

L'opale d'Éthiopie : gemmologie ordinaire et caractéristiques exceptionnelles

Jean-Pierre Gauthier*, Francesco Mazzero**, Yannick Mandaba*** et Emmanuel Fritsch***

Introduction

Dans un article paru dans *Lapidary Journal*, P. Downing (1996) retrace les circonstances de la découverte récente de l'opale d'Éthiopie, apparue sur le marché des gemmes en 1993 et donne, ainsi que Johnson *et al.* dans *Gems & Gemology* (1996), quelques éléments sur sa localisation, sur sa géologie et sur l'état de la prospection en 1995. Ces derniers auteurs ajoutent diverses précisions sur les propriétés optiques et gemmologiques de cette opale. L'un d'entre nous (F. M.), dans le numéro 148 de la *Revue de Gemmologie A.F.G.*, relate une visite sur les gisements du Shewa. Il apporte ici son expérience de plusieurs années de prospection sur le terrain, ses connaissances d'une longue pratique de nombreux lots d'échantillons et de magnifiques photographies d'opales d'Éthiopie (Fig. 1), parmi les plus caractéristiques.

Les gisements se situent à environ 250 km d'Addis-Ababa, dans la Province du Shewa. L'opale se trouve dans une couche de tuf d'environ 3 m d'épaisseur entre des couches de rhyolite. La séquence complète de roches volcaniques date du Miocène (8 à 27 millions d'années) et son épaisseur est de l'ordre de 300 à 400 m. Les échantillons se présentent très généralement (mais pas exclusivement) sous forme de nodules rhyolitiques souvent sphériques, cimentés dans un tuf de cendre volcanique. Leur diamètre varie de 1 cm à près de 20 cm, avec une taille moyenne de l'ordre de 5 cm. Ils renferment pratiquement tous de l'opale, mais seulement une très faible proportion contient de l'opale noble. Le remplissage est total ou partiel. Il est certain qu'il y a eu, dans de nombreux cas, plusieurs apports de fluides, parfois marqués par des zonations (fig. 2).

Densité, indice de réfraction, impuretés

Si les caractéristiques gemmologiques premières que sont la densité et l'indice de



Fig. 1 : Quelques remarquables opales taillées d'Éthiopie (Collection Eyaopal).

réfraction ont été données dès les premières descriptions de ces opales, il est nécessaire d'en préciser la validité. En effet, la porosité est très variable selon les différents types rencontrés, et la mesure de ces deux propriétés physiques qui s'effectue généralement en milieu liquide (l'eau pour la densité ; une liqueur d'indice pour la réfraction) va en être plus ou moins affectée.

Des mesures de densité ont été réalisées par Yannick Mandaba (2003). Sur un lot de 15 échantillons, il relève des densités allant de 1,39 à 2,06. Pour bien montrer la forte porosité de certaines opales, il reprend l'expérience après une heure d'immersion dans l'eau : les valeurs de densité ne s'échelonnent plus que de 1,93 à 2,07. Johnson *et al.* (1996) annonçaient quant à eux, sur 19 échantillons étudiés, une plage de variation de 1,35 à 2,03, ramenée entre 1,85 et 2,03 après immersion. Des valeurs de densités encore plus étonnantes ont été calculées à partir de 4 échantillons de forme simple particulièrement poreux, comprises entre 0,67 et 0,81 ! (rapporté dans les *Gem News* de *Gems & Gemology*, 1997). On note que certaines pierres incorporent jusqu'à 25% de

leur masse en eau. Dans des cas extrêmes, l'immersion peut provoquer un éclatement de la pierre, signe de l'importance des tensions qui peuvent exister, à la réhydratation comme à la dessiccation d'ailleurs.

Les mesures d'indices données par Johnson *et al.* (1996) partent d'une valeur inférieure plus faible que celle de 1,44 environ annoncée généralement pour toutes les opales volcaniques étudiées jusqu'à présent et vont de 1,40 à 1,46. Cela ne doit pas surprendre, en raison de la corrélation avec la densité.



Fig. 2 : Nodule fracturé, non totalement rempli, montrant la surface libre grise, à la partie supérieure. On note la présence d'opale noble dans la partie inférieure, surmontée de couches d'opale commune différenciées par leurs teintes dont la séquence présente un décrochement dû à des contraintes mécaniques.

* Laboratoire Dynamique de la Lithosphère, Université Lyon I

** Opalinda-Gemoa, 242 Bd Voltaire, 75011 Paris

*** Institut des Matériaux Jean Rouxel (IMN), Laboratoire de Physique Cristalline, Université de Nantes

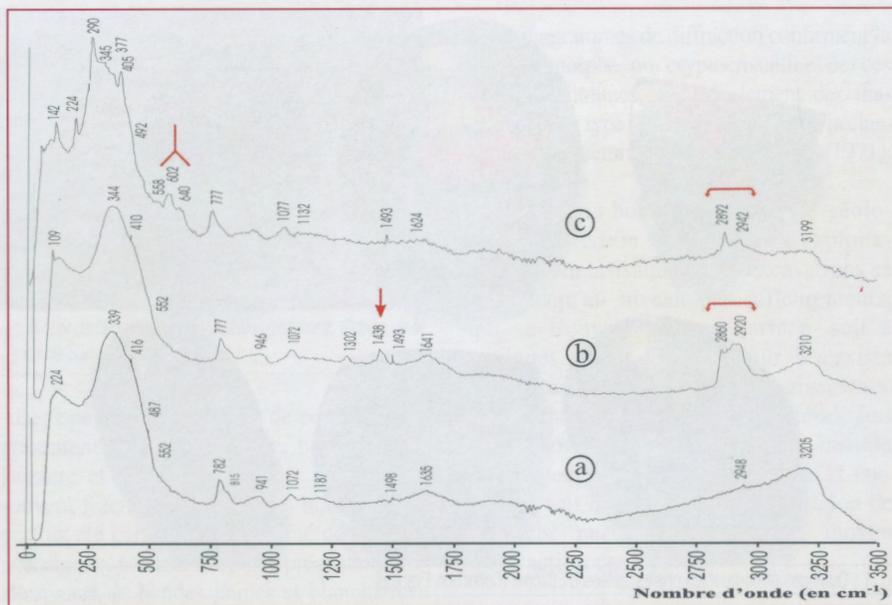


Fig. 3 : Spectres Raman d'opales d'Ethiopie : a) standard ; b) déstabilisation du massif de l'eau (flèches) ; c) pics dus aux composants donnant la couleur brune (fourche).

Quant aux impuretés diffuses, autres que les inclusions qu'on ne peut présenter comme significatives qu'après avoir étudié un nombre d'échantillons et de variétés suffisant (ce que nous n'avons pas réalisé ici), elles sont essentiellement représentées par le potassium, le calcium, le titane et le fer, ainsi que, en remplacement du silicium, l'aluminium. Un certain nombre d'autres éléments traces ont été signalés par Johnson *et al.* (1996) : strontium, rubidium, zirconium, niobium... Strontium, niobium et plomb ont été retrouvés par Mandaba (2003). On ne connaît pas d'autres opales contenant ces éléments en trace et leur présence pose un réel problème géochimique. Mais elle peut être utile au gemmologue pour identifier la provenance de ces opales.

Spectroscopie Raman, luminescence

La spectroscopie Raman amène une méthode non destructive de classification des opales gemmes. Les spectres des opales d'Ethiopie sont tous caractéristiques des opales C à C-T, c'est-à-dire des opales formées de cristobalite mal cristallisée (C), avec plus ou moins d'empilements tridymi-

tiques (T). Cette caractéristique se reconnaît à la position du maximum de la bande principale, située entre 325 et 340 cm^{-1} (Ostrooumov *et al.*, 1999). Une opale A, amorphe, comme l'opale d'Australie, aurait au contraire un pic nettement plus éloigné, vers 400 cm^{-1} .

Le pic de l'eau vers 3200 cm^{-1} est très prononcé (fig. 3a). Des mesures thermogravimétriques révèlent des teneurs en eau s'élevant jusqu'à 20%, ce qui est la limite supérieure documentée pour les opales. Le massif de l'eau se transforme lorsque l'opale se déstabilise pour devenir blanche et poreuse. Cette transformation se manifeste par la diminution de la bande de l'eau à 3200 cm^{-1} et l'apparition d'une bande large à deux maxima à 2860 et 2920 cm^{-1} , corrélée avec un pic plus faible à environ 1438 cm^{-1} (fig. 3b). Ceci a d'abord été observé sur les opales mexicaines très récemment (Aguilar *et al.*, 2002). Enfin, deux bandes assez faibles vers 602 et 640 cm^{-1} ont une intensité proportionnelle à l'absorption donnant la couleur brune (fig. 3c).

Les opales de couleur foncée, notamment les opales chocolat, sont inertes au rayonne-

ment ultraviolet. Ceci est attendu, car elles sont colorées par le fer sous forme Fe^{3+} (Fritsch *et al.*, 1999), poison de luminescence bien connu. Pour les plus claires on observe une luminescence jaune à verte parfois intense, plus prononcée aux ultraviolets courts que longs. Celle-ci est caractéristique de la combinaison de l'émission



Fig. 4 : Magnifique opale déployant une palette de teintes vives.

intrinsèque de l'opale, due à des défauts sur la surface interne de celle-ci, avec la luminescence d'impuretés d'uranium sous la forme d'uranyl en coordination phosphatée (Fritsch *et al.*, 2001).

Variétés

Ces opales se déclinent en un grand nombre de variétés : opale blanche, opale hydrophane, opale "cristal", opale contraluz, opale cacholong, opales nobles (fig. 4), opale allant de l'incolore à l'opale de feu classique, du jaune clair à l'orange rouge et jusqu'à une teinte brun foncé que l'on ne trouve qu'en Ethiopie et qui a été baptisée opale chocolat avec sa teinte très caractéristique. Les couleurs de diffraction sont très vives : verts, bleus, jaunes et rouges intenses, indices d'un arrangement très régulier des sphères de silice. La taille des "grains", c'est-à-dire des domaines ayant une orientation donnée, est en moyenne beaucoup plus importante que dans les autres gisements connus. La forme de ces domaines est aussi inhabituelle :

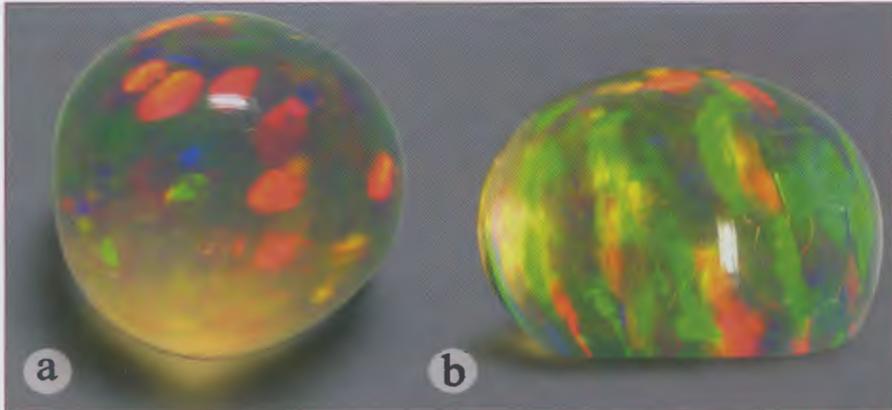


Fig. 5 : Photographie d'une opale "cristal" composée de domaines parallèles tubulaires : a) dans l'axe du tube ; b) de profil. Le diamètre de la pierre est d'environ 25 mm.

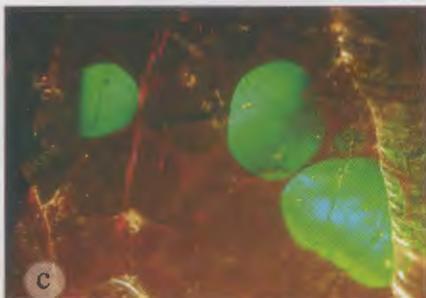
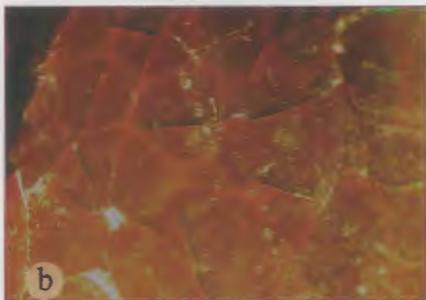
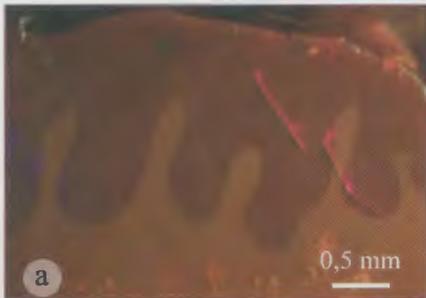


Fig. 6 : a) Zone "digitée" dans une opale chocolat ; b) autre section, présentant des domaines cellulaires ; c) teinte spectrale renvoyée par ces domaines.

- La fig. 5 présente une superbe opale "cristal" composée de domaines tubulaires à sections polygonales traversant l'ensemble de la pierre. Cela rappelle étrangement la structuration de certaines opales Gilson et l'axe directionnel vertical privilégié rend compte probablement, comme pour les opales synthétiques, de tensions exercées sur le gel au contact des parois du nodule qui le contient lors du stade terminal de la déshydratation. Ceci est un phénomène que l'on connaît bien en laboratoire dans l'étude des gels de silice, mais qui prend un sens tout particulier avec les arrangements de sphères de silice, donnant une compartimentation en domaines pseudocristallins allongés, générateurs des couleurs de diffraction observées. Celles-ci sont douces avec une lumière du jour diffuse, et très vives sous la lumière solaire ou sous un éclairage intense.

- Une autre figure caractéristique et énigmatique est fréquemment observée dans les opales d'Ethiopie, et particulièrement dans l'opale chocolat. En regardant sous une incidence quelconque un nodule sectionné, on constate souvent la présence d'une figure en forme de digites ou dendrites curvilignes ou encore de domaines plus ou moins circulaires ou ovalisés (qui pourraient d'ailleurs être une coupe de digites orientés différemment). Ces formes digitées (fig. 6a) et ces domaines circulaires (fig. 6b) apparaissent de couleur brun chocolat, baignant dans un environnement brun caramel un peu plus



Fig. 7 : Flamboiement des couleurs dans un nodule. La variation des couleurs est supposée provenir d'une variation progressive des diamètres de sphères de silice. Photo Cossard 2003.



Fig. 8 : L'observation sur une face polie d'une opale chocolat en bordure de la croûte rhyolitique montre la couleur habituelle des composés ferriques dans l'opale de feu.



Fig. 9 : Réalisation d'une opale "matrix" formée à partir d'un nodule envahi dans la masse par des excroissances (collection Eyaopal).

clair. Ces zones semblent être plus transparentes et par conséquent apparaissent plus foncées si on les observe par réflexion. Si l'on tourne progressivement la pierre, ces mêmes zones, très finement délimitées,

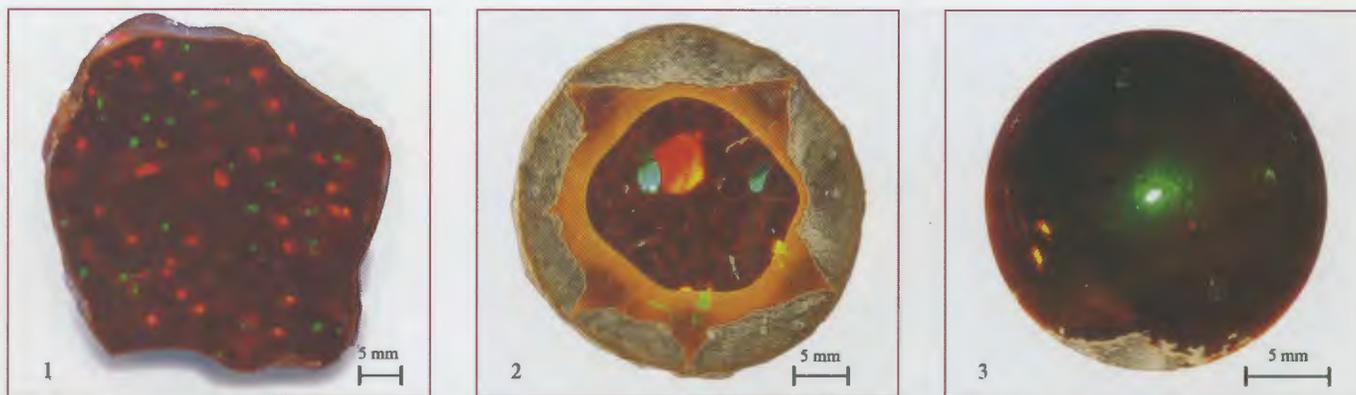
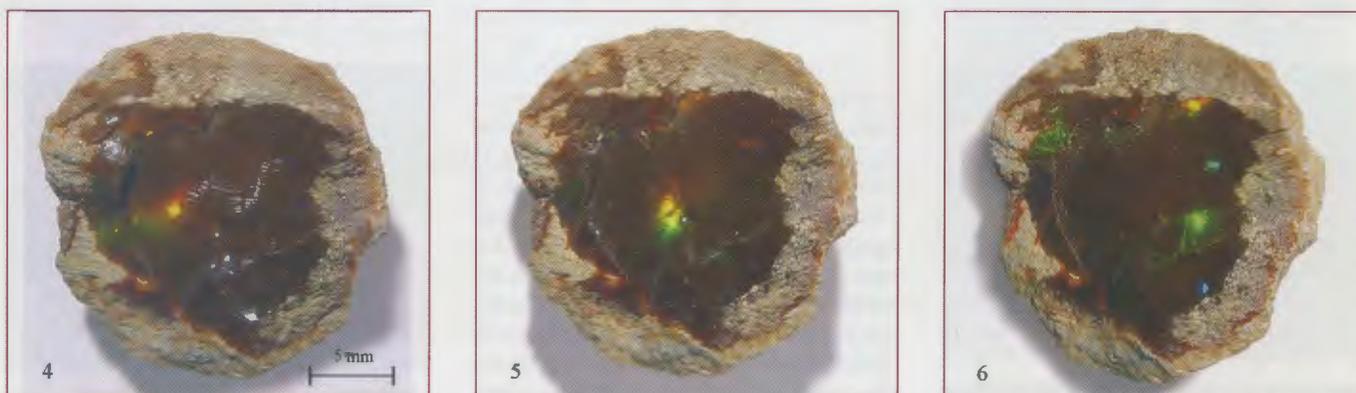


Fig. 10 : 1 à 3) : Domaines en forme de tubes parallèles : les sciages sont perpendiculaires aux tubes dont les sections vont en croissant de 1 à 3 ; pour 3, il y a en fait un seul tube de 20 mm de diamètre ! La masse entière d'opale du nodule a une orientation unique de son réseau de sphères de silice.



4 à 6) : Autre nodule brut d'opale monodomaine : l'orientation changeant par rapport à la direction de la source lumineuse montre que l'image virtuelle de celle-ci apparaît à différents endroits dans la pierre. Les changements de couleur de 4 à 6 sont dus au fait que l'angle d'incidence de la lumière par rapport à la surface de la pierre varie.



7 à 9) : Ce nodule poli plan est éclairé de trois façons différentes :

7 - Par une lampe halogène : on observe la réflexion des facettes de l'ampoule par la surface plane polie de la pierre et, bien différenciée, la réflexion de ces facettes par la structure diffractive de l'opale (effet de miroir convexe).

8 - Par un tube néon : on observe l'image du tube. On note que cette opale fait office d'analyseur de spectre : les raies verte et jaune sont visibles séparément car il y a probablement une variation continue du diamètre des sphérules dans ce domaine de l'opale. Un réseau de sphérules d'un diamètre donné diffracte "sa" longueur d'onde correspondante. Dans cette expérience une variation de l'angle d'incidence de la lumière ne modifie pas les couleurs observées car les raies du néon sont étroites, seul le rendement de diffraction varie.

9 - Par un ciel nuageux avec la main de l'auteur (F.M.) en contre-jour. Dans ce cas, la bande sombre visible en 8 n'apparaît pas car le spectre de la lumière solaire est continu.

donnent des "flashes" de couleurs vives dans des directions très particulières (fig. 6c). C'est l'indice de l'existence, dans ces zones foncées, de réseaux de sphères de silice très bien organisés, générateurs des teintes spectrales observées dans des plages angulaires extrêmement resserrées. Cependant, l'orientation de ces structures digitées par rapport à la gravité n'a pu être documentée de façon satisfaisante et mériterait une étude particulière. Elles donnent en tout cas de merveilleuses compositions (fig. 7).

- La gangue rhyolitique peut être source de variété dans ces nodules. La forme intérieure de la cavité est loin d'être sphéroïdale, elle présente des facettes ou des angles saillants ou rentrants, qui peuvent être mis à profit dans l'esthétisme de la taille (par exemple, pour les pierres placées en en-tête de cet article). Si l'on regarde une opale chocolat près de l'enveloppe de rhyolite, la clarté de celle-ci restitue la couleur d'opale de feu donnée par les composés ferriques (fig. 8) (Fritsch *et al.*, 1999). Sur cette figure se distingue une concrétion rhyolitique en aiguille. De telles excroissances peuvent envahir la cavité du nodule et baigner dans de l'opale interstitielle. La taille réalisée dans de tels nodules peut donner des opales "matrix" (fig. 9).

Propriétés optiques dans les nodules d'opale d'Ethiopie

Les couleurs iridescentes des opales sont dues à la diffraction de la lumière par les sphérules submicroniques de silice rangées dans des domaines (volumes) de dimensions généralement petites. Les opales éthiopiennes se distinguent par des effets optiques facilement discernables. Ceci est dû au fait que les domaines diffractants sont millimétriques et parfois centimétriques (fig. 10,1-3). Un nodule d'opale d'Ethiopie peut même être monodomaine (fig. 10,3-6).

Du filtrage interférentiel résultent la sélection de couleurs « pures » (plages de longueurs d'onde très étroites) et un effet de miroir (réflexion des ondes lumineuses).

Ainsi l'opale avec jeux de couleur se comporte comme un miroir filtrant : plan, convexe ou concave.

Ces propriétés sont celles des optiques diffractives : un parallélépipède d'opale de 10 x 10 x 0,3 mm (une lame plane et fine) peut avoir les propriétés de forte convergence d'un miroir fortement concave de même surface en optique classique. Elle peut former des images bien lisibles de son environnement lumineux ou même diffracter un faisceau laser. Ces images peuvent être perçues à l'intérieur de la matière : image virtuelle qui crée une sensation de profondeur ou de transparence dans une pierre opaque ; elles peuvent dans d'autres cas être perçues comme flottant à l'extérieur de la pierre : image réelle conférant une sensation de mouvement (fig. 10,7-9).

Ces opales d'Ethiopie sont des "cristaux photoniques". Elles ont les propriétés des EOH (Eléments Optiques Holographiques).

Observations en lames minces

La plupart des observations en lames minces ont été réalisées entre polariseurs croisés, méthode qui met particulièrement bien en évidence à la fois la nature organisée de l'opale noble et les accidents perturbant son réseau. Diverses caractéristiques visibles sur les clichés obtenus apporteront des éléments pour essayer de comprendre la formation de ces opales et les événements qui ont pu modifier leur structure initiale.

Présence de grains

La fig. 11 présente une coupe réalisée dans une opale chocolat. Une bande d'opale commune (noire entre polariseurs croisés) sépare deux cellules d'opale noble. On remarque que la cellule principale occupant les deux tiers de l'image est morcelée en de nombreux grains, répartis en trois zones d'orientations différentes : les grains de la partie située en bas et à gauche ont des stries de direction voisine de l'horizontale ;

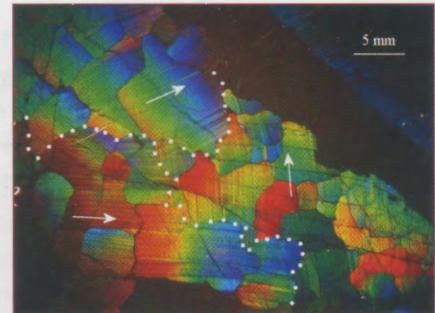


Fig. 11 : Observation d'une cellule d'opale noble dans une variété "chocolat", limitée par une bande d'opale amorphe. Noter le patchwork de la structure en grains et les trois directions de striation de ceux-ci.

au-dessus, au centre droit, les stries sont subverticales ; en haut à gauche, elles sont en diagonale de la figure. Ici, la cellule n'était donc pas monodomaine.

Défauts d'empilement

Chaque grain correspond à un axe d'empilement de plans compacts de sphères de silice. Si cet empilement se fait très régulièrement, comme dans un réseau cristallin cubique compact par exemple, un grain présentera une teinte uniforme s'il a ses faces bien parallèles, ou une teinte variant progressivement avec un polissage en léger biseau (c'est le cas ici). Mais la fine striation que l'on observe dans chaque grain rend compte en fait de nombreux défauts d'empilement des plans successifs. En effet, lorsqu'un plan n'occupe pas sa position idéale dans le réseau supposé parfait, il y a une perturbation du phénomène de diffraction, et un contraste de diffraction apparaît sous forme d'une ligne de couleur différente marquant la trace du défaut plan. Ici, la striation intense prouve que de nombreux plans ne sont plus en situation idéale. Deux raisons peuvent expliquer ces défauts :

- Ils peuvent provenir de défauts d'empilement lors de la sédimentation des sphères de silice, plan par plan. Ce sont alors des défauts naturels de croissance. Un plan compact a deux sites possibles pour se positionner au-dessus du plan immédiatement inférieur. L'une des positions rompt la conti-

nuité par rapport à la structure idéale et entraîne un défaut plan, visible par ce fameux contraste de diffraction.

- Ils peuvent être déplacés *a posteriori*, ce qui a lieu sous une action mécanique (contraintes tangentielles de cisaillement) conduisant à un "micromaclage unidimensionnel" dans tout le grain.

Désorientation progressive des grains

Sur la fig. 12, il existe une direction générale de striation presque verticale, qui permet de dire qu'initialement on avait un domaine unique de sédimentation, plan par plan, qui par la suite a subi les contraintes dont nous avons parlé, dans une phase de déshydratation avancée, et a pris un aspect mosaïque. D'un grain à l'autre, une légère désorientation apparaît. Il peut y avoir alors réfraction des lignes de défauts plans (en pointillé sur fig. 12), par simple rotation du grain, sans changement de la structure d'empilement : pour cela, il faut imaginer une discontinuité, même ténue, par rupture locale dans le joint de grain. Sinon, les tensions peuvent faire glisser les plans les uns sur les autres dans leur rotation, et la figure de striation est alors différente de part et d'autre du joint de grain. Dans ce dernier cas, il faut imaginer que le gel n'est pas totalement solidifié, pour que ces déplacements puissent avoir lieu.

Fissurations

Des lignes diffuses, plus ou moins courbes ou sinueuses, parfois quasi parallèles, traversent de part en part les grains d'opale noble. Ce sont des fissurations mal caractérisées, en ce sens qu'elles n'ouvrent pas la structure en des fentes perceptibles. Au contraire, la cohésion des grains semble être conservée, bien que les contraintes associées à ces fissurations aient pu faire coulisser les deux moitiés des grains traversés (cisaillement indiqué par des flèches sur la fig. 12). Le déplacement est évident sur la

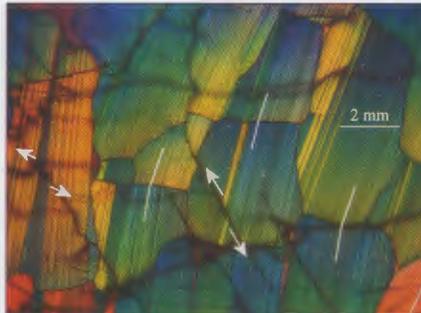


Fig. 12 : Légère "réfraction" des plans d'empilement de part et d'autre du joint de grains, soulignée par les traits en pointillé. Fissurations traversant les grains : observer le cisaillement de ceux-ci dans la direction des flèches.

fig. 13, avec nette rupture de la séquence de défauts, qui se retrouve de part et d'autre de la fissure, décalée de 0,05 mm environ.

Certaines fissures restent intragranulaires. Les tensions dans le grain sont libérées par des réorganisations des plans d'empilement. Le fait que les défauts plans s'arrêtent sur la trace de la fissure prouve qu'elle est bien à l'origine de ceux-ci. Cela n'empêche pas l'existence de défauts plans non altérés traversant la fissure. Ils étaient probablement antérieurs à celle-ci.

Plans courbes

Nous avons clairement montré qu'il existe des tensions dans ces opales et qu'elles peuvent se libérer sans pour autant conduire obligatoirement à une fracture ouverte. Un autre mode d'accommodation des contraintes semble résider dans la capacité des grains à se courber. Cette courbure est dévoilée par l'incurvation des défauts "plans" signalés ci-dessus (fig. 15). Bien entendu, si la courbure devient trop intense, il y aura de nécessaires réorganisations des plans compacts de billes (il faut pouvoir étudier la striation fine des plans "courbes") et intervention des dislocations-vis ou dislocations-coin que nous connaissons dans l'opale comme dans les cristaux réels et qui jouent un rôle important dans le comportement mécanique des matériaux organisés. Le remodelage en grains peut s'ensuivre si

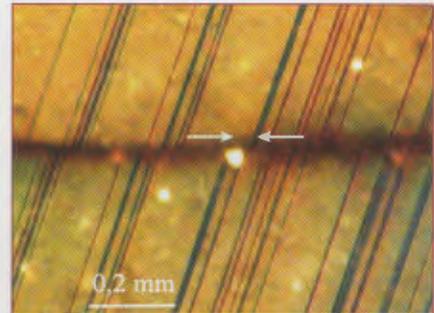


Fig. 13 : La fissure horizontale marque le cisaillement du grain d'opale. Le coulisement des deux parties du grain peut être évalué, grâce à la séquence de défauts plans, identique de part et d'autre de la fissure, à 50 microns environ.

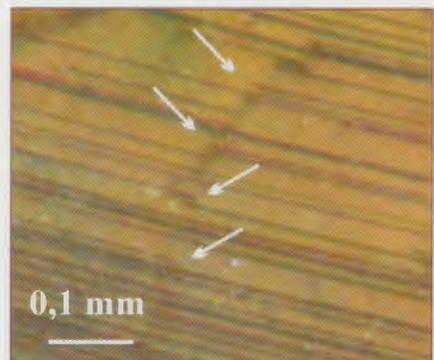


Fig. 14 : Trace de fissuration de faible amplitude, n'ayant pas atteint les bords du grain. La striation du grain marque l'existence de défauts d'empilement soit préexistants (ils traversent la fissure), soit néoformés, lors de la libération des contraintes par fissuration : dans ce cas, ils s'arrêtent sur la fissure (flèches).

les tensions sont trop fortes, comme dans la fig. 12.

Ceci suppose naturellement que les plans puissent jouer les uns par rapport aux autres et l'on est amené, encore une fois, à penser que ces mouvements ont eu lieu alors que la structure n'était pas figée, c'est-à-dire solidifiée. Il vient immédiatement à l'esprit que l'on peut mettre ces actions mécaniques à l'actif des fortes tensions que nous évoquons dans les gels en fin de déshydratation. Cependant, n'oublions pas que tout mouvement mécanique peut créer ces flexions et cisaillements, et que même les contraintes tectoniques peuvent avoir un effet similaire dans ces réseaux de sphères de silice, puisque, n'étant pas solidifiés, ils n'accumulent pas les contraintes jusqu'à une

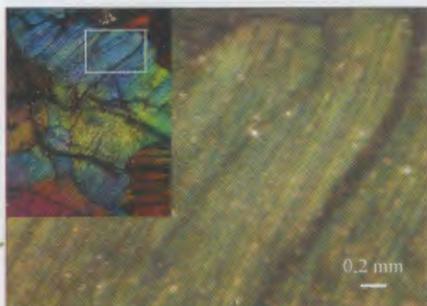


Fig. 15 : opale d'Ethiopie où la flexion des grains est mise en évidence par la courbure des défauts plans.

valeur critique désastreuse, comme c'est le cas pour les matériaux solides. A ce point de vue, ces opales constituent un réel laboratoire d'étude.

Présence d'impuretés diffuses

Le ciel d'or et de sang sur paysage de lave en contre-jour que nous suggère la fig. 16 a été photographié sur une lame mince en lumière polarisée, mais non analysée. Les couleurs de diffraction n'apparaissent donc

plus, mais les zébrures rouge orangé correspondent exactement aux fissurations que l'on voyait traverser les grains d'opale. Visiblement, elles drainent les produits ferriques plus facilement que le reste de la masse siliceuse, puisque ces défauts constituent des chemins privilégiés de diffusion. Bien que présentes en très faibles quantités (on les chiffre en ppm), ces impuretés n'en rendent pas moins compte de l'opacité de l'opale chocolat en masse. Ces produits, déjà signalés dans d'autres opales volcaniques, notamment dans les opales mexicaines, se retrouvent ici probablement en nanoagrégats assez uniformément répartis en dehors du réseau de drainage. On note cependant la présence de formations sphérolithiques atteignant 50 microns de diamètre (en cartouche, sur la fig. 16). De petits cristallites rougeâtres à faciès anguleux sont également visibles en bordure de la carapace de rhyolite.

Observation au Microscope électronique à balayage (MEB)

Très classiquement, les observations au MEB se font soit sur une fracture d'échan-

tillon soit sur une face polie et attaquée chimiquement. Cette technique d'observation nous fait découvrir plusieurs aspects de la constitution de ces opales.

Surface de cassure

La fracturation d'un échantillon peut se faire éventuellement le long de fissurations, si elles préexistent, ou sinon, on peut la provoquer. Elle se développe alors comme dans un verre, elle est de type conchoïdal, présentant des surfaces courbes mal définies, plus ou moins lisses. Cependant, dans l'opale en général et particulièrement dans ces opales d'Ethiopie, apparaissent, sur ces cassures conchoïdales, des lignes assez similaires à des courbes de niveaux. Si l'on augmente le grossissement, une striation plus fine est visible sur la surface de fracture qui semble alors constituée de gradins (fig. 17a). A plus forte échelle, cette fois au microscope électronique à balayage (MEB), cet effet se reproduit à divers grossissements, de sorte que l'on a l'impression d'un "escalier fractal", dont chaque grande marche (fig. 17b) serait formée de degrés plus petits, eux-mêmes subdivisés en échelons très ténus. Les micrographies électroniques nous montrent que l'ultime étape correspond en fait à des crans de hauteur submicronique et que chaque micromarche correspond au rebord d'un plan dense d'empilement de billes de silice, caractéristique de la structure de l'opale (fig. 17c).

Réseau de sphères

Nous avons évoqué la qualité optique extraordinaire de ces opales. Cela nous a conduit à imaginer un réseau de sphères très bien organisé, et sur de grandes distances. La confirmation nous en est donnée par les micrographies électroniques de la fig. 18 effectuées sur une surface polie et légèrement attaquée par l'acide fluorhydrique. Bien que la coupe de l'échantillon n'ait pu être choisie parallèlement à un plan dense, l'on constate une grande régularité

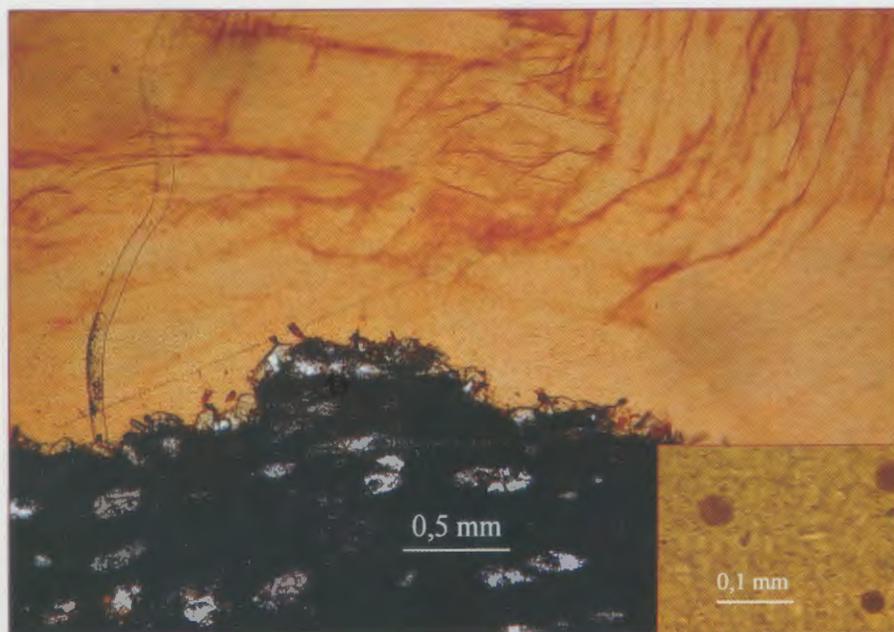


Fig. 16 : Lame d'opale au voisinage de l'enveloppe nodulaire. Démonstration de la diffusion d'hydroxyde de fer dans le système de fissuration de la masse siliceuse ; En bas à droite, en agrégat sphérolithique.