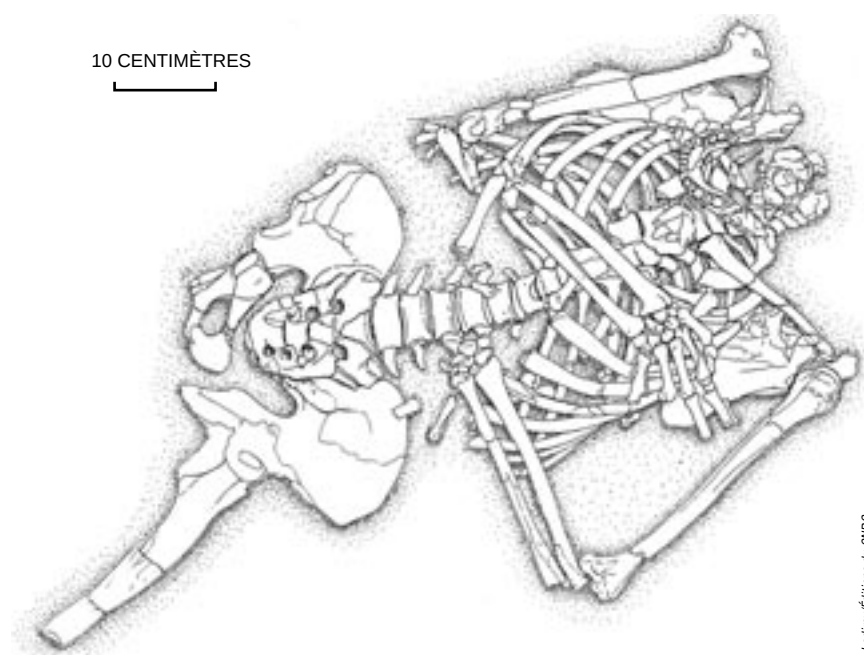


les zones habitables, le peuplement européen s'est réduit et s'est divisé en petites unités peu ou pas reliées entre elles. C'est d'ailleurs à partir de ce maximum glaciaire, il y a 18 000 ans, que l'on distingue dans les parties Ouest et Est de l'Europe des différences techniques et culturelles (qui évolueront indépendamment ensuite), ainsi que des faunes différentes.

Si une glaciation a eu de telles conséquences démographiques sur des hommes modernes qui connaissaient l'aiguille à coudre, construisaient des habitats perfectionnés et maîtrisaient bien le feu et ses utilisations, les glaciations précédentes ont *a fortiori* réduit fortement les populations d'hommes archaïques du Pléistocène moyen, qui n'avaient pas la même maîtrise technique. La distribution des gisements archéologiques le confirme : durant les phases froides du Pléistocène, le Sud était plus peuplé que le Nord, et l'Ouest plus que l'Est, l'Europe centrale et la grande plaine du Nord-Ouest européen ayant été en grande partie désertées.

Compte tenu de l'imprécision des datations et du faible nombre de fossiles dont nous disposons pour le Pléistocène moyen, de brèves crises démographiques semblables à celle qui a touché les hommes modernes lors du dernier maximum glaciaire passent totalement inaperçue aux yeux des archéologues. Pourtant, les conséquences évolutives d'un tel événement sont importantes : dans une petite population, le génome des individus fluctue rapidement au hasard, puis une partie seulement des gènes initiaux est préservée et fixée chez tous. Françoise Delpech, de l'Université de Bordeaux 1, a ainsi montré que les populations animales des stades 2 et 6 ont été profondément modifiées : les rennes et les antilopes Saiga du Sud-Ouest de la France ont été séparés des populations d'origine, plus à l'Est, et ont développé des caractères morphologiques particuliers.

Vers le milieu du Pléistocène moyen, à l'époque où apparaissent les caractères spécifiques des Néandertaliens, on observe justement une amplification brutale des fluctuations climatiques. Une glaciation exceptionnelle (le stade 12) isole les populations européennes du reste du monde et, comme nous l'avons vu, les réduit sans doute fortement. L'interglaciaire suivant (le stade 11), exceptionnellement chaud,



D. Ladrail/Éditions du CNRS

6. L'HOMME DE KÉBARA, en Israël, est l'un des Néandertaliens qui ont vécu au Levant il y a entre 80 000 et 50 000 ans. Cette avancée vers le Sud est sans doute liée à des phases de climat très froid en Europe. À l'inverse, lors du fort réchauffement d'il y a 125 000 ans, les Néandertaliens ont étendu leur territoire vers l'Asie Centrale : le plus oriental que nous connaissions a été découvert en Ouzbékistan.

permet probablement une nouvelle expansion géographique. Par la suite, ces populations se sont adaptées à des environnements plus froids qu'aujourd'hui, comme en témoignent leurs proportions corporelles, en particulier au cours des stades 8 et 6, une double glaciation de 150 000 ans, entrecoupée d'un interglaciaire relativement froid, le stade 7.

Tout au long du dernier demi-million d'années, des crises climatiques courtes, mais intenses, ont ainsi favorisé des phénomènes de dérive génique, accentuant le particularisme européen. Une succession de réductions fortes de la population explique la baisse de la diversité morphologique des hommes et la généralisation des caractères néandertaliens originaux.

Le même mécanisme démographique explique peut-être en partie la disparition des Néandertaliens. Il y a environ 40 000 ans, pendant l'interglaciaire du stade 3, un nouveau groupe humain, les Cro-Magnons, fait son entrée en Europe. Les deux populations coexistent environ 10 000 ans mais, à la veille de la glaciation du stade 2, et alors que le climat devient plus rude, la compétition pour l'exploitation des territoires est exacerbée : les hommes modernes, porteurs d'innovations techniques, et sans doute aussi sociales, occupent finalement la quasi-totalité des zones habitables. La crise qui touche alors les Néandertaliens est fatale à cette population, qui disparaît de ses derniers refuges il y a environ 30 000 ans.

Jean-Jacques HUBLIN est codirecteur de l'équipe d'anthropologie biologique du CNRS, au Musée de l'homme.

Les origines de l'homme, Pour la Science, 1989.

Jean-Jacques HUBLIN, *Les peuplements paléolithiques de l'Europe : un point de vue paléobiogéographique*, in *Mémoires du Musée de préhistoire d'Ile-de-France*, 3, 1990.

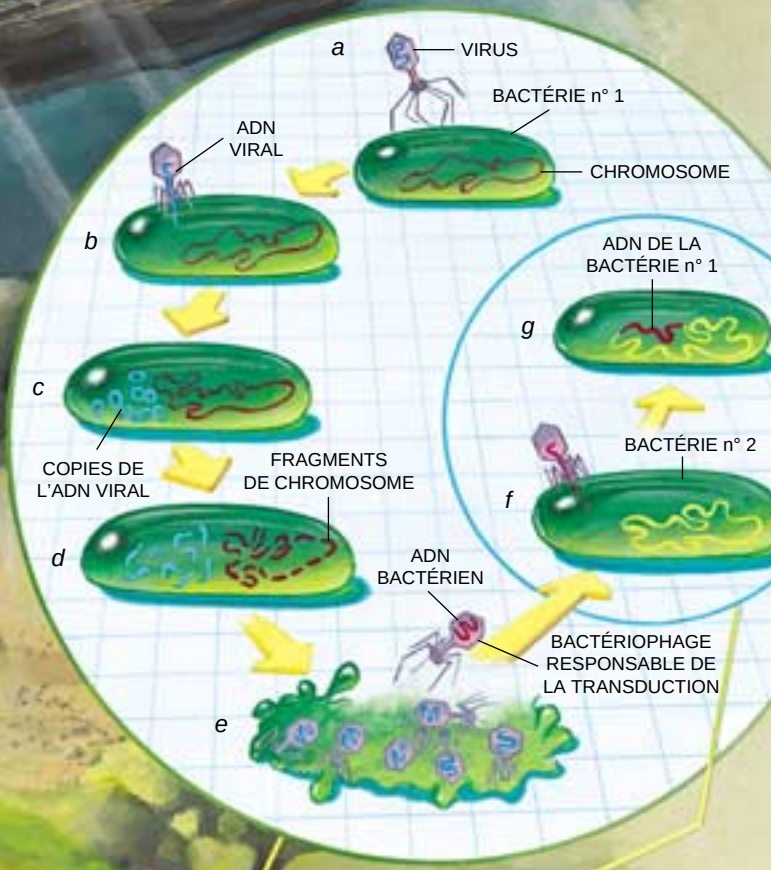
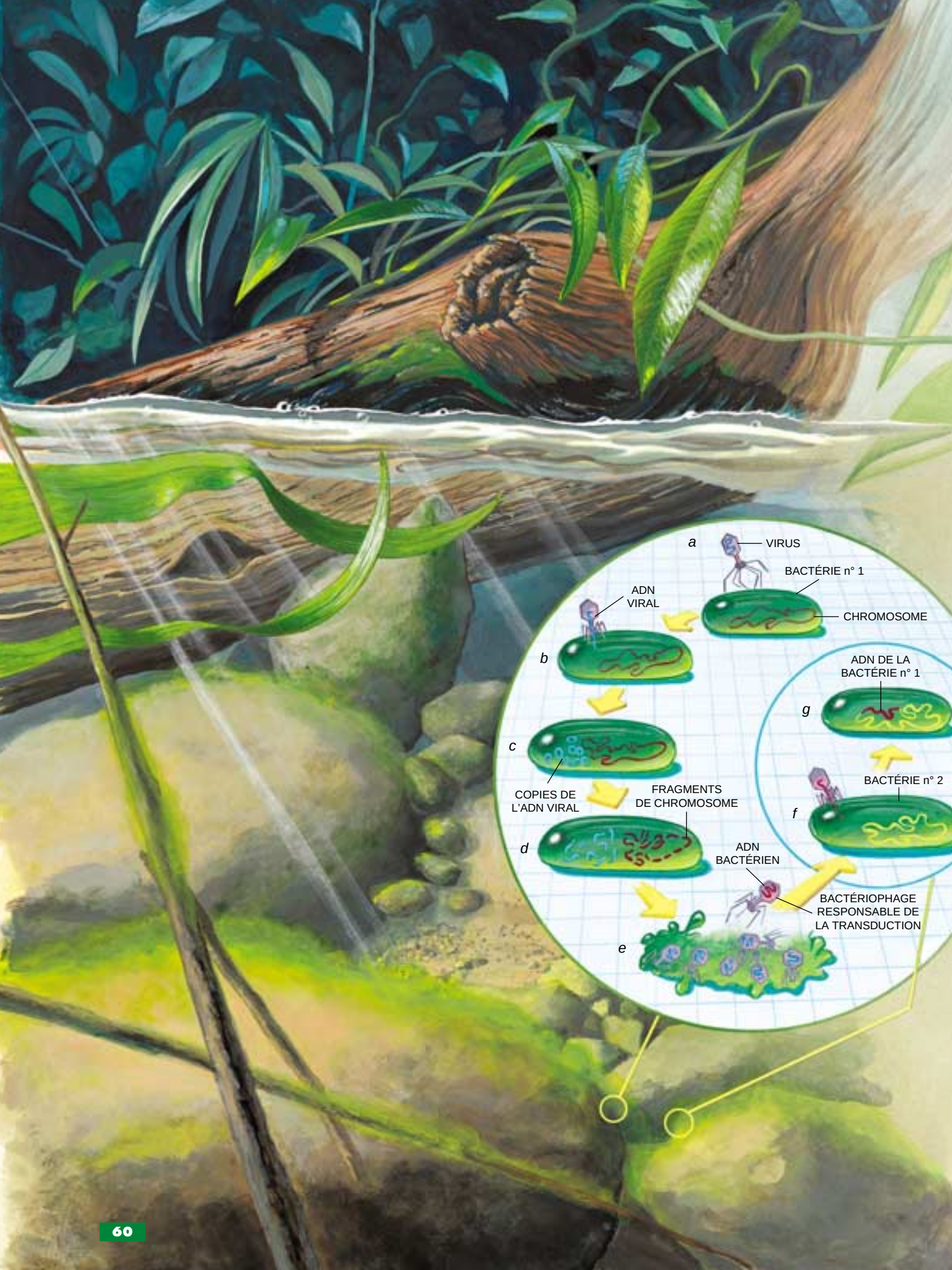
Jean-Jacques HUBLIN, *The First Europeans*,

in *Archaeology*, pp. 36-44, février 1996.

Jean-Jacques HUBLIN, Fred SPOOR, Marc BRAUN, Frans ZONNEVELD et Silvana CONDEMI, *A late Neanderthal associated with Upper Palaeolithic artefacts*, in *Nature*, vol. 381, pp. 224-226, 16 mai 1996.

Gerhard BOSINSKI, *Les origines de l'homme en Europe et en Asie*, Éditions Errance, Paris, 1996.

Ian TATTERSALL, *Les premiers exodes*, in *Pour la Science*, juin 1997.



Échanges de gènes entre bactéries

ROBERT MILLER

Le transfert de gènes entre bactéries d'espèces différentes est plus fréquent qu'on ne le croyait. Les généticiens devront explorer ce phénomène pour maîtriser les risques de contamination de l'environnement par des organismes génétiquement modifiés.

Au début des années 1980, alors que les biologistes amélioraient les techniques de transfert de gènes dans des bactéries, certains proposèrent de modifier des micro-organismes au bénéfice de l'environnement : des bactéries génétiquement modifiées nettoieraient-elles l'océan des nappes de pétrole déversées par accident ? Protégeraient-elles les cultures contre les prédateurs et contre les maladies ? Ces propositions furent vivement critiquées : on craignait (et l'on craint encore) que des bactéries modifiées n'échappent à tout contrôle ou que des gènes ne « sautent » d'un organisme à un autre. De tels transferts « horizontaux » de gènes (le transfert « vertical » de gènes se fait entre un « parent » et ses descendants) perturberaient irrémédiablement l'environnement, les animaux et l'homme, et ils risqueraient de détruire toute la biosphère.

À l'époque, les biologistes avaient peu d'informations pour apaiser les craintes : ils ignoraient comment les organismes génétiquement modifiés évoluent dans la nature, ou si les gènes bactériens (d'origine ou introduits arti-

ficiellement) migrent d'une bactérie à l'autre. Aujourd'hui, on connaît mieux ces phénomènes, grâce à une coopération entre généticiens et spécialistes de l'écologie microbienne qui étudient les micro-organismes dans leurs habitats naturels.

Deux souches de bactéries génétiquement modifiées sont déjà utilisées par les agriculteurs américains, et une dizaine d'essais en champ sont en cours. Les études sur le transfert de gènes entre bactéries dans leurs habitats naturels ont montré que les bactéries génétiquement modifiées risquent très peu de proliférer : elles sont fragiles et meurent assez rapidement, de sorte que leurs gènes risquent peu d'être disséminés.

Toutefois, dans certaines circonstances, les gènes risquent d'atteindre d'autres bactéries, voire d'autres types d'organismes. Pour que l'utilisation des micro-organismes modifiés soit dénuée de risques, les biologistes identifient les conditions de transfert des gènes bactériens. Ils prévoient d'utiliser ces informations pour sélectionner les bactéries qui ne risquent pas d'échanger leurs gènes sur les sites « traités » : dans un lac, par exemple,

on ne doit libérer que des bactéries qui n'échangent pas de gènes en milieu aqueux.

Les biologistes ne disposent pas encore de la liste des bactéries les plus appropriées pour une application donnée, mais ils ont élucidé les trois mécanismes de transfert horizontal de gènes qui se produisent dans la nature : la transduction, la conjugaison et la transformation.

Avant d'examiner ces trois mécanismes, rappelons que le transfert horizontal de gènes entre bactéries est au cœur d'un problème de santé publique qui préoccupe de plus en plus les autorités sanitaires, celui de la résistance croissante aux antibiotiques des bactéries pathogènes pour l'homme : les bactéries, qui sont des organismes unicellulaires, transmettent souvent des gènes de résistance aux antibiotiques à d'autres espèces de bactéries, à l'intérieur même de l'organisme humain. La compréhension des mécanismes de transfert devrait aider les biologistes à combattre ces bactéries résistantes.

Le transfert horizontal de gènes étant assez fréquent dans la nature, il a vraisemblablement contribué à la diversité génétique que les bactéries ont acquise au cours de l'évolution. Des gènes ont même sans doute été échangés entre les trois principales formes de vie : les bactéries, les eucaryotes (animaux, plantes, champignons et protozoaires) et les archéobactéries (des micro-organismes combinant des propriétés des bactéries et des propriétés des eucaryotes). Des gènes

1. LE TRANSFERT DE GÈNES par transduction a notamment lieu entre les bactéries présentes dans la couche de vase qui entoure les roches, au fond des rivières (à gauche). Un bactériophage, un virus infectant les bactéries, se fixe sur une bactérie et y injecte son ADN (a et b). À l'intérieur de la bactérie, l'ADN injecté est répliqué (c), et le chromosome bactérien se fragmente (d). Normalement, l'ADN viral est emporté par les nouvelles particules virales fabriquées par la bactérie infectée (e). Toutefois, au cours de la transduction, certains bactériophages emportent de l'ADN bactérien (c'est-à-dire des gènes bactériens) et l'injectent dans une autre bactérie (f) qui intègre l'ADN étranger dans son propre chromosome (g).

auraient été transférés des bactéries aux eucaryotes, des bactéries aux archéobactéries et, surtout, des eucaryotes aux bactéries. Ainsi, l'échange horizontal de gènes aurait participé à l'évolution de nombreuses espèces.

Une partie de pêche décisive

J'ai commencé à m'intéresser au transfert horizontal de gènes au printemps 1976, alors que j'étais assistant à l'Université de Knoxville. Généticien, je m'intéressais au fonctionnement des

cellules vivantes. Je savais que certaines souches de bactéries transmettent naturellement des gènes à d'autres bactéries, et le transfert horizontal de gènes me semblait un moyen pratique d'introduire de nouveaux gènes, et par conséquent de nouvelles caractéristiques, dans les cellules étudiées au laboratoire. Une partie de pêche en compagnie de Gary Sayler, un collègue spécialiste de l'écologie microbienne, élargit mon champ de recherches : «Les bactéries présentes dans ce lac échangent-elles des gènes?», me demandait-il. Je répondis, sans conviction, que les bactéries étaient trop dispersées dans l'eau pour avoir des contacts et échanger des gènes. De retour au laboratoire, je consultai les articles scientifiques sur ce sujet, et constatai que l'on ignorait à peu près tout du transfert horizontal de gènes.

G. Sayler avait construit un dispositif pour étudier les organismes vivants en

eau douce : un tube de plastique transparent, fermé aux deux extrémités par des filtres, permet le passage de l'eau et des nutriments, mais empêche que les bactéries ne s'échappent. Après avoir testé ce dispositif, nous avons fait des expériences et mesuré la fréquence de transfert de gènes se produisant dans notre coin de pêche. C'est ainsi que nous avons montré que ce transfert se produit en eau douce.

Nous avons publié nos résultats en 1978, persuadés qu'ils intéresseraient d'autres biologistes, au point qu'ils étudieraient le sujet. Nous avions tort : aucun article ne vint enrichir notre connaissance rudimentaire des échanges de gènes, aucune institution ne voulut même financer nos projets de recherche. L'attitude des autorités et des scientifiques ne changea qu'en 1985, quand on s'inquiéta de la libération dans l'environnement de bactéries génétiquement modifiées. Quelques équipes commencèrent à étudier le transfert horizontal de gènes dans diverses conditions.

La conjugaison

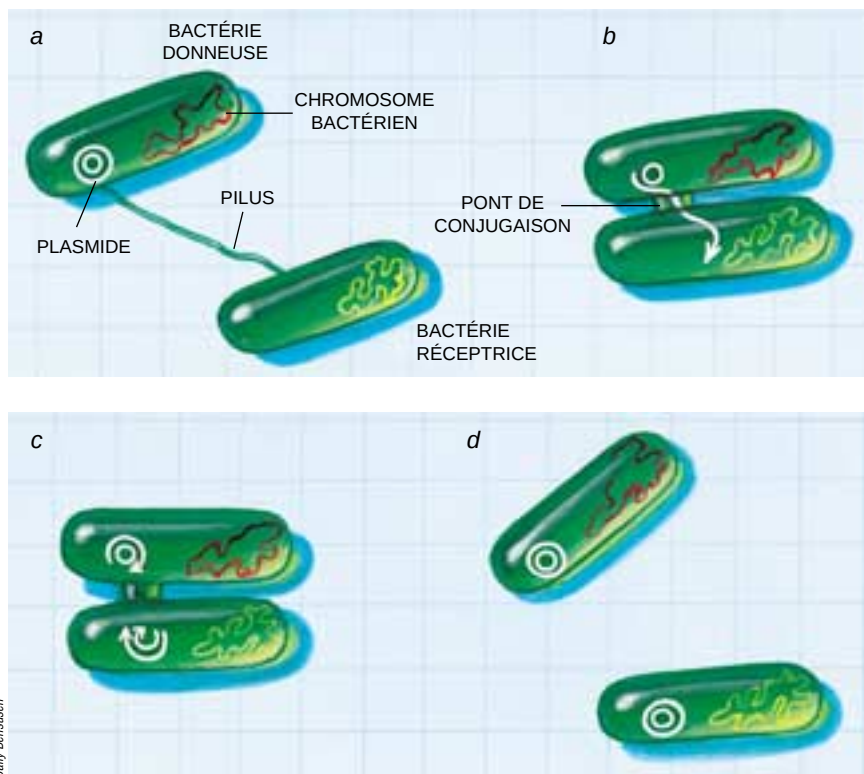
Des gènes se dissémineraient-ils par le mécanisme de conjugaison ? En 1946, à l'Université Yale, Joshua Lederberg et Edward Tatum avaient découvert que la bactérie *Escherichia coli*, qui colonise l'intestin humain, échange des boucles d'ADN que l'on nomme des plasmides, par un mécanisme qui ressemble à la reproduction sexuée (les chromosomes eux-mêmes sont parfois échangés par conjugaison, mais dans des circonstances exceptionnelles).

Les plasmides contiennent des gènes, mais sont séparés du chromosome bactérien, qui est plus long et contient les gènes nécessaires à la reproduction de la bactérie. Souvent les gènes des plasmides augmentent les chances de survie dans des conditions défavorables. Ainsi, en plus des gènes nécessaires à leur propre répllication et à leur transfert, ils portent souvent des gènes «salvateurs» : les protéines qu'ils codent permettent aux bactéries d'inactiver les antibiotiques, de dégrader des composés toxiques, tels les diphényles polychlorés (les PCB) ou de former des complexes avec le mercure ou d'autres métaux lourds, ce qui les rend toxiques.

Les microbiologistes séparent les bactéries en deux types – à Gram négatif et à Gram positif –, selon qu'elles se colorent ou non en présence d'un colo-



Dr. L. Caro, SPL/Photo Researchers, Inc.



Sally Berssen

2. DES PLASMIDES, ou boucles d'ADN, sont transférés entre bactéries par un mécanisme de conjugaison. Une bactérie à Gram négatif donneuse émet des projections, des pili, qui s'attachent à une bactérie réceptrice et qui rapprochent les deux bactéries (photographie et a). Ensuite un pont (presque réduit à un pore) relie les deux bactéries ; un brin de l'ADN plasmidique passe dans la bactérie réceptrice (b), et chaque brin simple est dupliqué pour redonner un plasmide à double brin (c). Le transfert achevé, les bactéries se séparent (d). La conjugaison chez les bactéries à Gram positif (non représentée) se déroule de la même façon, mais l'attraction des partenaires est assurée par un signal chimique et non plus par des pili.

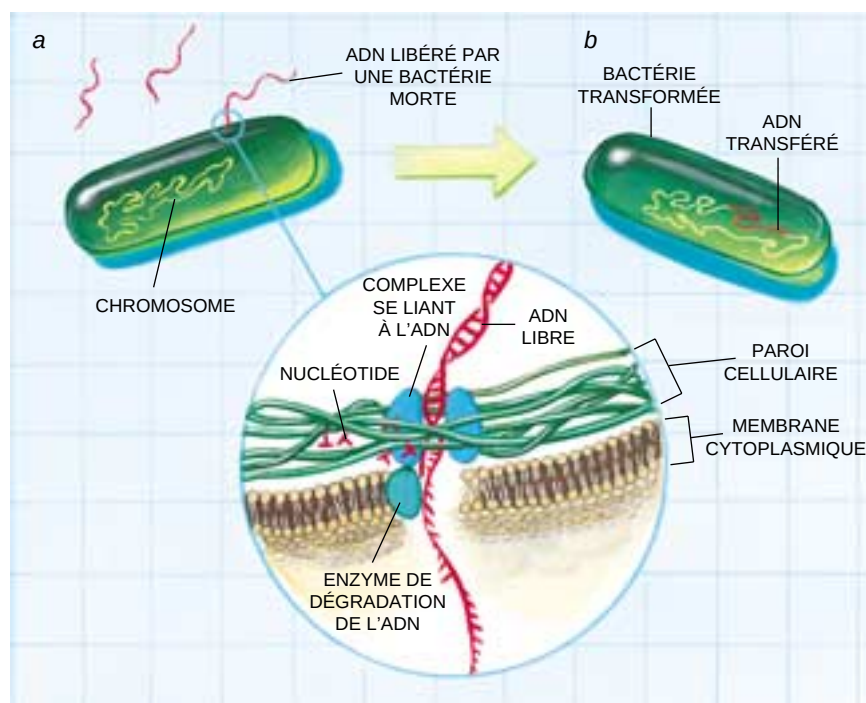
rant de référence. Chez les bactéries à Gram négatif, la conjugaison commence quand le micro-organisme donneur s'arrime à un micro-organisme receveur par l'intermédiaire d'un appendice, nommé pilus ; puis le pilus se rétracte, mettant le donneur et le receveur en contact. Souvent, plusieurs donneurs émettent des pili simultanément et convergent vers la même cellule réceptrice : les bactéries s'agglutinent. Dans ces agrégats, des ponts ou des pores se forment entre donneurs et receveurs, et des plasmides s'échangent.

Certains pili stimulent l'aggrégation des bactéries en milieu liquide ou sur des surfaces solides ; d'autres ne sont efficaces que sur des solides. Par conséquent, si l'on veut introduire des bactéries à Gram négatif génétiquement modifiées dans un environnement aquatique, on doit sélectionner des espèces dont les pili déclenchent l'aggrégation uniquement sur des solides.

Chez les bactéries à Gram positif, la conjugaison s'effectue sans pili. Ces bactéries, prêtes à recevoir du matériel génétique, sécrètent des substances qui stimulent des congénères donneurs : ces derniers sont alors incités à produire des protéines, souvent nommées facteurs d'aggrégation, qui assurent l'agglutination ; ensuite, les pores nécessaires au transfert d'ADN se forment à la jonction. Ainsi, si l'on introduisait une bactérie recombinée à Gram positif dans une zone où sont présentes d'autres bactéries à Gram positif, on devrait d'abord la rendre incapable de fabriquer des facteurs d'aggrégation, afin de minimiser les risques de transfert de gènes.

En général, les bactéries à Gram négatif et à Gram positif n'échangent des plasmides qu'avec des bactéries de leur propre espèce. Toutefois, certains plasmides transfèrent l'ADN entre espèces non apparentées : entre bactéries à Gram négatif et à Gram positif, voire même entre bactéries et levures, ou entre bactéries et plantes. Les bactéries qui portent de tels plasmides ne doivent pas quitter le laboratoire.

La conjugaison est-elle suffisamment fréquente dans la nature pour que des précautions s'imposent ? Depuis l'avènement du génie génétique, dans les années 1980, les biologistes ont montré qu'elle se produit effectivement dans de nombreux environnements naturels, notamment dans l'eau, sur terre et chez diverses espèces végétales et animales.



3. AU COURS D'UN MÉCANISME DE TRANSFORMATION (a), une bactérie récupère de l'ADN libéré dans son environnement par une bactérie morte. Des complexes présents à la surface de la bactérie fixent l'ADN (cartouche inférieure), et des enzymes découpent un des deux brins en nucléotides ; simultanément, l'autre brin est intégré au chromosome de la bactérie et le brin complémentaire est synthétisé *in situ* (b). Bien que la transformation (illustrée ici pour une bactérie à Gram positif) se produise aussi dans les bactéries à Gram négatif, ce mécanisme reste rare.

Transfert en eau douce

Ainsi une équipe de l'Université du Pays de Galles a montré que le transfert de gènes par conjugaison se produit entre bactéries dans l'eau douce : une souche de laboratoire de *Pseudomonas aeruginosa* capte par conjugaison un plasmide qui confère une résistance au mercure aux bactéries de la Taft, une rivière polluée près de Cardiff. *Pseudomonas aeruginosa* est une bactérie commune des sols et des eaux douces, susceptible de provoquer des infections respiratoires et urinaires chez les personnes dont les défenses immunitaires sont affaiblies. Les biologistes britanniques ont d'abord muté un gène de la bactérie afin qu'il produise une version anormale de la protéine codée par le gène sain : la protéine modifiée servirait de marqueur pour repérer les bactéries introduites dans la rivière. Puis, l'équipe a introduit les bactéries marquées dans la vase, riche en nutriments, qui recouvre les pierres, au fond de la rivière ; un filtre très fin empêchait les bactéries de s'échapper.

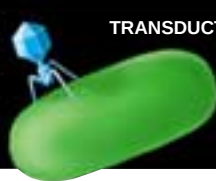
Le lendemain, les pierres ont été récupérées et la vase analysée, à la recherche de bactéries *Pseudomonas aeruginosa* ayant à la fois le gène modi-

fié et le plasmide de résistance au mercure. La proportion des bactéries ayant reçu le plasmide était faible (entre une sur 10 000 et une sur un milliard), mais le transfert avait bien eu lieu. Ces expériences montrèrent également que divers facteurs, tels que la température, l'acidité du milieu et sa concentration en nutriments, modifient la fréquence de la conjugaison.

D'autres études ont exploré l'importance variable de tels facteurs, selon que la conjugaison a lieu dans la nature ou en laboratoire. Ainsi, la conjugaison se produit dans la nature entre 6 et 18 °C, tandis qu'en laboratoire la température doit être supérieure. Aussi les biologistes n'identifieront-ils des moyens fiables de minimiser le mécanisme que s'ils l'étudient en milieu naturel.

C'est ainsi que l'on a établi que les bactéries transfèrent de l'information génétique par conjugaison dans divers environnements, mais que les plasmides génétiquement modifiés ne semblent pas dangereux pour autant : ils ralentissent la croissance des bactéries et sont généralement éliminés quand ils ne confèrent aucun avantage. Si un plasmide génétiquement modifié de résistance au mercure était transmis à un micro-organisme en

Quelques environnements où l'on a observé un transfert horizontal de gènes bactériens

	TRANSDUCTION 	CONJUGAISON 	TRANSFORMATION 
ENVIRONNEMENTS TERRESTRES 	Sol, surface des plantes	Sol, surface des plantes	Sol
ENVIRONNEMENTS AQUEUX 	Lacs, océans, rivières, eaux usées dans les stations d'épuration	Lacs, océans, sédiments marins, rivières, vase au fond des rivières, eaux usées dans les stations d'épuration	Sédiments marins, rivières, vase au fond des rivières
DANS LES ORGANISMES 	Crustacés, souris	Plantes, insectes, poulet, souris, homme	Plantes, insectes, souris

Jennifer C. Christiansen

dehors d'une zone polluée par le mercure, le nouvel hôte s'en débarrasserait rapidement.

De surcroît, les plasmides sont rarement intégrés dans les chromosomes bactériens, de sorte que, même s'ils se propageaient, ils ne s'intégreraient pas dans le génome de nouvelles bactéries ; les chromosomes sont invariablement copiés et transmis aux nouvelles générations de bactéries quand une cellule mère se reproduit, tandis que la transmission des plasmides n'est pas systématique. Pourtant, afin que les plasmides ne propagent pas dans la nature de gènes modifiés, les biologistes insèrent ces gènes dans les chromosomes et non dans des plasmides.

La conjugaison, qui fut le premier mécanisme de transfert de gènes bactériens étudié dans la nature, n'a pas été le premier identifié. En 1928, le bactériologiste anglais Frederick Griffith observa que des pneumocoques non virulents devenaient pathogènes lorsqu'on les injectait à des souris en même temps que des pneumocoques virulents morts. Il en conclut que les bactéries initialement non virulentes prélevaient un «agent de transformation» aux bactéries virulentes mortes, qui les rendait capables de tuer des souris. On sait aujourd'hui que l'agent de transformation est de l'ADN libéré quand les bactéries mortes se décompo-

sent. Un gène est échangé par transformation quand le plasmide qui le porte est tout entier incorporé dans la bactérie, ou quand un fragment d'ADN est intégré dans le chromosome de la bactérie réceptrice.

Des risques infimes de transformation

Pour qu'une transformation ait lieu dans des bactéries à Gram négatif ou dans des bactéries à Gram positif, l'ADN libéré par les bactéries en décomposition doit être stable, et les bactéries réceptrices doivent le récupérer : les bactéries réceptrices doivent porter des protéines de surface qui se lient à l'ADN et le font pénétrer dans les cellules.

Les biologistes ont longtemps pensé que les mécanismes de transformation ne se produisaient pas partout, car l'ADN n'est stable ni dans le sol ni dans l'eau. Toutefois, Michael Lorenz et Wilfried Wackernagel, de l'Université d'Oldenburg, en Allemagne, et Guenther Stotzky, de l'Université de New York, ont montré que l'ADN libre est stabilisé par liaison à divers composés du sol, de sorte qu'il est ensuite récupéré par des bactéries adaptées. Des plasmides, également, sont parfois transférés par transformation dans l'eau douce et dans la vase du fond des rivières. En revanche, le transfert de gènes de chromosomes par le mécanisme de trans-

formation ne semble se produire ni dans la terre ni dans l'eau.

Au total, la libération de bactéries génétiquement modifiées dans l'environnement semble faire courir un faible risque d'échange de gènes par transformation. Seules des bactéries de la même espèce semblent s'échanger naturellement des gènes par les mécanismes de transformation, et peu d'espèces de bactéries semblent susceptibles de se transformer par ces mécanismes. Les biologistes éviteront d'employer les micro-organismes qui le pourraient.

En outre, même si les bactéries mortes libèrent de grandes quantités d'ADN que d'autres bactéries ingèrent, les gènes absorbés sont rarement fonctionnels. John Paul et ses collègues de l'Université de Floride du Sud ont montré que de grandes quantités d'ADN bactérien sont libérées dans les eaux des estuaires après le lever du jour, lorsque de nombreuses bactéries meurent. Toutefois, ils ont aussi montré en laboratoire que la plus grande part de l'ADN libéré et absorbé par les bactéries vivantes est rapidement dégradée en ses constituants élémentaires, lesquels servent à la synthèse de nouveaux brins d'ADN ; les gènes contenus dans l'ADN libre sont rarement intacts.

Contrairement à la transformation, la troisième forme de transfert horizontal de gènes, la transduction, a

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.

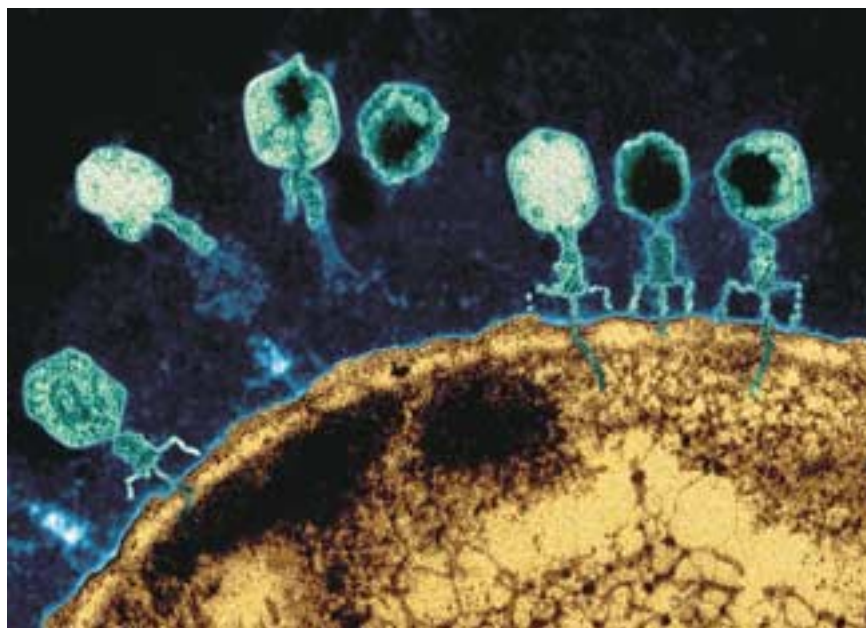
Transfert de gènes par virus

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.