

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.

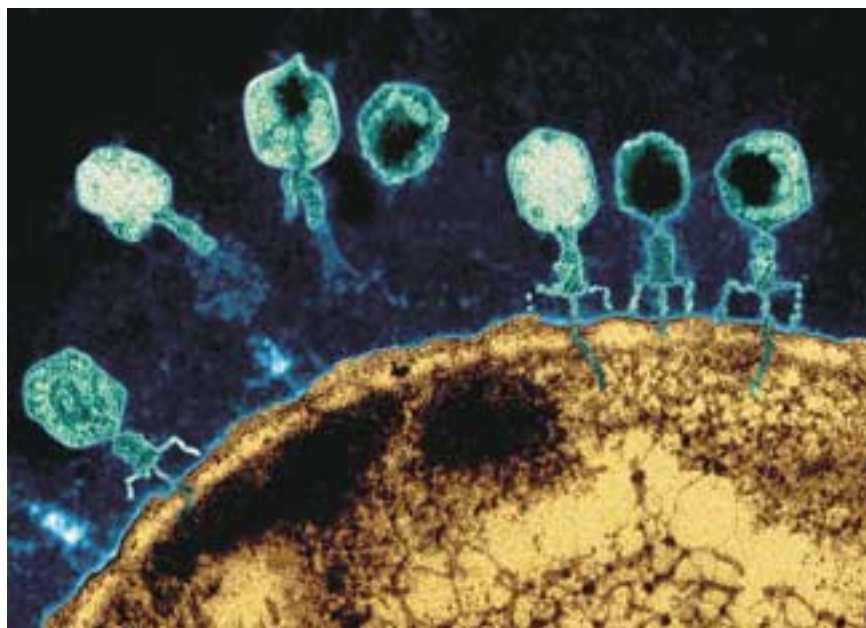
Transfert de gènes par virus

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 trempe 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



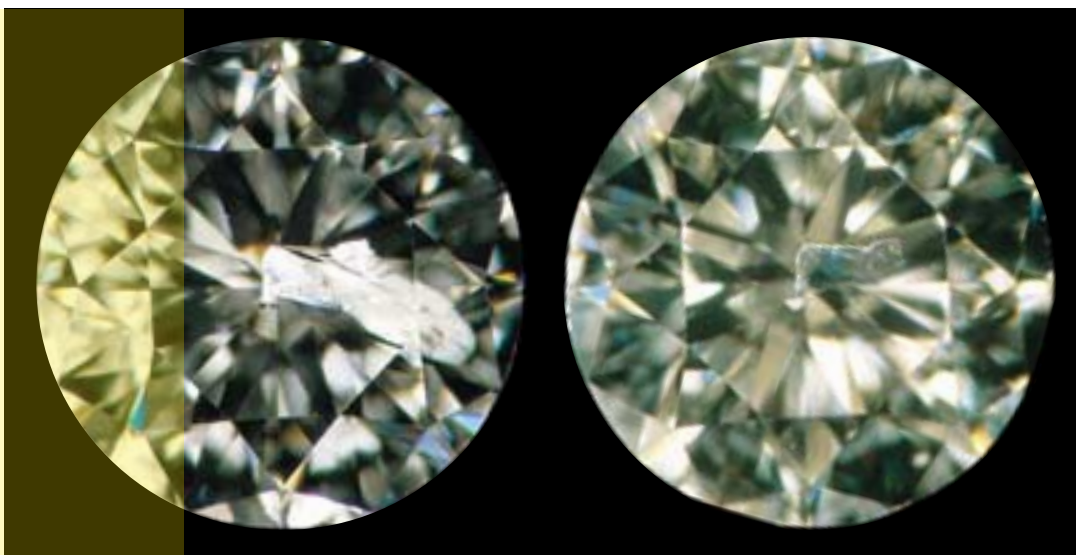
Pascal Entremont

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