

lieu entre de nombreuses bactéries : des bactériophages (des virus qui infectent les bactéries) prélèvent du matériel génétique dans une bactérie et le déposent dans une autre.

Pour se reproduire, les bactériophages s'attachent aux bactéries et leur injectent leur ADN. Ce dernier sert à la fabrication de copies du bactériophage, qui s'échappent de la bactérie contaminée et vont infecter d'autres bactéries. Parfois, quelques nouveaux bactériophages emportent de l'ADN bactérien au lieu de l'ADN viral : ils peuvent alors transférer des plasmides entiers ou des fragments de chromosome dans une autre bactérie (les chromosomes sont trop gros pour tenir en entier dans un bactériophage). Certains bactériophages semblent capables d'infecter diverses espèces, voire des genres différents de bactéries : les gènes bactériens diffuseraient largement.

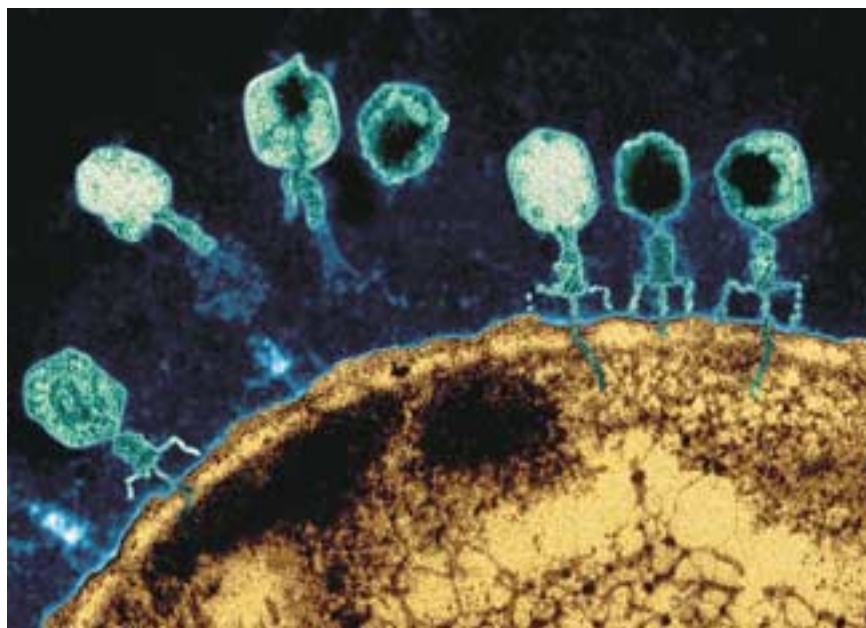
Transfert de gènes par virus

La transduction étant ainsi le phénomène de dispersion génétique le plus risqué, c'est celui que nous avons surtout étudié. Initialement, nous utilisons le dispositif de G. Saylor pour récupérer des bactéries ; aujourd'hui, nous utilisons des sacs en plastique perméables aux gaz.

Nous avons établi que la transduction de matériel génétique entre bactéries, en milieu naturel, s'effectue de la façon suivante : lorsqu'une bactérie portant un nouveau gène pénètre dans son nouvel environnement, elle est infectée par des bactériophages et libère de nouveaux bactériophages. Si quelques particules virales transportent le nouveau gène, ce dernier est transmis à la population bactérienne d'origine. La transduction assure le transfert d'ADN plasmidique comme celui de l'ADN chromosomique.

Nous avons récemment confirmé cette description en eaux douces : nous avons isolé des bactéries et des bactériophages de divers lacs et avons montré que les bactéries échangent de l'information génétique par transduction dans ces environnements.

Il y a quelques années, de nombreux microbiologistes pensaient que la transduction n'était pas un moyen efficace d'échange de gènes dans la nature, car elle impose des interactions entre les virus et les bactéries, qui semblaient être en faible concentration. Or, contrai-



Oliver Meckes, MPI-Tübingen/Photo Researchers, Inc.

4. DES BACTÉRIOPHAGES, des virus qui infectent les bactéries, se sont accrochés à la cellule et y injectent leur ADN. Cet ADN servira à la fabrication de nouveaux bactériophages qui, en quittant la cellule infectée, risquent d'emporter de l'ADN bactérien qu'ils transféreront à d'autres bactéries par un mécanisme de transduction.

rement à ce que l'on croyait, les bactériophages sont très concentrés (souvent 100 milliards de particules par millilitre) dans les eaux douces et marines. À ces concentrations, les interactions des bactériophages et des bactéries sont nombreuses, et la transduction pourrait être fréquente.

Toutefois, la transduction de gènes de bactéries génétiquement modifiées utilisées dans la nature semble limitée pour diverses raisons : d'abord, la plupart des bactériophages n'infectent qu'une seule espèce de bactéries ; ensuite, dans la nature, la plupart des bactériophages n'infectent que des bactéries présentes dans l'habitat du bactériophage (et non les souches de laboratoire utilisées en génie génétique) ; enfin, les biologistes moléculaires devraient bientôt être capables

d'éviter que de l'ADN de bactéries génétiquement modifiées ne soit transféré vers d'autres espèces et n'y survive.

Aujourd'hui, les biologistes savent manipuler le génome de n'importe quel organisme. Le génie génétique sert à la fabrication de bactéries recombinées, mais aussi de céréales génétiquement modifiées qui résistent à diverses maladies. D'après les diverses expériences réalisées sur les bactéries dans leur habitat naturel, les micro-organismes génétiquement modifiés seraient inoffensifs si on les utilisait dans la nature. La seule vraie question semble être : rempliront-ils les tâches que l'on attend d'eux ? La prudence reste évidemment de mise ; l'étude de transfert horizontal de gènes entre bactéries devrait permettre aux spécialistes des biotechnologies utilisées dans la nature de minimiser les risques.

Robert MILLER dirige le département de microbiologie et de génétique moléculaire de l'Université de l'Oklahoma.

Gene Transfer in the Environment, sous la direction de Stuart B. Levy et Robert V. Miller, McGraw-Hill, 1989.

Genetic Interactions among Microorganisms in the Natural Environment, sous la direction de E.M.H. Wellington et J.S. van Elsas, Pergamon Press, 1992.

J.C. FRY et M.J. DAY, *Release of Genetically Engineered and Other Micro-Organisms*, Cambridge University Press, 1992.

Robert V. MILLER et Jeanne S. POIN-DEXTER, *Strategies and Mechanisms for Field Research in Environmental Bioremediation*, American Academy of Microbiology, Washington, D.C., 1994.

Antoine ANDREMONT, Denis CORPET et Patrice COURVALIN, *La résistance des bactéries aux antibiotiques*, in *Pour la Science*, février 1997.

Horizontal Gene Transfer, sous la direction de M. Syvanen et C. Kado, Chapman and Hall, à paraître.

Le traitement des gemmes

EMMANUEL FRITSCH • JIM SHIGLEY • BERNARD LASNIER

Les gemmes subissent des traitements, parfois élaborés, pour en améliorer l'aspect. Grâce aux outils d'analyse, on décèle certaines modifications frauduleuses. C'est la lutte entre l'épée et le bouclier.

Place Vendôme, devant une joaillerie, vous tombez en admiration devant un diamant jaune. Alors que le prix normal d'un tel diamant naturel est proche de 120 000 francs par carat (0,2 gramme), le prix affiché est un quart de cette valeur. Hélas, le diamant jaune qui vous tente n'est qu'un diamant presque incolore qu'un traitement a jauni. Si le vendeur ne vous prévient pas du traitement subi, vous vous sentirez trompé. Pendant longtemps, les vendeurs omettaient de prévenir l'acheteur du traitement, ou bien ils ignoraient même que la pierre avait été traitée, participant ainsi à une véritable tromperie.

Aujourd'hui, les mentalités changent : en 1997, pour les fêtes de fin d'année, la chaîne de supermarchés *Carrefour* a publié un catalogue de bijoux dans lequel figurait la mention «traitée» pour certaines pierres. Ces prises de position redonnent confiance en un secteur économique en déclin. Cependant, l'aide du gemmologue, seul apte à déceler les traitements élaborés, demeure indispensable.

Depuis l'Antiquité, les joailliers améliorent les produits naturels. Le papyrus égyptien *Graecus Holmiensis*, qui date du IV^e siècle de notre ère, donne déjà des recettes pour colorer certaines pierres. Sur les comptoirs des joailleries modernes, bien des surprises vous attendent : diamants et émeraudes aux fractures remplies, saphirs bleus chauffés, rubis bouchés, jades et turquoises imprégnés de polymères (voir la figure 1).

Qu'est ce qui différencie une gemme traitée d'une gemme naturelle ? Une gemme est naturelle si la taille est la seule intervention humaine qu'elle ait subie après extraction. Cette modification est purement géométrique : les propriétés physiques et chi-

miques de la gemme, ainsi que son contenu (ses inclusions, par exemple), sont inchangées. À l'inverse, le traitement modifie l'apparence des gemmes (c'est le but), et par conséquent certaines de ses propriétés.

L'ingéniosité humaine compense, par des manipulations, le déséquilibre entre la forte demande pour des gemmes superbes et leur rareté. Depuis le début des années 1980, ces manipulations se multiplient. Des techniques anciennes, mais peu répandues sont aujourd'hui appliquées aux gemmes les plus importantes du marché. De surcroît, les technologies de pointe (accélérateurs de particules, fours utilisés pour la conception des circuits intégrés) sont utilisées en joaillerie.

Dans tous les domaines de la contrefaçon, le secret des méthodes est jalousement gardé. Les traitements des gemmes n'échappent pas à cette règle. Aussi, pour percer leur nature, les gemmologues se livrent à un travail de détective. Ils ont mis au point de petits instruments adaptés à l'authentification des gemmes naturelles. Microscope binoculaire, réfractomètre ou lampe émettant des rayonnements ultraviolets de longueur d'onde spécifique sont autant d'instruments utilisés quotidiennement par les gemmologues. À l'aide de ces instruments, ils détectent efficacement la majorité des pierres traitées.

Certains traitements, tels la teinture ou le vernissage, sont décelés par un examen attentif de la pierre. D'autres sont plus élaborés, mais ne demandent pas une technique trop lourde. C'est

le cas du chauffage qui, dans sa version classique, nécessite uniquement un four. En Thaïlande, les boutiques des grossistes contiennent presque toutes un tel four. La modification de l'atmosphère du four, en revanche, demande plus de moyens techniques. Enfin, l'irradiation des gemmes nécessite l'accès à un accélérateur de particules ou à un réacteur nucléaire, des appareils onéreux, et reste l'apanage des traitements industriels et des contrefacteurs organisés.

Certaines gemmes ont des propriétés extrêmement proches de celles des pierres naturelles. Les méthodes de détection efficaces sont alors chères et nécessitent une compétence technique qui dépasse celles d'un joaillier. Lorsque la spectrométrie par absorption, la fluorescence X ou la diffusion Raman sont indispensables, les expertises sont du ressort de laboratoires d'analyse. Après avoir détaillé les traitements, des plus courants aux plus élaborés, nous examinerons de quels outils disposent les gemmologues pour déceler les pierres traitées. Enfin, nous verrons comment le consommateur peut se prémunir contre la fraude.

Des pierres bien traitées ?

Les premiers contrefacteurs se sont enrichis parce que leurs contemporains ne se rendaient pas compte de la supercherie. Pour les maintenir dans l'ignorance, les textes anciens relatant ces pratiques sont rares. Les textes modernes ne sont guère plus largement publiés.

1. LES GEMMES BLEUES au sommet de la photographie sont des topazes traitées par une irradiation suivie d'un chauffage. Les cinq pierres du bas sont des diamants colorés traités par irradiation (pierre verte) ou par irradiation suivie de chauffage (diamants jaune, orange et rose). Certaines de ces pierres sont encore radioactives. Le diamant jaune (à droite) mesure cinq millimètres de diamètre.



Les plus vieux traitements connus sont la teinture des pierres (voir la figure 2). Très utilisés entre le XVII^e et le XIX^e siècle, la peinture, le vernissage ou la teinture le sont moins aujourd'hui. Toutes les pierres peuvent recevoir ces traitements, mais ils restent superficiels. En 1983, un diamant rose défraya la chronique, à New York. Présenté dans une vente aux enchères par Sotheby's, son apparence inhabituelle attira l'attention d'un gemmologue expérimenté. Au diamant rose originel avait été substitué un diamant de mêmes dimensions, mais bien moins cher : un diamant presque incolore, recouvert de vernis à ongles rose !

La porosité du matériau retient la teinture. Cette porosité est soit naturelle, soit « améliorée » par chauffage suivi d'une trempée modérée. Parmi les matériaux naturellement poreux teintés, on note le jade, les perles, la turquoise, le lapis-lazuli, mais aussi les variétés opaques du rubis et de l'émeraude.

Pour les opales, on utilise un procédé de teinture plus élaboré, nommé caramélisation. Les opales de la région d'Andamooka, en Australie, présentent des jeux de couleur typiques de l'opale noble, mais ces couleurs se remarquent à peine, car l'opale elle-même est très blanche. Ces plages colorées se voient plus aisément sur un fond noir ou foncé, d'où le coût élevé des opales noires naturelles. Pour foncer les opales, les Australiens les imprègnent d'une solution sucrée,

puis les plongent dans l'acide. Celui-ci brûle le sucre et le transforme en noir de carbone qui reste piégé dans la porosité, donnant une opale noire « caramélisée » stable. Les contrefacteurs utilisent d'autres réactions chimiques pour piéger le colorant dans certaines agates ou certaines perles. La porosité des pierres résulte de microscopiques fractures à leur surface. Lorsque ces fractures sont trop importantes, elles sont apparentes. C'est un défaut répandu dont sont exemptes les rares belles gemmes.

Le remplissage des fractures

Comment estomper ces fractures ? En les remplissant d'un matériau dont l'indice de réfraction est proche de celui de la gemme. Après ce remplissage, la lumière n'est plus renvoyée vers l'observateur et le défaut se remarque à peine. L'ancêtre de ce type de traitement est l'huilage des émeraudes. L'émeraude, matériau fragile, possède souvent des « givres secs » – ou fractures ouvertes – parfois très visibles. En trempant une telle émeraude dans des huiles incolores sélectionnées (l'huile de cèdre a la réputation d'être la mieux adaptée), le liquide reste piégé par capillarité, et on élimine les réflexions blanches ou les interférences qui rendent la pierre peu attrayante. Cependant, le traitement est réversible, et l'on peut facilement enlever l'huile.

En 1987, la découverte sur le marché américain de diamants aux fractures remplies avait fait scandale. Le matériau utilisé pour le remplissage des diamants est un verre d'indice de réfraction élevé conçu pour des fibres optiques ou, en signalisation routière, pour les microlentilles de verre des bandes blanches réfléchissantes. Le résultat est spectaculaire : des diamants invendables prennent, après traitement, l'apparence de marchandises de qualité commerciale (voir la figure 3).

Un autre procédé de remplissage des émeraudes est d'actualité depuis 1995. Contrairement à l'huilage simple des émeraudes, ce traitement introduit des matériaux qui durcissent. Ils remplissent les givres et consolident la gemme. Ce traitement pose un problème d'identification délicat : il s'agit de détecter, dans une fissure très fine, la présence d'un matériau et sa nature.

En 1996, le laboratoire de la Fondation suisse pour la recherche en gemmologie, à Bâle, a identifié dans des émeraudes un certain nombre de produits, essentiellement des résines époxy comme l'« Opticon » ou le « LV15 », initialement mises au point pour masquer et consolider les fêlures des pare-brise de voitures. Bien que délicate, cette expertise des émeraudes est très demandée, car les termes du rapport final font ou défont une vente.

Les traitements évoqués jusqu'ici, même s'ils utilisent des matériaux parfois rares, tels des verres à indice de réfraction élevés, ne nécessitent pas l'emploi d'un appareillage important. D'autres procédés relèvent de techniques plus lourdes. Depuis des siècles, on modifie la couleur des pierres en les chauffant, parfois avec du matériel rudimentaire. Au Brésil, par exemple, on transforme l'améthyste claire en citrine (variété jaune du quartz) dans une brouette posée sur le feu. À Ceylan, certains rubis, chauffés dans les braises attisées avec la « pipe » du lapidaire, perdent leur nuance violacée indésirable. Une meilleure compréhension des phénomènes physiques de la coloration a amélioré les traitements par chauffage.

Sous l'effet de la chaleur, les atomes diffusent, c'est-à-dire qu'ils se déplacent dans la pierre. C'est cette transformation qu'utilisaient sans le savoir les pionniers du chauffage des saphirs



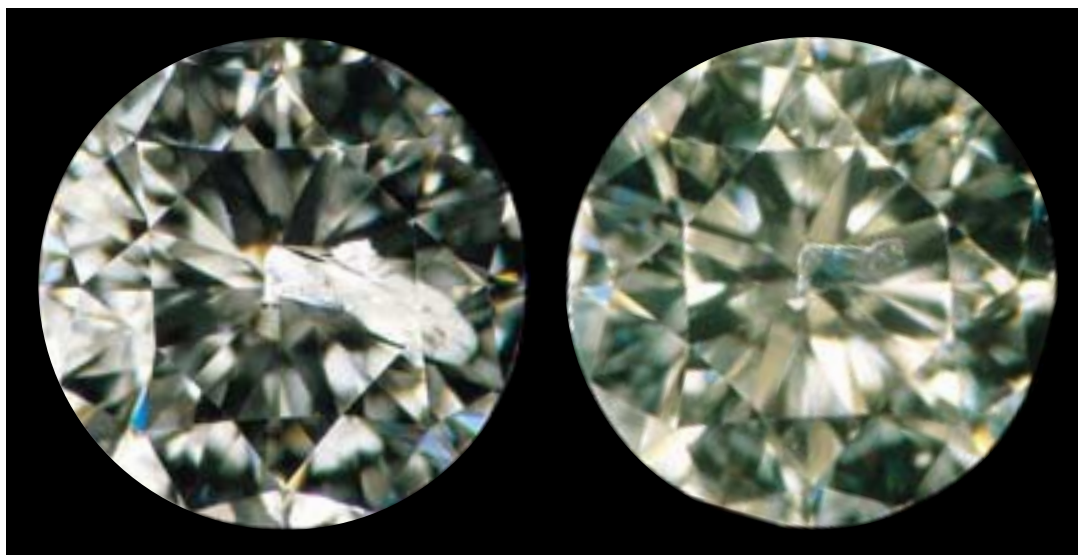
Pascal Entremont

2. CE CABOCHON DE CORINDON de un centimètre de diamètre n'est pas suffisamment rouge pour être facilement commercialisable. À l'aide de la teinture appropriée, l'« huile à rubis » (à droite), très courante sur les gisements de rubis, en particulier en Thaïlande, la pierre aura le rouge idéal pour convaincre le consommateur (la partie supérieure a été teintée).

«geuda» de Ceylan (voir la figure 4). Ces pierres laiteuses sans valeur contiennent de minuscules inclusions de rutile, un oxyde de titane. Au-delà d'un seuil de température, ces inclusions se dissolvent, et le titane diffuse à l'intérieur du cristal. Lorsque le titane rencontre des atomes de fer, omniprésents dans les saphirs naturels, il peut être piégé, ce qui forme un agrégat stable fer-titane, qui absorbe la lumière entre 0,5 et 0,7 micromètre. Le

saphir est alors d'une belle couleur bleue, tout à fait commercialisable (la longueur d'onde du bleu est comprise entre 0,45 et 0,5 micromètre). Toutefois, le chauffage n'est pas toujours bénéfique : ainsi, si l'on chauffe à haute température un saphir trop riche en fer, des cristallites de spinelle noir (un aluminat de magnésium) vont précipiter, donnant une couleur grise translucide sans intérêt.

Enfin, en contrôlant l'atmosphère à l'intérieur du four, on modifie la charge, ou valence, de certains ions, et donc leur absorption. Le contrôle simultané de la température et de la composition de l'atmosphère permet de jouer sur la valence, sur la diffusion et sur la précipitation. On modifie ainsi la couleur de nombreuses pierres (voir l'encadré page 70) non commercialisables pour les transformer en pierres ressemblant à des saphirs bleus, jaunes ou incolores. Cela nécessite des fours qui chauffent à près de 1 800 °C, légèrement sous la température de fusion du saphir. Ces équipements, qui contiennent des dispositifs de circulation gazeuse (hydrogène, monoxyde de carbone, dioxyde de carbone) indispensables pour le contrôle de l'atmosphère, sont difficiles et dangereux à utiliser : à ces températures, l'hydrogène gazeux risque d'exploser au contact de l'oxygène de l'air. Une fuite serait fatale. Cependant des équipements plus lourds encore sont parfois utiles, tels les accélérateurs de particules, pour l'irradiation des gemmes.



3. DANS UN DIAMANT de pureté médiocre en raison d'une fracture inesthétique (à gauche), on remplit cette dernière d'un verre dont l'indice de réfraction est proche de

celui du diamant. Ainsi, sur le diamant traité (à droite), la fracture est moins visible et la pureté apparente est augmentée. Ce diamant a un diamètre de 4,5 millimètres.

Gemological Institute of America - Shane McClure

Les gemmes irradiées sont-elles radioactives ?

Le principe de l'irradiation est bien connu : le rayonnement déplace des électrons ou, plus rarement, des atomes de la pierre. Ce déplacement physique des particules, et leur piégeage ailleurs dans la structure atomique, change la valence de certains ions. Si les ions modifiés absorbent la lumière visible, la couleur varie de façon spectaculaire.

Ainsi, dans les tourmalines, deux sortes d'ions de manganèse coexistent : un atome de manganèse auquel il manque deux électrons (le cation Mn^{2+}) et un atome de manganèse auquel il manque trois électrons (le cation Mn^{3+}). À concentrations égales, l'ion Mn^{2+} colore très faiblement comparé à l'ion Mn^{3+} , qui donne un rose vif ou un rouge. Une irradiation modérée suffit à arracher un électron supplémentaire à l'ion Mn^{2+} , le transformant en ion Mn^{3+} . Une tourmaline rose pâle qui contient beaucoup de manganèse sous la forme d'ion Mn^{2+} devient, après exposition à une radiation ionisante, d'un rose prononcé.

Les traitements par irradiation obéissent à trois impératifs, parfois contradictoires : l'énergie des particules irradiantes doit être suffisante pour changer la couleur, mais pas trop pour ne pas créer d'isotopes radioactifs ; l'irradiation doit être la moins chère possible, donc relativement courte dans le temps (entre quelques minutes et quelques jours). Pour répondre à ces impératifs, on utilise les dispositifs com-

merciaux disponibles, tels les accélérateurs ou les centres d'irradiation gamma de l'industrie agroalimentaire. Si, aujourd'hui, l'irradiation utilise ces appareils lourds, dès la découverte de la radioactivité naturelle, on irradiait déjà en enterrant les gemmes dans des sels radioactifs. Les gemmes produites étaient cependant radioactives, en raison de la diffusion des radio-isotopes sur quelques couches atomiques.

Les nouveaux traitements combinent différentes méthodes. Par exemple, pour rendre des diamants jaune pâle plus foncés, il faut non seulement les irradier, mais aussi les chauffer dans des conditions adéquates (voir la figure 1). L'irradiation crée des défauts, et le chauffage les déplace dans des sites où l'azote, l'impureté la plus abondante du diamant, les piège.

La topaze bleu intense (*Super blue*) est l'objet type de ces traitements combinés. Les pierres, déjà facettées, sont d'abord irradiées dans un réacteur nucléaire avec des neutrons, puis dans un accélérateur linéaire avec des électrons, avant d'être chauffées. On obtient alors des topazes d'un bleu intense, une couleur très recherchée (voir la figure 1).

D'autres combinaisons existent. Le traitement par diffusion, mis au point dans les années 1970, mais alors peu utilisé, a fait un retour en force sur le marché depuis 1990. Non seulement on trouve des saphirs diffusés bleus, mais également des saphirs orange et rouges («rubis diffusés»). Pour ce traitement, on combine l'apport d'un

ou de plusieurs éléments chimiques participant à la coloration, et le chauffage. Des saphirs taillés peu colorés, donc non commercialisables, sont plongés dans un mélange d'oxydes contenant les éléments à introduire : de l'oxyde d'aluminium (qui correspond à la composition chimique du saphir), de l'oxyde de titane et un peu d'oxyde de fer. Le tout est porté dans un creuset à environ 1 800 °C. Le titane et le fer diffusent très lentement vers l'intérieur de la pierre taillée et forment des agrégats fer-titane, responsables de la couleur bleue. Le procédé prend jusqu'à 200 heures pour une pénétration de l'ordre de un dixième de millimètre. La pierre devenue bleue en surface, est repolie et prend l'apparence d'un saphir naturel de belle qualité. La couleur n'en reste pas moins superficielle et disparaît si l'on repolit trop la pierre, ou si on la retaille.

Le résultat d'un traitement combiné récent pose de gros problèmes actuellement en Extrême-Orient, où la gemme reine est le jade, sous forme de jadéite. Souvent, des impuretés diverses (des oxyhydroxydes de fer ou des matériaux argileux) sont piégées aux joints de grains entre cristaux et donnent une composante brune ou

grise à la roche. Pour extraire ces minéraux parasites, des contrefacteurs les dissolvent avec de l'acide chlorhydrique, puis avec des produits plus doux. Le jade est ainsi débarrassé de ces impuretés jusqu'à une profondeur de deux à trois centimètres, mais il reste laid et fragilisé : puisque toutes les plus fines craquelures sont vidées, elles deviennent apparentes et le jade ressemble alors à un morceau de sucre.

Pour y remédier, les instigateurs de la méthode imprègnent les jades blanchis avec des produits d'indice de réfraction proche de celui de la jadéite (1,66), tel le polystyrène. D'une part, puisque ces défauts ne diffusent plus la lumière, les pièces deviennent souvent translucides, alors qu'elles étaient opaques avant traitement. D'autre part, le matériau regagne sa cohérence mécanique et ne se casse plus aussi facilement. Le résultat final est un jade de belle couleur, éminemment commercialisable (voir la figure 6).

Nous avons vu que les traitements changeaient la couleur des pierres parfois de manière spectaculaire, mais la changent-ils pour longtemps ? Certains saphirs incolores irradiés pour les rendre jaunes perdent une bonne partie de leur couleur en quelques heures

d'exposition à la lumière du jour. Parfois, l'effet est moins spectaculaire, mais plus pervers. Par exemple, le verre remplissant les «glaces» de certains diamants traités fond si la pierre est soumise à une température qui n'endommagerait pas le diamant. En confiant une pierre à un bijoutier pour refaire une griffe de la bague, on peut avoir des surprises : la flamme du chalumeau, utilisée pour travailler l'or, fait «suer» le verre hors du diamant et les fractures apparaissent. Cela peut inciter le propriétaire de la bague, ignorant le traitement, à croire que le bijoutier a changé la pierre de la bague, ce qui crée une situation inconfortable pour le bijoutier et pour le client. Comment identifier facilement un traitement ?

Sherlock Holmes chez Ali Baba

Les diamants aux fractures remplies, qui relèvent d'une technique relativement évoluée, sont aisément détectables par l'observation au microscope binoculaire. L'indice de réfraction du matériau de remplissage, ainsi que celui du diamant dépendent de la longueur d'onde. Ces indices ne sont

Les multiples facteurs des couleurs

Au début du XIX^e siècle, Goethe est l'un des premiers à relier la coloration améthyste du quartz à la présence d'impuretés de fer. Si la simple correspondance entre une couleur et un élément donné se vérifie assez bien, une même couleur peut être obtenue à partir de procédés très différents. De surcroît, la couleur n'est pas une propriété intrinsèque de l'objet, mais dépend de la source lumineuse. L'alexandrite, par exemple, est verte à la lumière du jour, et rouge à la lumière d'une bougie.

Dans les gemmes, plusieurs mécanismes responsables de la couleur ont été identifiés, dont l'absorption par des impuretés d'ions, le transfert de charge, la formation des centres de couleurs et les effets optiques. Lorsque, dans une pierre donnée, la couleur est due à la présence d'ions, on reconnaît facilement l'origine de la couleur. En revanche, lorsque la couleur met en jeu un transfert de charge, ou plusieurs atomes, la détermination est plus délicate.

Les impuretés sont des ions de métaux de transitions (titane, vanadium, chrome, manganèse, fer, cobalt, nickel et cuivre) suffisamment éloignés pour qu'il n'y ait aucune interaction. Certains de ces ions absorbent de la lumière, ce qui altère la lumière transmise, et donc la couleur de la gemme. La couleur diffère selon le type d'ion, mais aussi selon sa charge, la nature des atomes voisins et d'autres facteurs, comme la coordination de l'ion (l'arrangement des atomes et des ions). On recense une quinzaine d'ions, qui créent une grande variété de couleurs. La coexistence de plusieurs sortes d'ions modifie l'absorption et la couleur. Ainsi, la même

couleur, comme le vert, se rencontre dans une gemme donnée, comme le jade, pour différentes raisons : l'absorption par des ions de chrome (Cr^{3+}) produit le «vert émeraude», tandis que celle par les ions de fer (Fe^{3+}) donne un vert plus jaune.

D'autres causes de la coloration font intervenir, non des ions isolés, mais des groupements. Par exemple, dans les agrégats fer-titane responsables de la coloration bleue des saphirs, l'absorption est due au transfert d'une charge d'un ion de fer (Fe^{2+}) à un ion de titane (Ti^{4+}). Enfin, les centres colorés sont des défauts de structure du cristal : un atome manquant (lacune) ou un atome additionnel (interstitiel). Lorsque des électrons extraits par irradiation ailleurs dans le cristal s'insèrent dans ces défauts, l'absorption est modifiée.

Une cause plus inhabituelle de la couleur des gemmes met en jeu la structure du cristal entier, ou du moins une région macroscopique du cristal, par sa structure électronique ou par des phénomènes internes tels que les interférences, la diffraction ou la diffusion. Ainsi, l'apparence multicolore de l'opale noble est due à la diffraction de la lumière par un empilement régulier de minuscules billes de silice, incluses dans la gemme.

Des hypothèses contradictoires quant à l'origine de certaines couleurs, ainsi que le faible nombre de publications, montrent que ce domaine de la gemmologie nécessite encore un travail approfondi. Là aussi, grâce aux techniques modernes, les gemmologues progressent.

égaux que pour une longueur d'onde particulière. Quand on éclaire une pierre traitée avec de la lumière blanche, la dispersion de la lumière crée un «flash» caractéristique. Tout aussi révélatrice, l'observation à l'œil nu ou au microscope révèlent de fines lignes blanches formées à l'affleurement des fractures remplies, inexistantes pour des pierres non traitées. Ces lignes blanches seraient dues à la réflexion de la lumière sur le ménisque formé par le matériau de remplissage, à l'affleurement de la fracture (le matériau est introduit à l'état liquide).

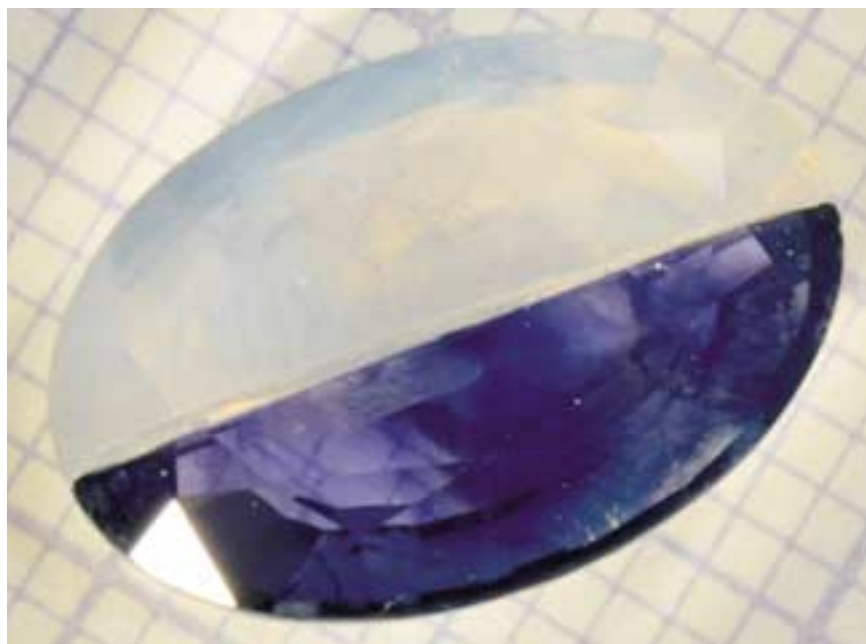
L'observation microscopique suffit aussi pour reconnaître des saphirs «diffusés». Dans ces pierres, la couleur introduite ne pénètre que d'un dixième de millimètre, de sorte que, lorsque l'on repolit la pierre, on enlève souvent toute la couleur au centre d'une facette, alors que, sur les bords, il en reste un peu. Un saphir soupçonné de ce traitement est immergé dans un liquide d'indice de réfraction proche de celui de la pierre. La plupart des réflexions internes sont supprimées. Lorsque la pierre est traitée, on note alors, sous microscope, une répartition de la couleur qui diffère de celle d'une pierre non traitée.

Parfois, ce n'est pas l'observation, mais une mesure qui permet la distinction. Ainsi, certains diamants jaunes irradiés sont aisément reconnaissables à la présence d'une absorption à une longueur d'onde précise – 0,595 micromètre – visible au spectroscope à main. Cette absorption est due à une lacune créée lors de l'irradiation et qui contient de l'azote.

Bien que la plupart des pierres exposées à une irradiation en ressortent non radioactives, certaines contiennent parfois des radio-isotopes. C'est par exemple le cas de quelques topazes bleues traitées et d'un petit nombre de diamants verts ou noirs irradiés. Ce sont des impuretés dispersées dans le réseau cristallin ou concentrées dans des fractures qui se transforment en atomes radioactifs, sous l'effet d'une irradiation trop puissante. Dans la mesure où les équivalents naturels des pierres traitées citées plus haut sont non radioactifs, l'émission de rayonnement bêta (émission d'électrons) ou gamma (émission de photons) identifie les coupables. Nous avons ainsi mesuré une forte radio-

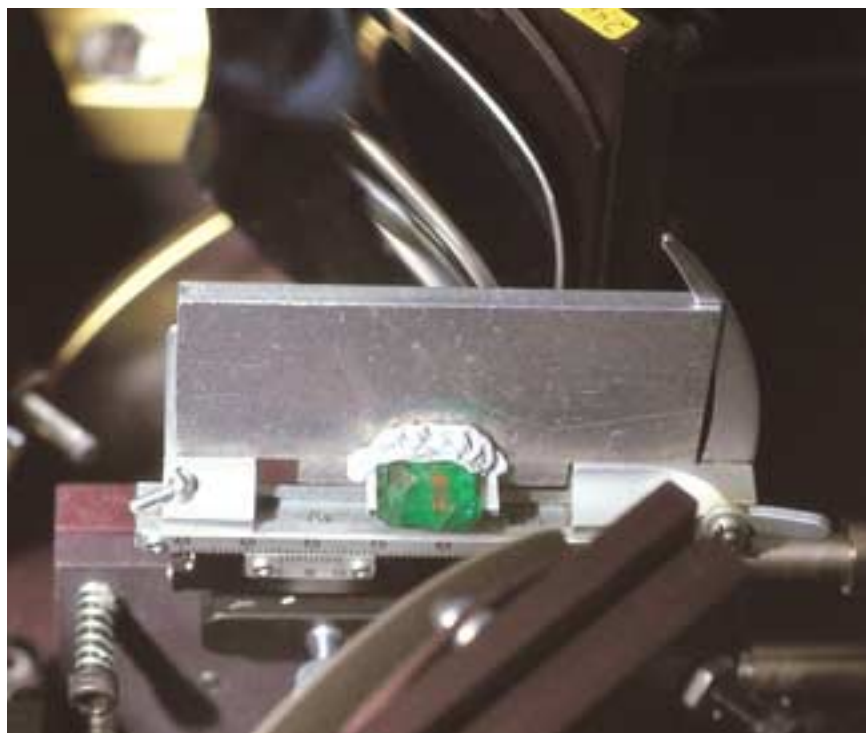
activité alpha (émission de protons) et gamma d'américium dans un diamant vert traité de 12 carats, et une radioactivité de quatre à cinq fois le bruit de fond pour quelques topazes bleues traitées proposées à la vente.

Pour les cas difficiles, la gemmologie dite de laboratoire prend le relais : elle utilise des instruments plus lourds et plus chers que ceux utilisés de manière routinière en gemmologie, par exemple les spectromètres d'absorp-



Pascal Entremont

4. CE SAPHIR GEUDA (12 millimètres de long, 8 millimètres de large) a été coupé en deux. Avant traitement, la pierre est laiteuse et inutilisable en joaillerie. La partie bleue montre la pierre après chauffage : le saphir est transparent et de belle couleur. Les minuscules inclusions de rutile (un oxyde de titane) qui donnaient l'aspect laiteux se sont dissoutes dans la pierre, et le titane libéré a formé avec le fer des agrégats fer-titane, responsables de la couleur bleue.



Alain Cossard, Université de Nantes

5. DANS UN SPECTROMÈTRE INFRAROUGE, on analyse une émeraude. Un rayonnement laser infrarouge est émis en direction de la pierre (il suit le laser rouge dont on aperçoit l'impact sur l'émeraude). Si des polymères ou des résines époxy remplissent les fractures de la pierre, l'absorption du rayonnement infrarouge par ces atomes révélera leur présence.

tion dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge. Peut-être plus important encore, ce type d'analyse requiert une interprétation des données, donc une formation scientifique supérieure à celle des diplômés de gemmologie classique.

La technique la plus utilisée, et celle qui permet de distinguer le jade B du jade naturel, est la spectroscopie par absorption dans l'infrarouge moyen (entre 3 et 30 micromètres). La spectroscopie par absorption est fondée sur la quantité de rayonnement infrarouge absorbée par la pierre. À l'aide de cette absorption, caractéristique des atomes présents, on analyse et on identifie les matériaux intrus, notamment les polymères (voir la figure 5).

Les matériaux organiques et, en particulier, le groupement CH_3 , absorbent beaucoup le rayonnement infrarouge dans un domaine où les gemmes naturelles absorbent peu. La présence de ces groupes est ainsi facilement détectable et constitue une preuve de l'ajout de matériaux étrangers, presque toujours par imprégnation (voir la figure 6). Ces techniques sont tellement utiles que certains marchands ont acquis leur propre spectromètre infrarouge, pour vérifier systématiquement si les pièces de jade qui leur sont soumises sont traitées. Le même type de mesure s'applique aux turquoises et aux opales imprégnées de polymères.

La spectrométrie permet aussi d'identifier deux caractéristiques importantes : d'abord, le « type » de diamant, selon que l'on trouve ou non certaines raies d'absorption de l'azote, l'impureté la plus commune du diamant. D'après

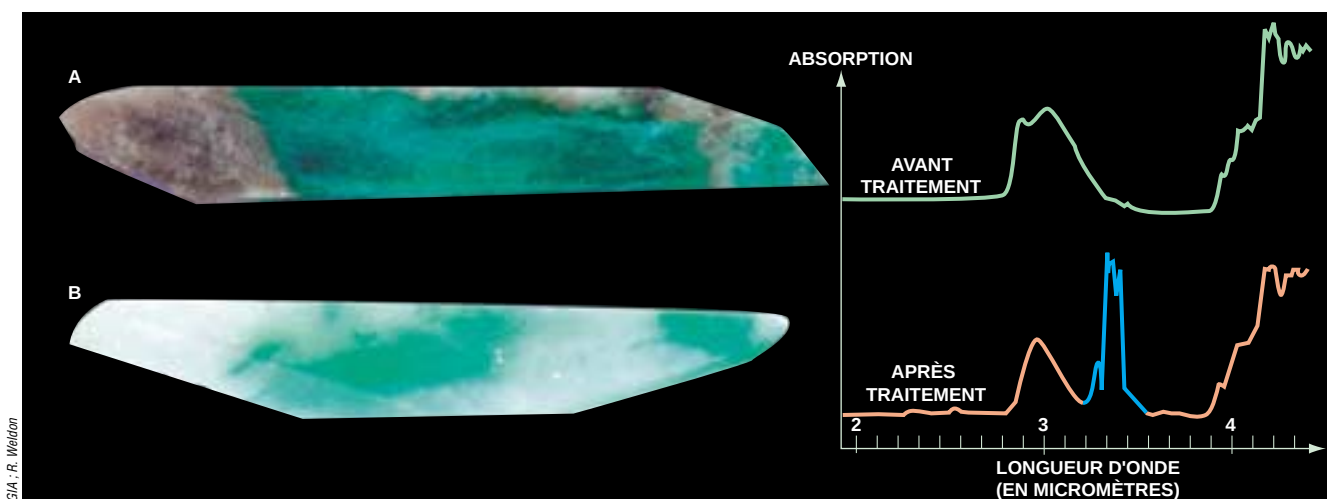
ce type, on sait sous quelle forme se trouve l'azote, ce qui constitue un premier indice dans la détection d'un traitement. La seconde caractéristique est la présence de raies de transition dans l'infrarouge, diagnostic des diamants irradiés, puis chauffés.

La spectrométrie par absorption dans le domaine ultraviolet (entre 0,01 et 0,4 micromètre), dans le visible (entre 0,4 et 0,8 micromètre) et dans le proche infrarouge (entre 0,8 et 3 micromètres) a aussi montré son utilité pour débusquer les gemmes traitées, en particulier certains diamants colorés, très chers, notamment les diamants verts. Quelques critères encore partiels ont été établis pour distinguer les diamants verts naturels des diamants traités par irradiation. Ces critères se fondent sur la présence ou l'absence de quelques bandes d'absorption (notamment à 0,595 micromètre), mais aussi sur la largeur d'une raie à 0,741 micromètre, due à une lacune de carbone créée par irradiation, qui participe à l'absorption d'où résulte la couleur verte. Ces mesures d'absorption sont particulièrement difficiles, car on doit placer la gemme dans de l'azote liquide à $-195,8^\circ\text{C}$: à cette température, les raies sont plus fines et on les distingue mieux (la largeur d'une raie dépend de la température). De surcroît, les diamants sont facettés de telle sorte que la lumière visible est renvoyée vers sa source, et non à travers la gemme. L'obtention d'un spectre nécessite ainsi un placement de la gemme qui fait passer le plus de lumière au travers. Cette technique, bien qu'utile, est délicate à mettre en œuvre.

Récemment, deux autres techniques ont montré leur valeur pour des cas particuliers de gemmes traitées. À l'aide de la technique de diffusion Raman, on détecte le remplissage des fractures des émeraude non seulement avec de l'huile, mais aussi avec une variété de matériaux organiques. Lorsque l'on émet une lumière à une longueur d'onde donnée, cette lumière est diffusée et sa fréquence change de manière caractéristique, selon les molécules diffusantes. Ces mesures révèlent la nature du produit présent dans une fracture, comme les polymères que l'on trouve dans le jade B ou dans d'autres gemmes imprégnées.

La fluorescence X à dispersion d'énergie permet d'identifier un type mal connu, mais fréquent, de traitement de la turquoise, le traitement « Zacharie ». Ce traitement, mal connu, donne une turquoise plus belle, moins poreuse, qui se polit mieux. La fluorescence X consiste à exciter les électrons des couches internes des atomes de la gemme. Lors de leur relaxation, ces atomes produisent des raies caractéristiques dont l'intensité dépend de la concentration. Sans préparation, la fluorescence X indique rapidement la composition chimique qualitative de l'échantillon étudié. Une comparaison systématique des turquoises non traitées et des turquoises traitées « Zacharie » montre que ces dernières contiennent une concentration supérieure en potassium.

Si toutes les techniques de laboratoire citées étaient déjà utilisées en gem-



6. CETTE PIÈCE DE JADE a été sciée. En haut, la pierre brute après son extraction ; en bas, la pierre a été « améliorée » : on l'a blanchie, puis imprégnée d'un polymère à l'indice de réfraction proche de celui du jade (du polystyrène). Pour distinguer ce jade B du jade naturel de

bonne qualité, on utilise la spectroscopie infrarouge. L'absorption de la lumière infrarouge du jade B (en bas) diffère de celle du jade naturel (en haut) : on y observe une absorption supplémentaire due à la présence du polymère vers 3,3 micromètres (partie bleue du spectre).

mologie pour caractériser des gemmes synthétiques (c'est-à-dire créées en laboratoire), il est symptomatique qu'un nombre croissant de ces méthodes élaborées soient nécessaires à l'identification correcte de nouveaux traitements des gemmes.

Malgré les efforts des gemmologues, un petit nombre de traitements demeurent indécélables. C'est le cas lorsque le procédé inventé par l'homme reproduit d'assez près celui de la formation naturelle de la pierre. Ainsi, on ignore pour l'instant comment détecter les tourmalines roses irradiées. Les mécanismes d'irradiation employés commercialement, bien que différents des procédés naturels, en sont suffisamment proches pour qu'aucune différence n'ait encore été identifiée.

Gemmes et droit du consommateur

Comment le consommateur peut-il savoir qu'une pierre est traitée? L'approche naïve consiste à penser que le vendeur lui indiquera l'existence du traitement. Or, le vendeur ignore souvent que la pierre qu'il vend a été traitée : l'information a pu se perdre en route. En 1994, des détaillants ont été surpris d'apprendre, lors d'une réunion avec des grossistes, que des pierres traitées leur avaient été vendues.

En France, tout manquement à signaler qu'une pierre est traitée est sévèrement condamné par la loi de 1968, qui précise que «les termes "diamant", "rubis", "saphir" et "émeraude" employés seuls ou suivis du qualificatif "naturel", "véritable" ou "fin", sont réservés aux diamants, rubis, saphirs et émeraudes formés dans les sites naturels d'où ils ont été extraits et qui n'ont subi d'autres interventions de l'homme que la taille et le polissage». Malheureusement, cette loi est rarement appliquée, et des gemmologues ont formé une association pour son application. Autre lacune du système : aucune compétence en gemmologie n'est requise pour ouvrir une bijouterie-joaillerie.

Pour pallier ces insuffisances, le consommateur doit exiger du vendeur l'indication que le bijou ne contient que des pierres naturelles et non traitées. Notons à ce propos qu'un laboratoire d'expertises gemmologiques est ouvert au public, à la Chambre de commerce et d'industrie de Paris.



7. LES CABOCHONS DE CE BRACELET ET DE CES BAGUES ont été traités par blanchissage, puis par imprégnation, à l'exception de l'un d'entre eux. Pouvez-vous deviner lequel (la réponse est indiquée ci-dessous)? L'ingéniosité et l'habileté des traiteurs de jade est telle que seules des techniques élaborées, telle la spectrométrie, permettent d'identifier la présence du traitement.

La pierre non traitée est sertie dans la bague en bas à droite.

Aujourd'hui, le plus gros problème de la gemmologie demeure la multiplication des nouveaux traitements, apanage de groupes riches et organisés. Face à ces traitements inconnus, le gemmologue est démuni : les organisations officielles ne se sentent pas concernées par cette nouvelle discipline, à la limite de la physique des matériaux et des sciences naturelles, de sorte que les efforts consentis sont moindres que ceux faits pour le développement des traitements.

Au sein de la Banque de France, des chimistes essaient de fabriquer des faux billets en inventant de nouvelles méthodes. À l'instar de ces contrefacteurs officiels, les organisations de vente des gemmes pourraient créer un service de gemmologues dont le but serait d'inventer de nouveaux traitements avant que ceux-ci n'arrivent sur le marché. Développons la science des gemmes pour relancer le secteur économique de la bijouterie sur des bases plus saines.

Emmanuel FRITSCH est professeur au Laboratoire de physique cristalline à l'Institut des matériaux de Nantes (IMN). Jim SHIGLEY est directeur de la recherche à l'Institut américain de gemmologie (GIA) à Carlsbad, en Californie. Bernard LASNIER est professeur à l'Université de Nantes.

K. NASSAU, *Gemstone Enhancement*,

Butterworths, 1984. Traduit en français par Michèle May, 1990, mémoire de DUG, Université de Nantes.

P. BARIAND et J.-P. POIROT, *Larousse des pierres précieuses*, Larousse, 1984.

R.C. KAMMERLING, J.I. KOIVULA et R.E. KANE, *Gemstone Enhancement and Its Detection in the 1980s*, in *Gems & Gemology*, vol. 26, n° 1, pp. 32-49.

La mission *Ulysse*

EDWARD SMITH • RICHARD MARSDEN

La sonde Ulysse a survolé les pôles du Soleil et analysé le fonctionnement de notre étoile.

