'ont, par contre, jamais été observées. Cependant, la composition isotopique de l'oxygène de ces corindons (figure 21) indique qu'ils se sont formés dans des marbres, comme les rubis issus des placers des provinces de Luc Yen et Yen bai (Garnier, 2003).

Depuis 1991, des saphirs bleus, verts et rarement jaunes ont été trouvés dans les provinces basaltiques du Sud du Viêt-nam. Il proviennent de gisements éluviaux issus de l'altération météorique des basaltes. Les premiers saphirs ont été découverts à Dak Nong, dans la province de Dak Lak (saphirs bleus et noirs) ; puis à Di Linh dans la province de Lam Dong (saphirs verts et jaunes). Ces saphirs sont transparents à translucides ou opaques, et le pourcentage de pierres gemmes est très faible. Entre 1992 et 1995, la mine de Dak Nong a été exploitée par les paysans locaux, et des centaines de kilogrammes de saphirs en ont été extraits. En 1996, la compagnie Tay Huyen Gem and Gold Company a été créée pour gérer son exploitation. Après une étude géologique approfondie, l'exploitation a débuté en 1997. Du fait de la faible quantité de gemmes de qualité, la compagnie a cessé ses activités en 2000.

2.3 Les placers à saphirs d'Irakaka à Madagascar et de Tunduru en Tanzanie

Dans certains cas, la localisation de la roche-hôte des corindons est très éloignée du bassin sédimentaire où se trouvent les rubis et saphirs. L'origine des protolithes des

corindons est alors difficilement identifiable. En outre, certains placers correspondent au remaniement de paléo-placers, ce qui rend encore plus difficile la détermination de la roche-source.

Les gisements d'Irakaka sont situés dans le Massif de l'Isalo, entre les villes de Sakahara et Ranohira (figure 16), au Sud de Madagascar. Les saphirs libellés d'Irakaka proviennent de différents secteurs miniers situés entre les villes d'Irakaka et de Sakahara, il s'agit notamment des secteurs de Sakaloma, Ampasimanaitaka, Vohimena, Bekily et Manumbo Vaovao.

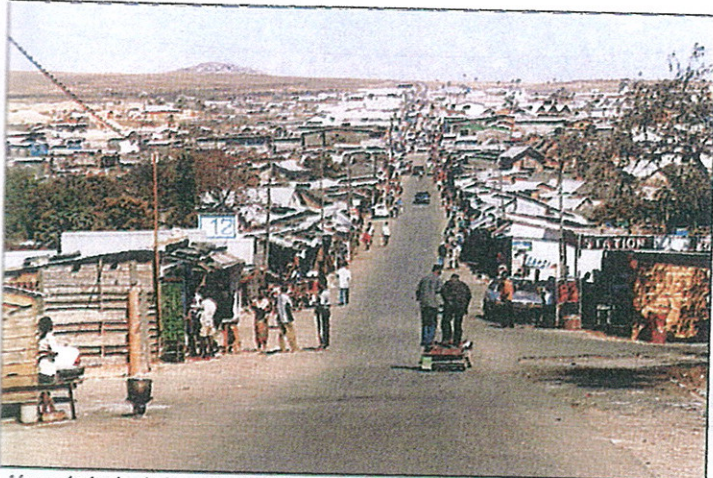
Le gisement principal d'Irakaka a été découvert à la fin des années quatre-vingt-dix, a fourni et continue de fournir des saphirs de toutes les couleurs (rose, jaune, mauve, vert), généralement très plats et de poids moyen inférieur à 5 carats. Quelques saphirs bleus, plus trapus, de plus de 9 carats ont été découverts dans ce gisement, ainsi que des rubis. Ces saphirs sont associés à du zircon, du chrysobéryl (alexandrite), de la topaze, du grenat, du spinelle, de l'andalousite et de la tourmaline.

Un gisement récent, découvert en février 2003, se situe à 38 km au Sud-ouest d'Irakaka. Il s'agit du placer de Manumbo Vaovao appelé à devenir un gisement à tonnage important. En août 2003, environ 2000 personnes avaient rejoint le site et participé au "rush" sur le saphir, puis posé la première pierre de la future ville de Manumbo sur la RN7. Le placer est exploité le long de la rivière Andongoza, soit à la batée directement dans le cours d'eau, par les femmes et les enfants, soit par des puits de moins de 1m de diamètre, de 10 à 20 mètres de profondeur. Les graviers à saphirs extraits de ce puits sont lavés dans la rivière. Lors de notre visite, les pierres observées faisaient moins de 1-1,5 carat, mais présentaient la même gamme de couleurs que celles rencontrées au gisement principal d'Irakaka.

Durant l'été 2000, seules deux exploitations mécanisées étaient en activité à Irakaka. La majorité des pierres issues de ce gisement ont été trouvées par des mineurs indépendants qui travaillent à la pelle et à la barre à mine, dans des puits de profondeur supérieure à 20 mètres, sans aucune sécurité ni assistance. Les mineurs exploitent les terrasses alluviales des rivières Irakaka et Benahy. Ces terrasses alluviales reposent sur les grès de l'Isalo. Elles sont constituées essentiellement de sables quartzeux et renferment des galets de grès ferrugineux très plats (latérite), des blocs de grès de l'Isalo bien arrondis et des galets de quartz, quartzites et schistes issus de l'érosion des grès de l'Isalo : elles sont peu consolidées. Sur les rives de la Benahy, au moins trois niveaux de terrasses se distinguent, tous trois gemmifères. Ce sont les terrasses les plus basses qui ont les plus fortes concentrations en saphir (figure 24). Des tests de richesse réalisés dans les terrasses exploitées mécaniquement ont mis en évidence des concentrations variant de 0,4 à plus de 5 g/m³. Cependant, certaines terrasses, exploitées artisanalement, ont montré des teneurs supérieures à plusieurs dizaines de grammes par m³. Elles correspondent à des marnites profondes ou des méandres très sinueux inexploitablement pour des raisons d'accessibilité. En outre, le sable de rivière, pris en lit vif, a des teneurs en saphir comprises entre 0,2 et 2,1 g/m³. Ces terrasses se sont formées par l'érosion et le démantèlement des grès de l'Isalo. Ainsi, la source primaire des saphirs reste inconnue. Cependant, d'après les travaux de Dissanayake et Chandrajith (1999), des gisements primaires ont pu se former au cours de l'orogénèse panafricaine, dans la ceinture minéralisée qui s'étendait du Mozambique à l'Antarctique (figure 25), avant la fracturation du Gondwana, et être du même type que ceux rencontrés dans la ceinture du Mozambique ou au Sri Lanka. La grande variété des couleurs et des formes suggère que plusieurs sources primaires sont envisageables.

Les données isotopiques en oxygène des saphirs mettent en évidence l'existence d'au moins deux sources : une première correspondant à des valeurs très légères comprises entre 2 et 4 ‰ ; une seconde définie par des valeurs plus lourdes, comprises entre 14,0 et 16,5 ‰.

Le placer d'Ilakaka, Madagascar



Vue générale de la ville d'Ilakaka le long de la RN7. - Photo : G. Giuliani.



Les comptoirs de vente de saphir du producteur au négociant.
Photo : G. Giuliani.

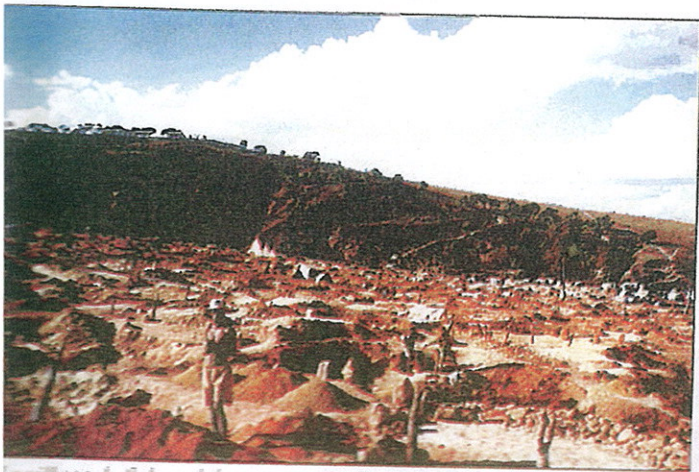


Coupe du placer d'Ilakaka
dénommé "la Banque Suisse" par
les mineurs.
Exploitation par bancs de
la concession minière
de J.N. Andrianasolo.
Photo : G. Giuliani.

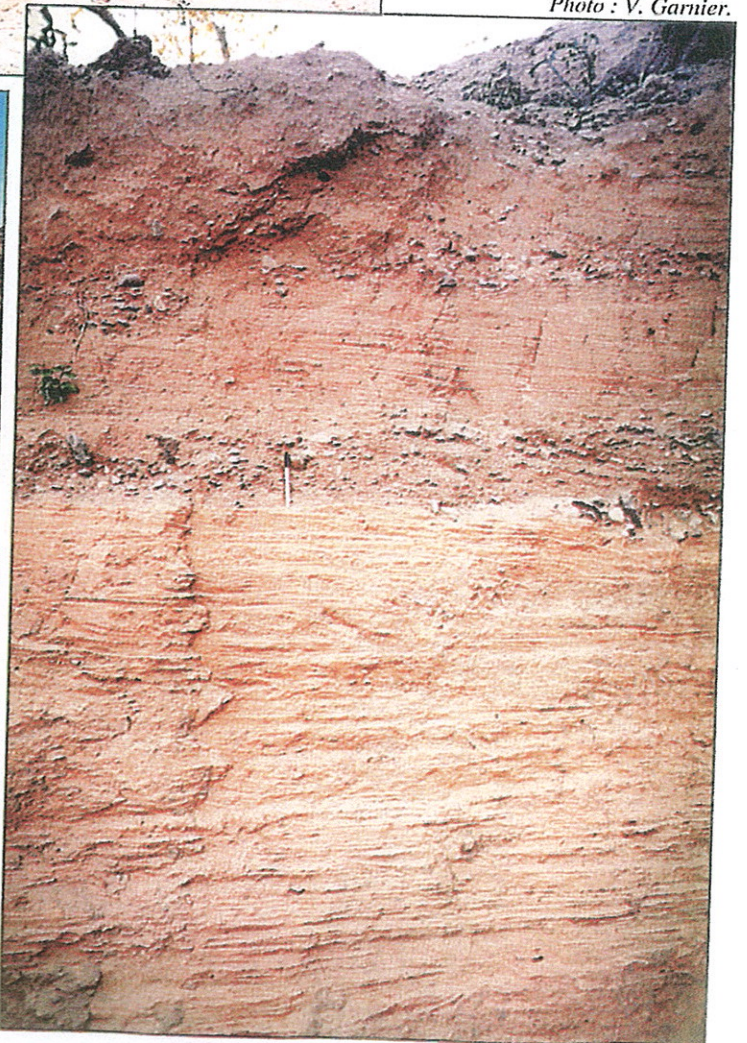
Vue sur une des terrasses à rubis
exploitées par les mineurs
indépendants de la mine
de Vohimena Talo
Photo : V. Garnier.



Vue du village de mineurs de Vohimena Talo, district d'Ilakaka
Photo : V. Garnier.

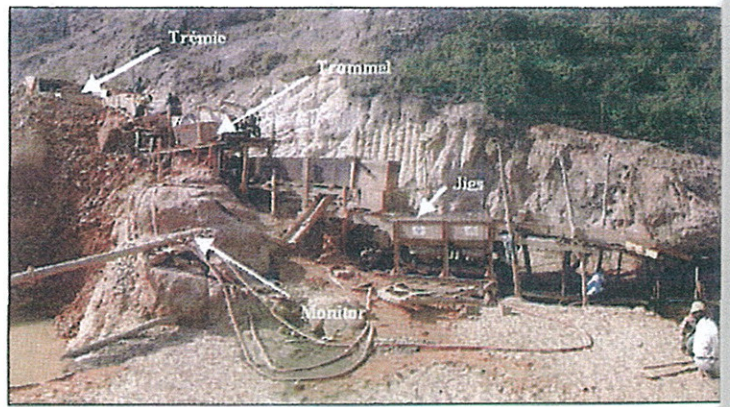


Le village de Sakameloka et ses puits d'exploitation - Photo : V. Garnier.





Exploitation par une galerie étayée, dans le placer de Vohimena Talo.
Photo : V. Garnier.



Laverie permettant la séparation des sables et galets selon leur densité, placer de Vohimena Talo. - Photo : V. Garnier.



Lavage à la rivière par batoyage des galets et sables minéralisés, village de Vohimena Talo - Photo : V. Garnier.



Saphirs colorés et rubis extraits des placers d'Ilakaka.
Taille des cristaux environ 7-8 mm - Photo : G. Giuliani.



Lavage à la rivière du minerai extrait à Sakameloka dans le district d'Ilakaka - Photo : V. Garnier



Les outils utilisés par les mineurs indépendants du gisement de saphir de Manumbo Vaovao - Photo : G. Giuliani.



Le gisement de Manumbo Vaovao, 30 km à l'Ouest d'Ilakaka, découvert en février 2003. Aspect des puits réalisés dans la terrasse alluviale et du village précaire installé dans le lit de la rivière Andongoza. Photo : G. Giuliani.

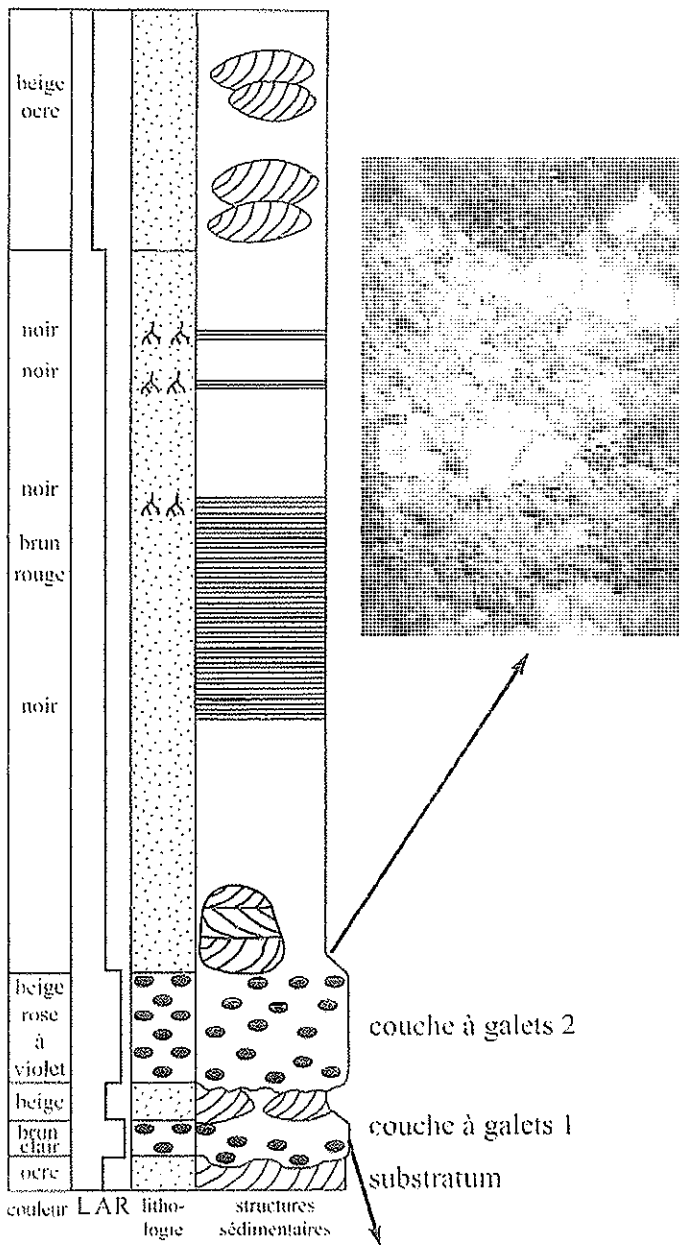


Fig. 24 : Coupe-type, illustrée par des photos, des terrasses minéralisées exploitées dans la région de Volimena Talo, district d'Irakaka à Madagascar. Granulométrie : L = limite ; A = arénite et R = rudite

CONCLUSIONS

Les placers représentent la première source industrielle de saphirs. En effet, leur exploitation s'effectue à moindre coût, par rapport aux gisements primaires qui nécessitent l'extraction des gemmes contenues dans des roches. Les placers les plus importants sont localisés dans des régions tropicales, de basse altitude, donc facilement accessibles et généralement fortement drainées.

Déterminer la source de saphirs n'est pas toujours aisé. Dans le cas de gisements éluviaux, il n'y a pas d'ambiguïté sur

la roche source. Dans le cas de placers alluviaux et côtiers, les gemmes ont pu être transportées sur de longues distances. C'est également le cas de placers formés par le remaniement de gisements déjà secondaires. Dans ces cas, l'étude des caractéristiques gemmologiques (couleur, habitus), mais surtout l'analyse des inclusions solides et fluides, ainsi que les caractéristiques géochimiques et la signature isotopique des corindons peuvent permettre de remonter aux origines géologiques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le CRPG/CNRS de Vandœuvre-lès-Nancy, l'IRD et son représentant à Hanoi M. Berger ainsi que M. de Grossouvre et Dhersigny à l'Ambassade de France au Pakistan pour leur soutien logistique et financier.

Nos remerciements vont également à Phan Trong Trinh et Hoàng Quang Vinh du CNST de Hanoi et à Pham Van Long de Vigeco à Hanoi, Viêt-nam, au Professeur Upreti de l'Université de Kathmandou au Népal, à M. Kausar, Gauhar et Sakawat du "Geological Survey of Pakistan" à Islamabad, à M. Malik de la Société Minière AKMDC de l'Azad Kashmir pour leur accueil, aide logistique et le travail réalisé sur le terrain avec leurs équipes, à J. Dubessy et T. Lhomme de l'UMRG2R à Vandœuvre-lès-Nancy; à M. Fallick du SUERC à Glasgow et de M. Pêcher du LGCA à Grenoble.

Nous remercions également M. Chiappero du Museum National d'Histoire Naturelle de Paris, Mme Bariand, M. Hänni du SSEF à Bâle, M. Saul de la Société ORYX à Paris, Mme Sutherland de l'Australian Museum de Sydney en Australie, M. Moine de Toulouse pour avoir autorisé gracieusement la reproduction de leurs photos.

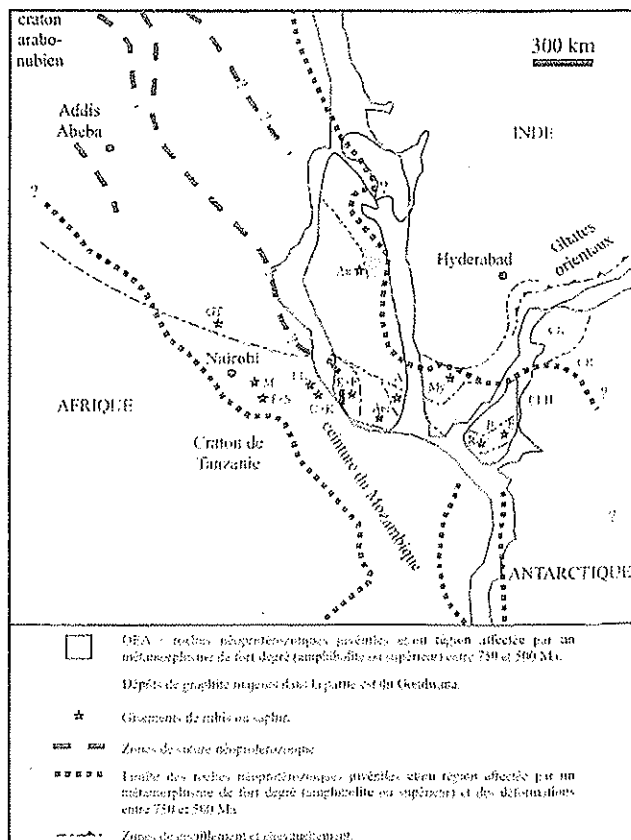


Fig. 25 : Juxtaposition du Sri Lanka, du Sud de l'Inde, de Madagascar et de l'Afrique dans le super-continent Gondwana (modifié d'après Service géologique de Madagascar, 1977 ; Collins et Windley, 2002 ; Dissanayake et Chandrajith, 1999 ; Mercier et al., 1999). CN : complexe de Napier ; CR : complexe de Rayner ; LH : complexe de Lützow-Holm ; OEA : Orogène Est Africain. Gisements de rubis ou saphirs du Kenya : GT = Garba Tula, M = Mangari, T + SN = Twiga et Si Ndoto ; de Tanzanie : K = Kalalani, LL = Longido et Lonsogonni ; de Madagascar : Am = Ambosary, A = Andranondambo, An = Antsiraké, E + F = Ejeda et Foadrevo ; d'Inde : My = Mysore

Glossaire

Amphibolite – Roche du métamorphisme général, souvent assez massive, vert sombre à noire, essentiellement constituée de cristaux d'amphibole plus ou moins ordonnés dans les plans de schistosité, avec des feldspaths et peu ou pas de quartz. Elles dérivent souvent des roches sédimentaires (pélites, marnes) ou volcano-sédimentaires ; ce sont des para-amphibolites ; ou de roches magmatiques (basaltes, diorites, gabbro) : ce sont des ortho-amphibolites.

Analcime – Zéolithe, $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, du système cubique, en trapézoèdres blancs nacrés, mais le plus souvent en très petits cristaux sous forme de minéral d'altération des roches alcalines.

Anatexite – voir migmatite.

Automorphe – Par opposition à xénomorphe, s'applique à un minéral présentant la forme du cristal parfait.

Basalte – Roche magmatique effusive très commune, noire, à texture microlitique et comportant de cristaux de plagioclase et de pyroxène, parfois accompagnés d'olivine.

Carbonatite – Roche ignée composée de 80 % de carbonates.

Charnockite – Granite à hypersthène pouvant être associé à des syénites et des tonalites à hypersthène.

Chromophore – Élément qui donne sa couleur à une gemme. Dans le cas des corindons, il s'agit de métaux appartenant à la famille des éléments de transition : chrome pour le rubis et fer et titane pour le saphir.

Cipolin – Calcéaire métamorphique à minces veines et se débitant en fines pelures d'oignon.

Columbite – Oxyde de la famille des niobio-tantalates, de formule $(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{NbTa})_2\text{O}_6$, présents dans des pegmatites granitiques. La columbite est le terme niobifère.

Cumulat – Roche magmatique grenue formée de cristaux issus de la cristallisation fractionnée et accumulés, sous l'action de la gravité, au sein d'un magma. Les cristaux accumulés sont les "cumulus", ils sont cimentés par les "intercumulus".

Extrusif – Qui atteint la surface de la terre à l'état fondu, comme les laves.

Felsique – Par opposition à mafique, s'applique aux roches riches en minéraux de couleur claire comme le quartz et les feldspaths.

Gabbro – Roche magmatique plutonique grenue, de teinte générale verte noirâtre, plus ou moins mouchetée de blanc et composée de plagioclase et de clinopyroxène interstitiel. La troctolite est une variété de roche gabbroïque à plagioclase et olivine, plus ou moins serpentinisée. La norite est une roche gabbroïque à plagioclase et orthopyroxène.

Gneiss – Roche métamorphique à grain grossier à moyen, à foliation nette caractérisée par des lits de teinte sombre (riches en micas, amphiboles, ...) alternant avec des lits clairs de quartz et de feldspaths.

Granulite – Roche métamorphique de haute pression et haute température, à grain fin avec quartz leucoclaire et feldspath dominants, hypersthène et grenat et accessoirement sillimanite, disthène, rutile, cordiérite et spinelle.

Harzburgite – Périodote à olivine (plus de 40 %) et orthopyroxène, contenant moins de 5 % de clinopyroxène et des phases accessoires comme le spinelle et le plagioclase.

Intrusif – Qui a pénétré dans des formations déjà constituées. S'applique aux roches magmatiques mises en place à l'état fluide sous la surface et aux massifs qu'elles constituent.

Jig – Les jigs sont communément utilisés dans l'industrie minière pour séparer des minéraux de densités contrastées. La séparation des minéraux se fait par des pulsations d'eau au travers d'un lit de minéraux, entraînant les minéraux lourds au fond du lit et la remontée des particules moins denses en surface.

Komatite – Roche volcanique ultramafique à olivine et pyroxène caractérisée par une grande richesse en magnésium (20 à 30 % de MgO). Ces roches se sont formées au Précambrien, par de forts taux de fusion partielle (> 30 %).

Lamprophyre – Groupe de roches porphyritiques, souvent filoniennes, avec des phénocristaux de biotite, amphibole et pyroxène, dépourvues de feldspath.

Lherzolite – Roche magmatique grenue de type périodote à olivine (plus de 40 %), orthopyroxène et clinopyroxène (plus de 3 %).

Mafique – S'applique aux roches contenant des minéraux riches en magnésium et fer.

Marbres – Calcaires métamorphisés.

Métamorphisme – Transformation d'une roche à l'état solide du fait d'une élévation de température et/ou de pression, avec cristallisation de nouveaux minéraux, dits néoformés, et acquisition de textures particulières. On distingue deux grands types de métamorphisme :

le métamorphisme général ou régional ; il affecte l'ensemble des roches sur des épaisseurs et surfaces importantes. Dans les grandes chaînes plissées, le métamorphisme est responsable de la formation des ensembles de schistes, micaschistes et gneiss.

le métamorphisme de contact ; il est localisé au contact des roches magmatiques avec les roches intrudées.

Métasomatisme – Métamorphisme allochimique qui s'accompagne d'une modification (métasomatose) de la composition chimique des roches originelles.

Miarole – Petite cavité remplie de minéraux pneumatolytiques (minéraux formés entre 600 et 400°C, à partir de vapeurs et enrichis en bore, chlore et fluor).

Migmatite – Mélange de roches de type granite et gneiss, celui-ci en général à grain grossier et à foliation souvent peu marquée ou confuse. Ces roches sont à la limite des roches métamorphiques de fort degré et des roches magmatiques. Elles se forment par anatexite (ou fusion) partielle : certaines parties de la roche fondent et constituent le mobilisat, d'autres restent solides (restites peu ou pas affectées par la fusion) ; la roche initiale est appelée paléosome. L'ensemble des variétés de migmatites sont regroupées sous le nom d'anatexites.

Monchiquite – Lamprophyre à phénocristaux d'amphibole, biotite, clinopyroxène ± olivine et mésostase vitreuse ou de feldspathoïde.

Ophiolite – Ensemble de roches magmatiques basiques et ultrabasiques. La trilogie ophiolitique est représentée par des basaltes souvent en coussins (pillow lavas), des roches mafiques – dolérites souvent en filons et roches gabbroïques – et des roches ultramafiques souvent serpentinisées, d'origine mantellique représentant des fragments de la croûte océanique.

Ouachbite – Lamprophyre ultramafique à phénocristaux d'olivine, de phlogopite, d'amphibole ± clinopyroxène et mésostase à feldspathoïdes ± carbonates.

"Padparadscha" – Ce terme dérive du Sanskrit/Cinghalais et caractérise une couleur rose-orangée semblable à celle de la fleur de lotus.

Paragneiss – Gneiss formé à partir de roches sédimentaires.

Pegmatite – Roche magmatique silicatée dont les cristaux, fréquemment automorphes, sont de grande taille (un à plusieurs centimètres ou décimètres, parfois plus du mètre).

Péridotite – Roche de couleur jaune orangé à vert noirâtre, constituée essentiellement d'olivine (plus de 40 %) accompagnée de pyroxène (ortho ± clinopyroxène), ± spinelle ± plagioclase et plus rarement d'amphibole, de biotite et de grenat.

Porphyroblaste – Cristal de grande taille ayant cristallisé dans une roche métamorphique.

Protérozoïque – Période la plus récente du Précambrien (2500 à 570 Ma).

Pull-apart – Bassin de sédimentation allongé qui s'est constitué sur une zone de décrochement.

Pyriclaseite – Métabasite (roche basique métamorphisée) de fort degré de métamorphisme, riche en pyroxène et plagioclase.

Rift ou graben – Fossé continental limité par des bords surélevés, formé dans un contexte tectonique d'extension, avec une activité volcanique plus ou moins forte.

Scapolite – Tectosilicate du système quadratique, en baguettes prismatiques bipyramidées, formant une série isomorphe de la marialite $(\text{Cl}, \text{SO}_4, \text{CO}_3)_2\text{Na}_2[\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_7]$ à la méonite $(\text{Cl}, \text{SO}_4, \text{CO}_3)\text{Ca}_2[\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_7]$.

Serpentinite – Roche dérivant, par altération et/ou métamorphisme, de périodites, et composée de serpentines, chrysotile, antigorite ou lizardite accompagnés de magnétite. Les olivines se serpentinisent en premier, suivies par les orthopyroxènes puis les clinopyroxènes.

Skarn – Roche du métamorphisme de contact des granites, caractérisé par une texture grenue avec souvent de grands cristaux de 1 à 20 cm, issue de roches qui, au contact du granite ont subi des transformations chimiques et des interactions avec des fluides issus de ces derniers.

Sluice – La séparation de minéraux et de métaux, notamment de l'or, par sluice consiste à faire glisser, par gravité et par apport d'eau, ces minéraux sur une pente en bois, où ils sont séparés selon leur densité.

Sous-saturé – S'applique à toute roche magmatique déficitaire en SiO_2 .

Subduction – Enfouissement de la lithosphère océanique sous une autre lithosphère, le plus souvent continentale.

Syénite – Roche magmatique avec comme minéral essentiel les feldspaths alcalins accompagnés d'un peu de biotite, de hornblende et avec des phases mineures comme le quartz ou la néphéline.

Trommel – Sorte de tambour recouvert d'un grillage à maille de taille calibrée et utilisé dans le traitement des minerais pour éliminer les particules de taille inférieure à la maille.

Uranopyrochlore – Oxyde des pegmatites, granites et syénites, de formule $(\text{U}, \text{Ca}, \text{Ce})_2(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_7(\text{OH}, \text{F})$ appartenant à la série pyrochlore – microfite, mais enrichi en uranium.

Xénolithe – Enclave dans une roche magmatique. Une enclave est une masse de roche qui a été mécaniquement arrachée et emballée dans une autre roche.

Xénocristaux – Cristaux exogènes à la roche magmatique et provenant de la dissolution et de la dislocation des xenolithes.

Bibliographie

- ABOOSALLY S. (1999) - Update on production in Pakistan. Afghanistan. *Jewellery News Asia*, vol. January, pp. 60-64.
- AÏTHERR R., OKRUSCH M. & BANK H. (1982) - Corundum and kyanite-bearing anatectites from the Precambrian of Tanzania. *Lithos*, 15, pp. 191-197.
- ANDRONOPOULOS B. (1964) - Preliminary report on the geological and ore deposit reconnaissance of red corundum outcrops near Xanfli, Athens. Institute for Geology and Subsurface Research.
- ANDREOLI M.A.G. (1984) - Petrochemistry, tectonic evolution and metasomatic mineralizations of Mozambique belt granulites from S Malawi and Tete (Mozambique). *Precambrian Research*, 23, pp. 161-186.
- ANDRIAMAROFAHATRA J. & DE LA BOISSE H. (1986) - Premières datations sur zircon du métamorphisme granulitique du sud-est de Madagascar. 11 - Réunion des Sciences de la Terre, Clermont-Ferrand, p.3.
- ANTHONY J.W., BIDEAUX R.A., BLADH K.W. & NICHOLS M.C. (1997) - Handbook of Mineralogy, vol. III, Halides, Hydroxides, Oxides. *Mineral Data Publishing Tucson, Arizona*, p. 139.
- ASPEN P., UPTON B.G.J. & DICKIN A.P. (1990) - Anorthoclase, sanidine and associated megacrysts in Scottish alkali basalts: high-pressure syenitic debris from upper mantle sources? *European Journal of Mineralogy*, 2, pp. 503-517.
- ATKINSON D. & KOTHAVAI R.Z. (1983) - Kashmir sapphire. *Gems & Gemology*, 19, pp. 64-76.
- BARJAND P. & PIROU J.P. (1985) - Larousse des pierres précieuses, fines, ornementales, organiques. *Librairie Larousse, Paris*, 261p.
- BAROT N., FLAMMINI A., GRAZIANI G. & GUBELIN E.J. (1989) - Star sapphire in Kenya. *Journal of Gemmology*, 21, pp. 467-473.
- BAROT N. & HARDING R.R. (1994) - Pink corundum from Kitui, Kenya. *Journal of Gemmology*, 24, pp. 165-172.
- BARR S.M. & MACDONALD A.S. (1979) - Palaeomagnetism, age and geochemistry of the Denchai basalt, Northern Thailand. *Earth and Planetary Science Letters*, 46, pp. 113-124.
- BARR S.M. & MACDONALD A.S. (1981) - Geochemistry and geochronology of late Cenozoic basalts of southeast Asia. *Geological Society of America Bulletin*, 92, pp. 1069-1142.
- BOTTRILL R.S. (1998) - A corundum-quartz assemblage in altered volcanic rocks, Bond Range, Tasmania. *Mineralogical Magazine*, 62, pp.325-332.
- BOWERSON G.W. & CHAMBERLIN B.E. (1995) - Gemstones of Afghanistan. *Geoscience Press, Tucson*, 240p.
- BOWERSON G.W., FOORD E.E., LAURS B.M., SHIGLEY J.E. & SMITH C.P. (2000) - Ruby and sapphire from Jegdalek, Afghanistan. *Gems & Gemology*, 36, pp. 110-126.
- BROWNIOW A.H. & KOMOROWSKI J.C. (1988) - Geology and origin of the Yogo sapphire deposit, Montana. *Economic Geology*, 83, pp. 875-880.
- CARBONEL J. & ROBIN C. (1972) - Les zircons gemmes dans les roches ignées basiques, le gisement d'Espaly (Haute Loire, France). Implications génétiques. *Revue de Géographie Physique et Géologie Dynamique*, 11, pp. 159-170.
- CARBONEL J., DUPLAIX S. & SELO M. (1973) - Géochronologie par traces de fission des zircons et par K-Ar des andésites basaltiques d'Espaly (Haute Loire). Position du Villafranchien régional et évolution magmatique du Sud-Est du Massif Central français. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 40, pp. 215-224.
- CARTWRIGHT I. & BARNICOAT A.C. (1986) - The generation of quartz-normative melts and corundum-bearing restites by crustal anatexis: petrogenetic modelling based on an example from the Lewisian of North-West Scotland. *Journal of Metamorphic Geology*, 3, pp. 79-99.
- CESBRON F., LEBRUN P., LE CLEAC'H J.M., NOTARI F., GROBON C. & DEVILLE J. (2002) - Corindons et spinelles. *Minéraux et fossiles, hors-série* 15, 101p.
- CLABAUGH S.E. (1952) - Corundum deposits of Montana. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 983, 100p.
- COATES J.S. (1935) - The geology of Ceylon. *Ceylon Journal of Science, Sect. B*, 19, pp. 101-187.
- COENRAADS R.R., SUTHERLAND F.J. & KINNY P.D. (1990) - The origin of sapphires: U-Pb dating of zircon inclusions sheds new light. *Mineralogical Magazine*, 54, pp. 113-122.
- COENRAADS R.R., VICHIT P. & SUTHERLAND F.J. (1995) - An unusual sapphire-zircon-magnetite xenolith from the Chamaburi gem province, Thailand. *Mineralogical Magazine*, 59, pp. 465-479.
- COLLINS A.S. & WINDLEY B.F. (2002) - The tectonic evolution of central and northern Madagascar and its place in the final assembly of Gondwana. *Journal of Geology*, 110, pp. 325-349.
- COOMARASWAMY A. (1903) - Occurrence of corundum in situ near Kandy. *Ceylon Geological Magazine*, X, pp. 348-350.
- COORAY P. & KUMARAPPELLI P. (1960) - Corundum in biotite-sillimanite gneiss from near Polgahawela. *Ceylon Geological Magazine*, 97, pp. 480-487.
- CONQUERE F. & GIROD M. (1968) - Contribution à l'étude des paragenèses précoces des basaltes alcalins: les spinelles du volcan de l'Oued Temorte (Massif de l'Atakor, Sahara Algérien). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 20, pp.1-29.
- DAHANAYAKE K. (1980) - Mode of occurrence and provenance of gemstones of Sri Lanka. *Mineralium Deposita*, 15, pp. 51-56.
- Dahanayake K. & Ramasinghe A.P. (1981) - Source rocks of gem minerals. A case study from Sri Lanka. *Mineralium Deposita*, 16, pp. 103-111.
- DAHY J.P. (1988) - The geology and igneous rocks of the Yogo sapphire deposit and the surrounding area, Little Belt Mountains, Judith Basin County Montana. *Montana College of Mineral Science and Technology, Butte, Montana, M.S. thesis*.
- DAO N.Q., HUY N.Q., QUANG V.X. & SILVESTRE J.P. (1996) - Diamond, lonsdaleite, fullerenes and graphite inclusions in rubies, Georaman-96, Nantes, France, 10-12 Juin 1996. *Terra Abstracts, vol.8, suppl.2, pp.18-19, Blackwell Scientific Publications, Oxford International*.
- DELRE N. (1994) - Gem Trade Lab Notes: Sapphires from Yogo Gulch, Montana. *Gems & Gemology*, 30, p. 120.
- DIRLAMI D.M., MISIOROWSKI E.B., TOZER R., STARK K.B. & BASSETT A.M. (1992) - Gem wealth of Tanzania. *Gems & Gemology*, 28, pp. 80-102.
- DISSANAYAKE C.B. & CHANDRAJITH R. (1999) - Sri Lanka-Madagascar Gondwana linkage: evidence for a Pan-African mineralized belt. *Journal of Geology*, 197, pp. 233-235.
- DISSANAYAKE C.B. & WEERASOORIYA S.V.R. (1986) - Fluorine as an indicator of mineralization - hydrogeochemistry of a Precambrian mineralized belt in Sri Lanka. *Chemical Geology*, 56, pp. 257-270.
- DUNN P. & FRONDEL C. (1990) - An uncommon margarite/corundum assemblage from Sterling Hill, New Jersey. *Mineralogical Record* 21, pp. 425-427.
- EPSTEIN D.S., BRENNAN W. & MENDES J.C. (1994) - The India sapphire deposits of Minas Gerais, Brasil. *Gems & Gemology*, 30, pp. 24-32.
- FORESTIER F. (1993) - Histoire de l'un des gisements de gemmes les plus anciennement connus d'Europe occidentale: saphirs, grenats et hyacinthes du Puy en Velay (43). *Cahiers de la Haute Loire*.
- FORESTIER F. & LASNIER B. (1969) - Découverte de niveaux d'amphibolites à pargasite, anorthite, corindon et saphirine dans les schistes cristallins du Haut-Allier. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 23, pp. 194-235.
- FRAZIER S. & FRAZIER A. (1990) - South of the Equator - The importance of gem mineral deposits in Southern Africa is saluted by this year's Intergem show. *Lapidary Journal*, pp. 36-38.
- FURUH W. (1988) - The sapphires of Penghai, Hainan Island, China. *Gems & Gemology*, 24, pp. 155-160.
- FYFE W.S., PRICE N.J. & THOMPSON A.B. (1978) - Fluids in the Earth crust. *Elsevier Amsterdam*, 383p.
- GARNIER V. (2003) - Les gisements de rubis associés aux marbres de l'Asie Centrale et du Sud-est: genèse et caractérisation isotopique. *Thèse de Doctorat INPL*, 385p.
- GARNIER V., GIULIANI G., MALUSKI H., OHNENSTETTER D., PHAN TRONG T., HOANG QUANG V., PHAM VAN L., VU VAN T. & SCHWARZ D. (2002) - Ar-Ar ages in phlogopites from marble-hosted ruby deposits in northern Vietnam: evidence for Cenozoic ruby formation. *Chemical Geology*, 188, pp. 31-49.
- GARNIER V., GIULIANI G. & OHNENSTETTER D. (2001) - South-East Asian marble-hosted ruby deposits. *EUG XI, Strasbourg 8-12 Avril 2001, Terra Abstracts*, pp. 99.
- GARNIER V., OHNENSTETTER D., GIULIANI G. & SCHWARZ D. (2002) - Rubis trapèches de Mong Hsu, Myanmar. *Revue de Gemmologie Association Française de Gemmologie*, 144, pp. 5-12.
- GAUTHIER G., GROAT L.A., TAYLOR R.P. & FALLICK A.E. (1995) - Mineralogical, lithochemical and stable isotope characteristics of the sapphire-bearing Yogo dyke, Montana. *Annual Meeting of the Geological Association of Canada and the Mineralogical Association of Canada, Victoria, British Columbia, Canada, 17-19 Mai 1995, Abstracts*.
- GOUJOU J.C. (2002) - Les saphirs des plages vendéennes: un gisement à localisation variable. *Le règne minéral*, 46, pp. 19-27.
- GRAPES R. & PALMER K. (1996) - (Ruby-sapphire)-chromian mica-tourmaline rocks from Westland, New Zealand. *Journal of Petrology*, 37, pp. 293-315.
- GREW E.S., DRUGOVA G.M. & LESKOVA N.V. (1989) - Highomite from the Aldan shield, Eastern Siberia, USSR. *Mineralogical Magazine*, 53, pp. 376-379.

- GUBELIN E.J. & KOIVUJÄ J.J. (1986) - Photoatlas of Inclusions in gemstones. *ABC Edition, Zurich*, pp. 345-347.
- GUBELIN E.J. & PERETTI A. (1997) - Sapphires from the Andranondambo mine in SE Madagascar: evidence for metasomatic skarn formation. *Journal of Gemmology*, 25, pp. 453-516.
- GUO J., O'REILLY S.Y. & GRIFFIN W.L. (1996a) - Corundum from basaltic terrains: a mineral inclusion approach to the enigma. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 122, 368-386.
- GUO J., O'REILLY S.Y. & GRIFFIN W.L. (1996b) - Zircon inclusions in corundum megacrysts: I. Trace element geochemistry and clues to the origin of corundum megacrysts in alkali basalts. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 60, pp. 2347-2363.
- GUO J., WANG F. & YAKOUMÉLOS G. (1992) - Sapphires from Changle in Shandong Province, China. *Gems & Gemology*, 28, pp. 255-260.
- GUBELIN E.J. (1982) - Gemstones of Pakistan: emerald, ruby and spinel. *Gems & Gemology*, 28, pp. 123-139.
- HAAPALA I., SIIVOLA J., OJANPERA P. & YLETTYUNEN V. (1971) - Red corundum, sapphirine and kornepupine from Kittilä, Finnish Lapland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 43, pp. 221-231.
- HADLEY J. (1949) - Preliminary report on corundum deposits in the Buck Creek Peridotite Clay Count, North Carolina. U.S. Geological Survey Bulletin, B0948-E, pp. 103-128.
- HANNI H.A. & SCHMETZNER K. (1991) - New rubies from the Morogoro Area, Tanzania. *Gems & Gemology*, 27, pp. 156-167.
- HARDING R.R. & SCARRATT K. (1986) - A description of ruby from Nepal. *Journal of Gemmology*, 20, pp. 3-10.
- HELMANN G. & HENN U. (1986) - On the origin of blue sapphire from Elabera, Sri Lanka. *Australian Mineralogist*, 16, pp. 2-4.
- HERD R., WINDLEY B.F. & GHISLER M. (1969) - The mode of occurrence and petrogenesis of the sapphirine-bearing and associated rocks in West Greenland. *Gronlands Geologiske Undersogelse*, 24.
- HOANG N. & FLOWER M. (1998) - Petrogenesis of Cenozoic basalts from Vietnam: implication for origins of a 'diffuse igneous province'. *Journal of Petrology*, 39, pp. 369-395.
- HOCHLEITNER R. (1998) - Europa: Korunde zum Sammeln. In: Weise Ch. Ed., Rubin, Saphir, Korund: schön, hart, selten, kostbar. *Extralapis*, 15, pp. 76-85.
- HUGHES R.W. (1990) - Corundum. *Butterworths Gem Books, London*, 314 p.
- HUGHES R.W. (1997) - Ruby and sapphire. *RWH publishing, Boulder*, 511 p.
- HUNSTIGER C. (1990) - Darstellung und Vergleich primärer Rubinvorkommen in metamorphen Muttergesteinen - Petrographic and Phasenpetrologie - Teil III. *Zeitschrift der Deutsche Gemmologische Gesellschaft*, 39, pp. 121-145.
- IRVING A. (1986) - Polybaric magma mixing in alkali basalts and kimberlites: evidence from corundum, zircon and ilmenite megacrysts. *Abstracts of the Geological Society of Australia*, 16, pp. 262-264.
- IRVING A.J. & PRICE R.C. (1981) - Geochemistry and evolution of ilmenite-bearing phonolitic lavas from Nigeria, Australia, East Germany and New Zealand. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 45, pp. 1309-1320.
- IYER L.A.N. (1953) - The geology of gem-stones of the Mogok Stone Tract, Burma. Geological map of the Mogok Stone Tract. Mem. Geol. Survey India, 82. *Government of India Press, Calcutta*, 99 p.
- JACKSON B. (1984) - Sapphire from Loch Roag, Isle of Lewis, Scotland. *Journal of Gemmology*, 19, pp. 336-342.
- JANARDHANAN A. & LEAKE B.E. (1974) - Sapphirine in the Sittampundi complex, India. *Mineralogical Magazine*, 39, pp. 901-902.
- JOBBINS E.A. & BERRANGE J.P. (1981) - The Pailin ruby and sapphire gemfield, Cambodia. *Journal of Gemmology*, 27, pp. 555-567.
- KAMMERLING R.C., SCARRATT K., BOSSHART G., JOBBINS E.A., KANE R.E., GUBELIN E.J. & LEVINSON A.A. (1994) - Myanmar and its gems - an update. *Journal of Gemmology*, 24, pp. 3-40.
- KANE R.E., MCCLURE S.F., KAMMERLING R.C., KHOA N.D., MORA C., REPETTO S., KHAI N.D. & KOIVUJÄ J.J. (1991) - Rubies and fancy sapphires from Vietnam. *Gems & Gemology*, 27, pp. 136-155.
- KANE R.E. & KAMMERLING R.C. (1992) - Status of ruby and sapphire mining in the Mogok Stone Tract. *Gems & Gemology*, 28, pp. 152-174.
- KATZ M.B. (1972) - On the origin of the Ratnapura-type gem deposits of Ceylon. *Economic Geology*, 67, pp. 113-115.
- KELLER P. (1992) - Gemstones of East Africa. *Phoenix, Geoscience Press*, 144 p.
- KELLER A.S. & KELLER P.C. (1986) - The sapphires of Mingai, Fujian Province, China. *Gems & Gemology*, 22, pp. 41-45.
- KELLER P., KOIVUJÄ J. & JARA G. (1985) - Sapphire from the Mercedes-Rio Mayo area, Cauca, Colombia. *Gems & Gemology*, 21, pp. 20-25.
- KERRICH R., FYFE W.S., BARNETT R.L., BLAIR B.B. & WILLMORE L.M. (1987) - Corundum, Cr-muscovite rocks at O'Briens, Zimbabwe: the conjunction of hydrothermal desilicification and LIL-element enrichment - geochemical and isotopic evidence. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95, pp. 481-498.
- KIEFERT L. & SCHMETZNER K. (1987) - Blue and yellow sapphire from Kaduna Province, Nigeria. *Journal of Gemmology*, 20(6), pp. 369-370.
- KISSIN A.J. (1994) - Ruby and sapphire from the Southern Ural Mountains, Russia. *Gems & Gemology*, 30, pp. 243-252.
- KRZEMNICKI M., HANNI H.A., GUGGENHEIM R. & MATHYS D. (1996) - Investigations on sapphires from an alkali basalt, South West Rwanda. *Journal of Gemmology*, 25, pp. 90-106.
- LACOMBE P. (1970) - Le massif basaltique quaternaire à zircon-gemmes de Ratnakiri (Cambodge Nord-oriental), 3ème partie. *Bulletin du BRGM*, 4, pp. 33-79.
- LACROIX A. (1890) - Contribution à l'étude des roches métamorphiques et éruptives de l'Ariège. *Bulletin du Service de la Carte Géologique de la France*, III(1), pp. 1-49.
- LACROIX A. (1922) - Minéralogie de Madagascar, tome I. A. *Challamel (Ed.), Paris*, 624 p.
- LASNIER B. (1977) - Persistance d'une série granulitique au cœur du Massif Central français (Haut Allier) - *Les termes basiques, ultrabasites et carbonatés*. Thèse, Université de Nantes, 351 p.
- LA TOUCHÉ T. (1890) - Sapphire mines of Kashmir. *Rec. Geol. Survey India*, XXIII, pp. 59-69.
- LAWSON A.C. (1903) - Plumasite, an oligoclase corundum rock, near Spanish Peak, California. *University of California Publications in Geological Sciences*, 3, pp. 219-229.
- LETTERMANN M. & SCHUBNEL H.J. (1970) - Un nouveau gisement de saphir. *Bulletin de l'A.F.G.*, 24, pp. 8-9.
- LEVINSON A.A. & COOK F.A. (1994) - Gem corundum in alkali basalt: origin and occurrence. *Gems & Gemology*, 30, pp. 253-262.
- LIMKATRUN P., KHIN ZAW, RYAN C.G., MERNAGH T.P. (2001) - Formation of the Denchai gem sapphires, northern Thailand: evidence from mineral chemistry and fluid/melt inclusion characteristics. *Mineralogical Magazine*, 65, pp. 725-735.
- LYDEKKER L. (1883) - Geology of Kashmir and Chamba. *Memoirs of the Geological Survey of India*, 22, pp. 335-336.
- MAJIK R.H. (1994) - Geology and resource potential of Kashmir ruby deposits, Distt. Muzaffarabad(ak) Pakistan. *Azad-Kashmir Mineral and Industrial Development Corporation*, 21 p.
- MAJIKOVA P. (1999) - Origin of the alluvial sapphires from the Jizerska Louka alluvial deposit in North Bohemia, Czech Republic. *Europe. Australian Gemmologist*, 20, pp. 202-206.
- MAILETT F.R. (1882) - On sapphires recently discovered in the northwest Himalaya. *Records of the Geological Survey*, 15, pp. 138-141.
- MARCHAND J., BOUILLER R., CORNEN G. & BURG J.P. (1989) - Carte géologique de la France (1/50000), feuille Langœuc (790). *BRGM*.
- MCCOLL D. & WARREN R.G. (1980) - First discovery of ruby in Australia. *Mineralogical Record*, 11-12, pp. 371-375.
- MERCIER A., DÉBAT P. & SAUL J.M. (1999) - Exotic origin of the ruby deposits of the Mangari area in SE Kenya. *Ore Geological Review*, 14, pp. 83-104.
- MERCIER A., RAKOTONDRAZAFY M. & RAVOLOMIANDRINARIVO B. (1999) - Ruby mineralization in Southwest Madagascar. *Gondwana Research*, 2, pp. 233-438.
- MERLE O., MICHON L., CAMUS G. & DE GOËR A. (1998) - L'extension oligocène sur la transversale septentrionale du rift du Massif Central. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 169, pp. 615-626.
- MEYER H.O.A. & MITCHELL R.H. (1988) - Sapphire-bearing ultramafic lamprophyre from Yogo, Montana: a omphacite. *Canadian Mineralogist*, 26, pp. 81-88.
- MOINE B., RAMAMBAZAFY A., RAKOTONDRAZAFY M., RAVOLOMIANDRINARIVO B., CUNNEY M. & DE PARSEVAL P. (1998) - The role of fluor-rich fluids in the formation of the thorianite and sapphire deposits from SE Madagascar? *Mineralogical Magazine*, 62A, pp. 999-1000.
- MORISHITA T. & KODERA T. (1998) - Finding of corundum-bearing gabbro boulder possibly derived from the Horoman peridotite complex, Hokkaido, northern Japan. *Journal of Mineralogy Petrology and Economic Geology*, 93, 52-63.
- MUHLMEISTER S., FRITSCH E., SHIGLEY J.E., DEVOUARD B. & LAURS B.M. (1998) - Separating natural and synthetic rubies on the basis of trace-element chemistry. *Gems & Gemology*, 34, pp. 80-101.
- MUNASINGHE T. & DISSANAYAKE C.B. (1981) - The origin of gemstones of Sri Lanka. *Economic Geology*, 76, pp. 1216-1225.
- MYCHALUK K.A. (1995) - The Yogo sapphire deposit. *Gems & Gemology*, 31, pp. 28-41.
- NICOLLET C. (1986) - Sapphirine et staurolite riche en magnésium et chrome dans les amphibolites et anorthosites à corindon du Volihory Sud, Madagascar. *Bull. Minéral.*, 109, pp. 599-612.

- OAKES G., BARRON L.M. & LISHMUND S.R. (1996) - Alkali basalts and associated volcanoclastic rocks as a source of sapphirine in Eastern Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43, pp. 289-298.
- OKRUSCH M., BUNCH T.E. & BANK H. (1976) - Paragenesis and petrogenesis of a corundum-bearing marble at Hunza (Kashmir). *Mineralium Deposita*, 11, pp. 278-297.
- O'REILLY S.V. & ZHANG M. (1995) - Geochemical characteristics of lava-field basalts from eastern Australia and inferred sources: connections with the subcontinental lithospheric mantle? *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 121, pp. 148-170.
- OZEROV K. (1935) - Form of corundum crystals as dependent upon chemical composition of medium. *Dokladi Akademii Nauk SSSR*, XLVII, pp. 49-52.
- PAMIC J., SCAVNICAR S. & MEDJIMOREC S. (1973) - Mineral assemblages of amphibolites associated with alpine-type ultramafics in the Dinaride ophiolite zone (Yugoslavia). *Journal of Petrology*, 14, pp. 133-157.
- PAQUETTE J.L., NEDELEC A., MOINE B. & RAKOTONDRAZAFY M. (1994) - U-Pb single zircon Pb-evaporation and Sm-Nd isotopic study of a granulite domain in SE Madagascar. *Journal of Geology*, 102, pp. 523-538.
- PERETTI A., MULLIS J. & KUNDIG R. (1990) - Die Kaschmir-Saphire und ihr geologisches Erinnerungsvermögen. *Forschung und Technik, Neue Zürcher Zeitung*, 187, p. 59.
- PERETTI A., SCHMETZNER K., BERNHARDT H.J. & MOUAWAD F. (1995) - Rubies from Mong Hsu. *Gems & Gemology*, 31, pp. 2-26.
- PHAN TRONG T. & HOANG QUANG V. (1997) - So Dô Kiên Tao Vunh Luc Yên. Carte géologique de Luc Yen. échelle: 1:200000. *Institute of Geological Sciences, Hanoi*.
- POIROT J.P. (1997) - Rubis et saphirs du Viêt-Nam. *Revue de Gemmologie AFG*, 131, pp. 3-5.
- POMIAN-SRZEDNICKI L.P. (1997) - Caractérisation des corindons par des mesures du rapport isotopique de l'oxygène $^{16}O/^{18}O$. *Mémoire de diplôme de l'Institut de Minéralogie et Pétrologie de l'Université de Lausanne*, 88p.
- RAKOTONDRAZAFY M.A.F., MOINE B. & CUNNEY M. (1996) - Mode of formation of hibonite ($Ca_{24}Mg_{12}O_{19}$) within the U-Th skarns from the granulites of SE Madagascar. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 121, pp. 190-201.
- RANSON W.A. (2000) - Margarite-corundum phyllites from the Appalachian orogen of South Carolina: Mineralogy and metamorphic history. *American Mineralogist*, 85, pp. 1617-1624.
- RAVOLOMIANDRINARIVO B., RAKOTONDRAZAFY M. & MOINE B. (1997) - Pétrographie des roches à saphir de la région d'Andranondambo, S-E de Madagascar. *Proceedings of the UNESCO-IGCP 348/168 International Symposium and Field Workshop on Proterozoic Geology of Madagascar*, 2p.
- ROBB L.J. & ROBB V.M. (1986) - Archaean pegmatite deposits in the North-Eastern Transvaal. *Mineral Deposits of South Africa*, pp. 437-449.
- ROSE R.L. (1957) - Andalusite- and corundum-bearing pegmatites in Yosemite National Park, California. *American Mineralogist*, 42, pp. 635-647.
- ROSSOVSKIY L.N., KOVALENKO S.I. & ANANJEV S.A. (1982) - Conditions of ruby formation in marbles. *Geologiya Rubinykh Mesozoideni*, 24, pp. 57-66 (en Russe).
- REPASINGHE M.S. & DISSANAYAKE C.B. (1985) - Charnockites and the genesis of gem minerals. *Chemical Geology*, 53, pp. 1-16.
- SAMINPANYA S. (2000) - Mineralogy and origin of gem corundum associated with basalt in Thailand. *Mémoire de thèse, Université de Manchester, UK*, 303p.
- SCHREYER W., WERDING G. & ABRAHAM K. (1981) - Corundum-fuchsite rocks in greenstone belts of Southern Africa: Petrology, Geochemistry and possible origin. *Journal of Petrology*, 22, pp. 191-231.
- SCHREYER W. (1988) - A discussion of "Corundum, Cr-muscovite rocks at O'Briens, Zimbabwe: the conjunction of hydrothermal desilicification and LILE-element enrichment - geochemical and isotopic evidence". *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 100, pp. 552-554.
- SCHWARZ D. (1998) - Aus Basalten, Marmorren und Pegmatiten. Spezielle Ursachen formten in der Erdkruste edle Rubine und Saphire. In: *Weine Ch. Ed., Rubin, Saphir, Korund: schön, hart, selten, kostbar. Extra-Lapis*, 15, pp. 5-9.
- SCHWARZ D., KANIS J. & SCHMETZNER K. (2000) - Sapphires from Antsirana Province, Northern Madagascar. *Gems & Gemology*, 36, pp. 216-233.
- SCHWARZ D., PETSCH E.J. & KANIS J. (1996) - Sapphires from the Andranondambo Region, Madagascar. *Gems & Gemology*, 32, pp. 80-99.
- SEIFERT A.V. & HYRSL J. (1999) - Sapphire and garnet from Kalaluni, Tanga Province, Tanzania. *Gems & Gemology*, 35, pp. 108-120.
- SERVICE GEOLOGIQUE DE MADAGASCAR, TANANARIVE (1977) - *Carte minière de Madagascar*, 1/2500000, troisième édition.
- SILVA K.K.M.W. & SIRIWARDENA C.L.E.R. (1988) - Geology and the origin of the corundum-bearing skarn at Bakanuma, Sri Lanka. *Mineralium Deposita*, 23, pp. 186-190.
- SIMONET C. (1997) - La géologie des gisements de saphirs. *Revue de Gemmologie AFG*, 132, pp. 21-23.
- SIMONET C. (2000) - Géologie des gisements de saphir et de rubis. L'exemple de la John Sant mine, Mangare, Kenya. *Mémoire de thèse de l'Université de Nantes, Faculté des Sciences et des Techniques*, 349p.
- SMITH C.P. (1998) - Rubies and pink sapphires from the Pamir Mountain Range in Tajikistan, former USSR. *Journal of Gemmology*, 26, pp. 103-109.
- SMITH C.P., GUBELIN E.J., BASSETT A.M. & MANANDHAR M.N. (1997) - Rubies and fancy-color sapphires from Nepal. *Gems & Gemology*, 33, pp. 24-41.
- SMITH C.P., KÄMMERLING R.C., KELLER A.S., PERETTI A., SCARRATT K.V., KHOA N.D. & REPETTO S. (1995) - Sapphires from Southern Vietnam. *Gems & Gemology*, 31, pp. 168-186.
- SOLSEBURY F. (1967) - Gem corundum pegmatites in NE Tanganyika. *Economic Geology*, 62, pp. 983-991.
- SPIRIDONOV E.M. (1998) - Gemstone deposits of the former Soviet Union. *Journal of Gemmology*, 26(2), pp. 11-124.
- SUTHERLAND F.L. (1996) - Alkaline rocks and gemstones, Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43, 323-343.
- SUTHERLAND F.L. & COENRAADS R.R. (1996) - An unusual ruby-sapphire-saphirine-spinel assemblage from the Tertiary Barrington volcanic province, New South Wales, Australia. *Mineralogical Magazine*, 60, pp. 623-638.
- SUTHERLAND F.L., COENRAADS R.R., SCHWARZ D., RAYNOR L.R., BARRON B.J. & WEBB G.B. (2003) - Al-rich diopside in alluvial ruby and corundum-bearing xenoliths, Australian and SE Asian basalt field. *Mineralogical Magazine*, 67, pp. 717-732.
- SUTHERLAND F.L., HOSKIN P.W.O., FANNING C.M. & COENRAADS R.R. (1998a) - Models of corundum origin from alkali basaltic terrains: a reappraisal. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 133, pp. 356-372.
- SUTHERLAND F.L., SCHWARZ D., JOBBINS E.A., COENRAADS R.R. & WEBB G. (1998b) - Distinctive gem corundum suites from discrete basalt fields: a comparative study of Barrington, Australia, and West Pailin, Cambodia, gemfields. *Journal of Gemmology*, 26, pp. 65-85.
- SUTHERLAND F.L. & SCHWARZ D. (2001) - Origin of gem corundums from basaltic fields. *Australian Gemmologist*, 21, pp. 30-33.
- SUTTHIRAT C., SAMINPANYA S., DROOP G.T.R., HENDERSON C.M.B., MANNING D.A.C. (2001) - Clinopyroxene-corundum assemblages from alkali-basalt and alluvium, eastern Thailand: constraints on the origin of Thai rubies. *Mineralogical Magazine*, 65, pp. 277-295.
- TAPPONNIER P., PELTZER G., LE DAIN A.Y., ARMJO R. & COBOLD P. (1982) - Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine. *Geology* 7, pp. 611-616.
- TAPPONNIER P., PELTZER G. & ARMJO R. (1986) - On the mechanics of the collision between India and Asia. In: Coward M.P. & Ries A.C. (Eds.) *Collision Tectonics*. Geological Society, London. *Special Publication*, 19, pp. 115-157.
- TENTHOREY E.A., RYAN J.G. & SNOW E.A. (1996) - Petrogenesis of sapphirine-bearing metacretolites from the Buck Creek ultramafic body, southern Appalachians. *Journal of Metamorphic Geology*, 14, pp. 103-114.
- TEREKHOV E.N., KRUGLOV V.A. & LEVITSKII V.I. (1999) - Rare earth elements in corundum-bearing metasomatic and related rocks of the Eastern Pamirs. *Geochemistry International*, 37, pp. 202-212.
- THEMELIS T. (1992) - The heat treatment of ruby and sapphire. *Gemlab Inc.*, 256p.
- UPTON B.G.J., ASPEN P. & CHAPMAN N. (1983) - The upper mantle and deep crust beneath the British Isles: evidence from inclusions in volcanic rocks. *Journal of the Geological Society of London*, 140, pp. 105-121.
- UPTON B.G.J., HINTON R.W., ASPEN P., FINCH A.A., VALLEY J.W. (1999) - Megacrysts and associated xenoliths: evidence for migration of geochemically enriched melts in the upper mantle beneath Scotland. *Journal of Petrology*, 40, pp. 945-986.
- VICHT P., YUDHICHATIVANICH S. & HANSAWEK R. (1978) - The distribution and some characteristics of corundum-bearing basalts in Thailand. *Journal of Geological Society of Thailand*, pp. M4-1 - M4-27.
- WEISE CH. (1998) - Rubin, Saphir, Korund: schön, hart, selten, kostbar. *Extra-Lapis*, 15, 96p.
- WELLS A. (1956) - Corundum from Ceylon. *Geological Magazine*, 93, pp. 25-31.
- WHITFORD-STARK J.J. (1987) - A survey of Cenozoic volcanism on mainland Asia. *Geological Society of America, Special Papers*, 213, 74p.
- WRIGHT J., HASTINGS D., JONES W. & WILLIAMS H. (1985) - Geology and mineral resources of West Africa. *Allen & Unwin (Eds.) London*, 187p.
- YU T.F., KHIN ZAW & LIMKATRUN P. (2003) - Oxygen isotope composition of the Denchai sapphire, Thailand: a clue to its enigmatic origin. *Lithos*, 67, pp. 153-161.

Echos de la minéralogie française

Nota : cette rubrique vous permet de prendre connaissance de l'actualité de la minéralogie française, vous pouvez l'enrichir en nous communiquant vos propres découvertes même par un écrit sommaire (aide à la rédaction : rdaglrn@wanadoo.fr - 04 79 31 89 73).

BELLE DECOUVERTE DE QUARTZ DANS LE MASSIF DES GRANDES ROUSSES

Cette découverte s'est effectuée dans le massif des Grandes Rousses, au fond d'un petit vallon assez encaissé dans lequel doivent manifestement s'accumuler de grandes quantités de neige. Un petit glacier devait occuper ces lieux, ou du moins plus récemment un important névé. Notre découverte est sans doute due à la sécheresse et à la chaleur

estivale de 2003, ce qui nous a permis d'accéder à la base de la paroi.



Chalcopyrite - Cristal : 4,3 cm - Le Ravin d'Enfer, Savoie - Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, N° 203.233 - Photo : E. Costanzo



Quartz biterminé - Cristal : 9,3 x 1,7 x 1,6 cm - Les Grandes Rousses, l'Alpe-d'Huez, Isère - Coll. : B. Hugon - Photo : L.-D. Bayle



Quartz "burin" - Cristal : 18 x 5,8 x 3,9 cm - Les Grandes Rousses, l'Alpe-d'Huez, Isère - Coll. : B. Hugon - Photo : L.-D. Bayle



Cyanophyllite - Groupe : 0,5 mm - Mine Tistoulet, Aude. Coll. : G. Favreau - Photo : H.D. Müller

Nous repérons tout d'abord un filon de quartz qui a l'air d'avoir fait l'objet de grattages. Puissant d'environ 5 centimètres, il commence à quelques mètres de haut et descend plus ou moins régulièrement avec une inclinaison d'environ 20°. Juste avant de rejoindre le sol, il présente une boursofflure et un décalage. A ce niveau, un trou d'une vingtaine de centimètres de diamètre attire notre attention, bien qu'il soit rempli d'alluvions. Nous ne doutons pas une seconde qu'il a été déjà vu et qu'il a été ultérieurement colmaté par les éléments naturels. Un rapide coup de tringle permet pourtant de faire apparaître quelques pointes... C'est alors que nous comprenons que ce four est vierge et qu'il a échappé aux investigations humaines !

Une première pièce aux aiguilles assez petites est extraite au plafond, une seconde semble se situer derrière... Il va nous falloir être patients pour dégager minutieusement toutes les pièces mûres imbriquées les unes dans les autres, scellées par des alluvions indurées. Le fond de la poche a beaucoup souffert des contraintes de la glace occasionnant une casse importante. Quelques petits groupes aux pointes centimétriques parfaitement limpides sont néanmoins extraits....

Près de 2 heures ont été nécessaires ensuite, pour pouvoir enfin sortir la pièce majeure : 27 cm x 20 cm x 28 cm ! Un enchevêtrement d'aiguilles toujours centimétriques, les plus petites pouvant être laiteuses, et au milieu desquelles émerge un très grand cristal présentant un habitus tabulaire car allongé selon l'axe b {01.0}, dit "en burin", de 18 cm de hauteur dont le tiers supérieur est parfaitement limpide, tandis que les deux tiers inférieurs sont envahis de belles nébuleuses constituées de délicates micro-inclusions fluides. Pour couronner le tout, l'ensemble est légèrement enfumé ! Ensuite, derrière un rétrécissement, une nouvelle poche sera accessible après une bonne séance de massette et broche. Cette fois, les éléments extérieurs n'auront pas eu d'influence sur son contenu. La poche plus petite que la précédente ne présente qu'un remplissage de sable chloriteux. L'extraction des pièces sera beaucoup plus difficile car aucune n'est mûre. Au retour, c'est presque avec plaisir que nous nous ferons scier les épaules et défoncer le dos par des sacs trop lourds ! Comme quoi, il n'y a pas que dans le Mont-Blanc que l'on peut faire de telles découvertes.

Pour le plaisir et les yeux de tous, ces pièces seront visibles à la bourse de Bourgoin-Jallieu les 6 et 7 mars prochains.



Bruno HUGON et Eric GAUTHIER

APATITE ROSE ET TITANITE "CHOCO"

Le cristallier Valéry Ottone vient de découvrir, courant décembre 2003, un nouveau site assez singulier dans le petit massif de Doucy ou "Montagne de Doucy" (souvent intégré à tort dans la chaîne de La Lauzière) dans la vallée de la Tarentaise, Savoie. L'occurrence ne se trouve pas dans les schistes mylonitiques cette fois-ci, mais dans la couverture sédimentaire extrêmement replissée (Trias supérieur, grès

quartzitiques, calcaires à fumachelles et schistes argileux). Ce sont de petites fentes qui ont livré des placages de quartz à âme, de scalénoèdres de calcite à inclusions grises de schiste. La teinte de ces apatites est particulièrement soutenue.

Le gîte de La Baisse, également en Savoie, connu par certains microminéralogistes avertis pour sa paragenèse à ilménite, titanite, apatite et "allanite-épidote", ainsi que par certains chercheurs de quartz (Cf. *le Règne Minéral* n°44, pp. 32-33), vient de livrer à ce même cristallier, d'extraordinaires titanites d'une couleur "brun chocolat" tout à fait étonnantes. Les cristaux, très brillants, se disposaient en grand nombre sur des fragments de roche "flotants" dans les filons travaillés. L'habitue est parfois très allongé et les groupes dépassent aisément les 2 centimètres. Certains individus dépassent même le centimètre. Ils apparaissent sur des plaques de quartz, décollées des épontes au cours de la formation des fentes. L'origine de Ti semble être l'ilménite qui présente de sérieuses figures d'attaque. Cette titanite se localise d'ailleurs dans les zones à croissances parallèles entre le quartz et les épontes. La Baisse est donc un site savoyard de référence pour cette espèce (un terrain également très instable !). La forme et la couleur diffèrent beaucoup de celles trouvées dans le secteur du Grand Pic ou du sud du massif. Une publication sur ce gîte est en cours d'écriture (com. pers. X. Rivoallan).

Communication : Valéry OTTONE

SCORODITE BRETONNE

Depuis quelques années déjà, on voit circuler dans les échanges de microminéraux, de belles cristallisations bleu gris de scorodite en provenance de Saint-Thonan, dans le Finistère. Les cristaux, parfois plurimillimétriques, remplissent les cavités d'un quartz filonien carrié.

RDAG

CYANOPHYLLITE BLEUE ET AUTRES ESPECES RARES DU TISTOULET

Le district de Padern-Montgaillard, Aude, est bien connu des microminéralogistes pour ses espèces minérales rares, très bien cristallisées et colorées. La poursuite des recherches à la mine Tistoulet a été concentrée ces dernières années sur le niveau 470 réputé pour ses belles cyanotrichites. De nouvelles découvertes viennent d'être réalisées et publiées (Favreau et al., 2003). En plus de nouveaux habitus de camérolaïte et de l'arrivée officielle de la wulfénite, il faut ajouter aujourd'hui la rare cyanophyllite $\text{Cu}_2\text{Al}_2(\text{Sb}^{3+}\text{O}_4)(\text{OH}) \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (orth.), un autre minéral d'altération contenant de l'antimoine et du cuivre, rejoignant ainsi la camérolaïte et la theisite, identifiées précédemment. Rappelons que ce groupe de minéraux est restreint et comprend aussi la eualstibite, mammothite, partzite, richelsdorffite et sabellite. Identifiée grâce à une analyse chimique et les rayons-X (N. Meisser, Lausanne), elle se présente en cristaux à éclat nacré et au contour typiquement lancéolé, regroupés en rosettes et sphères jusqu'à 2 mm.

Communication : Georges FAVREAU

UNE CHALCOPYRITE POUR LE MNHNP

Le Muséum National d'Histoire Naturelle à Paris vient d'acquérir un remarquable et grand sphénoèdre de chalcopryrite sur quartz, trouvé dans les fentes alpines des schistes liasiques du Ravin d'Enfer, vallée des Belleville, Tarentaise, Savoie (cf. *le Règne Minéral* n°30, pp.18-28). Ce sphénoèdre est légèrement recouvert de malachite et se dégage d'une gangue de quartz très fissurée, très caractéristique de ce secteur. Ce site devient donc une référence intéressante pour la taille des cristaux français.

Communication : Pierre-Jacques CHIAPPERO (MNHNP, Galerie de Minéralogie)

EURO MINERAL

SAINTE-MARIE AUX MINES

FRANCE

ALSACE

41^{ème} EXPOSITION - BOURSE INTERNATIONALE

Minéraux - Gemmes - Fossiles



26 et 27 JUIN 2004

24 et 25 JUIN - Journées Professionnelles



www.euromineral.net

GEOPOLIS

EURO MINERAL 32 rue de Baldersheim - F 68110 ILLZACH • Tel. 03 89 50 51 51 - Fax. 03 89 51 19 90
RÉSERVATION HÔTELIÈRE : OFFICE DE TOURISME Tel. 03 89 58 80 50 - Fax. 03 89 58 67 92