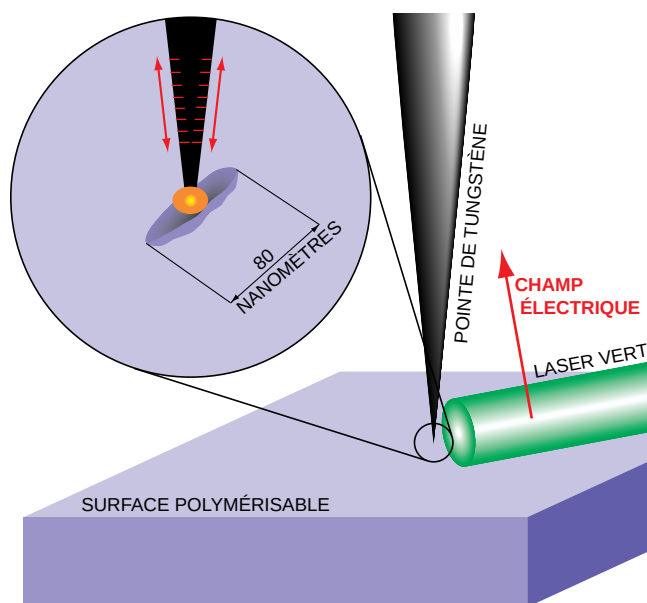




2. Lorsque les physiciens éclairent la pointe métallique d'un microscope à force atomique avec un laser vert, il se crée des ondes évanescentes à son extrémité. Le champ électrique du laser fait alors osciller les électrons du métal. Cette oscillation accroît localement l'intensité des ondes évanescentes (zone jaune) qui sculptent la surface photosensible située sous la pointe en une structure de taille cinq fois inférieure à la longueur d'onde du laser utilisé.

c'est une onde évanescente. Tout se passe comme si, avant d'être réfléchi, l'onde pénétrait légèrement dans le milieu d'indice inférieur.

Effleurant ainsi la matière, cette onde peut durcir un monomère sur quelques nanomètres d'épaisseur. Par exemple, en créant des ondes évanescentes à l'aide d'un prisme, les chercheurs ont construit des couches dont la hauteur ne dépassait pas quatre nanomètres (voir la figure 1).

par réflexion totale sur un prisme, comme précédemment, mais des ondes évanescentes obtenues par diffraction sur un objet de taille inférieure à la longueur d'onde de la lumière. En effet, lorsque un objet diffracte de la lumière, deux sortes d'ondes sont créées : des ondes propagatives dont la longueur d'onde est au plus égale à la moitié de la longueur d'onde initiale et des ondes évanescentes, confinées près de l'objet.

La résolution verticale obtenue est excellente, mais peut-on créer des structures dont la résolution verticale et la résolution horizontale soient inférieures à la moitié de la longueur d'onde utilisée ? Autrement dit, peut-on passer d'une meilleure résolution dans une dimension (la hauteur des couches de polymère), à une meilleure résolution dans les trois dimensions spatiales ?

Des physiciens ont alors eu l'idée de combiner des ondes évanescentes et l'effet de pointe. Dans ce cas, on utilise non pas des ondes évanescentes créées

Quelle est le principe de l'expérience ? L'extrémité d'une pointe de tungstène de quelques nanomètres de diamètre est placée au contact d'une surface polymérisable (un liquide composé d'un monomère et de «photo-initiateurs»). Cette pointe est éclairée avec un laser durant quelques secondes, de sorte que la surface sensible absorbe une énergie inférieure à celle nécessaire à sa solidification. Cet éclairage engendre cependant des ondes évanescentes localisées autour de la pointe. C'est là que l'effet de pointe intervient.

L'éclairage de la pointe métallique par un champ électrique quasi parallèle à l'axe de la pointe et créé par un faisceau laser fait vibrer les électrons de la pointe (voir la figure 2). Comme le diamètre de la pointe est de plus en plus petit à mesure que l'on se rapproche de l'extrémité, la densité spatiale de charges devient très importante au bout de la pointe. Autrement dit, cet effet augmente l'intensité du champ électromagnétique au bout de la pointe, de sorte que celle-ci polymérise la solution sensible très localement.

Grâce à cette amplification des ondes évanescentes, les physiciens ont obtenu de manière reproductible des structures inférieures à 100 nanomètres, cinq fois moins que la longueur d'onde du laser incident (540 nanomètres).

Ainsi, la limite de diffraction n'est plus un obstacle : ce n'est plus la longueur d'onde de la lumière qui importe, mais son confinement. Non seulement les ondes évanescentes serviront à la miniaturisation d'éléments plastiques, mais aussi en optique, en holographie, voire pour des applications jusqu'alors réservée à la lithographie X.

Symbiose de galaxies

Une petite galaxie spirale au cœur d'une galaxie géante.

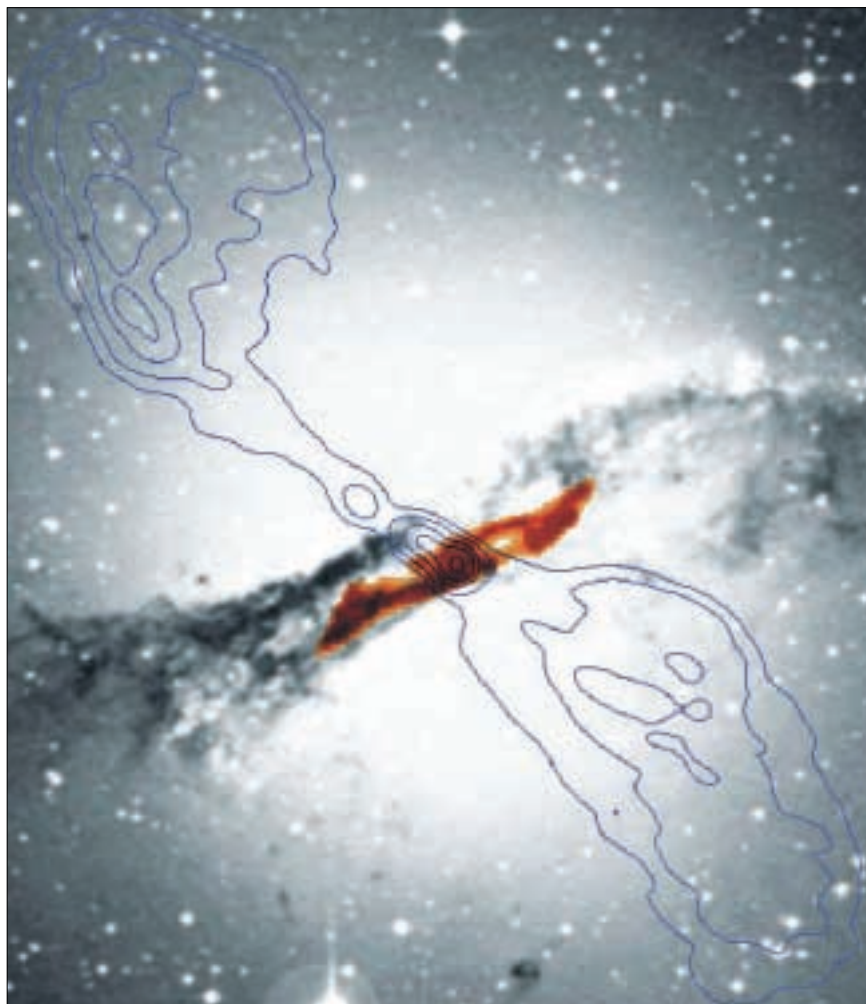
Les radiogalaxies géantes sont des galaxies dont la région centrale, vraisemblablement constituée d'un trou noir massif, a éjecté une grande quantité de matière sous forme de jets. Ces jets émettent un fort rayonnement radio. Les jets de la radiogalaxie Centaurus A sont si étendus que la galaxie a dû éjecter de la matière durant un milliard d'années ! Comment alimenter aussi longtemps le trou noir central ? À l'aide du télescope infrarouge ISO, Félix Mirabel, Olivier Laurent et leurs collègues du CEA ont découvert, au centre de cette radiogalaxie, une galaxie spirale dont

la structure rémanente alimenterait le trou noir.

La caractéristique essentielle des radiogalaxies étendues est la taille des jets. La matière éjectée par Centaurus A s'étend ainsi à près de 500 000 années-lumière de part et d'autre de la région centrale. Cachée par un grand disque de gaz, cette région abriterait un trou noir massif. Aux longueurs d'onde visibles, le disque de gaz absorbe tout le rayonnement, de sorte que l'on ne peut rien distinguer de sa structure interne. Dans l'infrarouge proche (entre un et deux micromètres), l'absorption est moindre, mais l'intense émission des vieilles étoiles de la galaxie elliptique qui entoure le disque de gaz est la seule visible. En revanche, à des longueurs d'onde de l'infrarouge moyen et lointain (entre 5 et 16 micromètres environ), les astronomes observent l'émission du gaz situé à l'intérieur du disque. À

leur grande surprise, ils ont découvert que ce gaz central avait la morphologie d'une galaxie spirale barrée. Les analyses de cette structure ont permis la reconstitution des événements qui ont précédé à la formation de Centaurus A.

Voici des milliards d'années, une galaxie elliptique géante est entrée en collision avec une petite galaxie spirale. Cette dernière a alors été complètement phagocytée, et la matière qui la constituait a formé un disque de gaz et de poussière au centre de la galaxie elliptique. Or, la présence d'une galaxie elliptique autour du disque stabilise ce dernier, tout comme la présence d'un halo autour de notre Galaxie la stabilise. Ainsi, le disque de gaz au centre de Centaurus A est stable depuis des milliards d'années. Dans ce disque, des instabilités ont formé une structure spirale et une barre constituée d'étoiles et de gaz. Cette structure de barre se serait



Félix Mirabel et Olivier Laurent

Cette superposition d'images illustre la structure de la radiogalaxie Centaurus A. Le fond est une image dans le visible où l'on distingue un disque de poussière opaque, au cœur d'une galaxie elliptique. L'émission radio (*c o n t o u r s v i o l e t s*) provient d'électrons éjectés à très grande vitesse par le trou noir central. L'émission infrarouge centrale (*z o n e*), observée à l'aide du satellite ISO, a

maintenue durant un milliard d'années en raison du déclenchement permanent de nouvelles «instabilités spirales» dans le disque. Grâce à cette barre, une sorte de tuyau d'alimentation géant, la matière des régions externes du disque est transportée vers le trou noir qui l'éjecte en de puissants jets.

Si c'est la première fois que ce mécanisme symbiotique est observé, les astro-

nomes s'interrogent sur son universalité : est-il à l'origine de toutes les radiogalaxies géantes observées ? Les autres radiogalaxies sont malheureusement trop lointaines pour que l'on puisse les utiliser pour répondre à cette question. Seuls des télescopes spatiaux, tel le *NGST* (un super télescope spatial qui sera lancé entre 2007 et 2010), seront en mesure d'apporter une réponse.

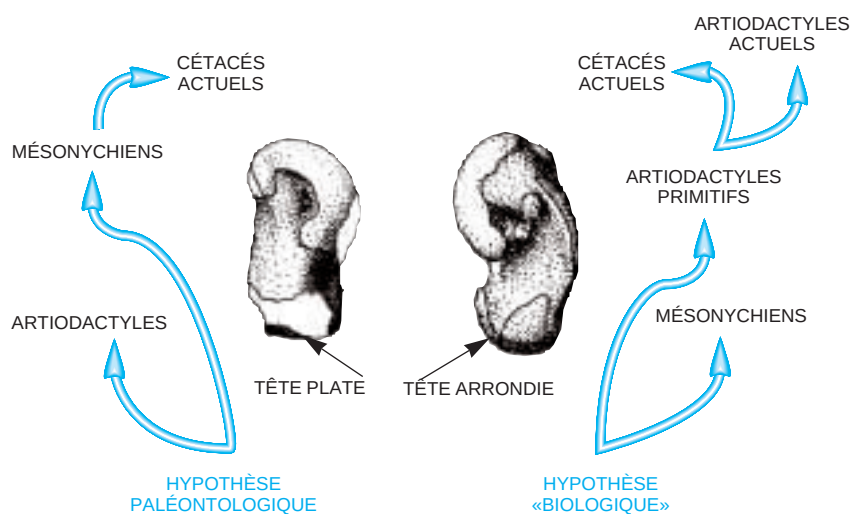
La cheville des baleines

Des fossiles identifient-ils les ancêtres des cétacés ?

Les mammifères terrestres, l'espèce humaine comprise, ont un ancêtre commun aquatique qui, un jour, est sorti de l'eau et a conquis la terre ferme. Parmi ses descendants, certains ont pourtant «choisi» de retourner vivre

dans l'eau. Ainsi, les cétacés tels que les baleines et les dauphins ont un ancêtre terrestre.

Les paléontologues ont longtemps cru que les mésonychiens terrestres, aujourd'hui disparus, étaient les ancêtres des mammifères marins. Cependant, des résultats d'analyses d'ADN modifient cette vision en montrant que les artiodactyles (des ongulés marchant sur un nombre pair de doigts, tels les hippopotames, les chameaux et les ruminants actuels) étaient les plus proches cousins des mammifères marins, avec lesquels ils partageraient un



John Klausmeyer



L'*Ambulocetus* est une baleine primitive dont on a retrouvé des os de chevilles (astragale) fossilisés âgés de 50 millions d'années. L'anatomie comparée de ces os (os de gauche) avec ceux d'artiodactyles (os de droite), tels les hippopotames actuels, incite à penser que les mésonychien sont les ancêtres des cétacés actuels (arbre de gauche). Une autre hypothèse indique que les artiodactyles primitifs seraient les ancêtres des baleines (arbre de droite).

ancêtre commun. Récemment, au Pakistan, l'équipe de Hans Thewissen, de l'Université de l'Ohio, a mis au jour deux os fossilisés qui confirment en partie la théorie des paléontologues.

Les fossiles sont des astragales de chevilles de baleines primitives, telles que *Ambulocetus* (voir la figure) vivant il y a 50 millions d'années. La tête arron-

die des os découverts diffère des astragales des artiodactyles et renforcent la théorie des mésonychien ; néanmoins, deux facettes articulaires correspondent à celles que l'on trouve chez les artiodactyles. Les paléontologues s'interrogent. J. Thewissen, pense que les fossiles n'appartiennent vraisemblablement pas à un artiodactyle, mais n'ap-

partiennent sans doute pas non plus à un mésonychien.

Les biologistes moléculaires ont comparé les génomes de cétacés avec ceux de différents artiodactyles encore vivants. Les derniers résultats contredisent les données paléontologiques et montrent que l'hippopotame est l'artiodactyle le plus proche des cétacés. Tout deux auraient un ancêtre commun.

Mark Uhen, de l'Institut de Cranbrook, remarque que les artiodactyles peuvent être les animaux terrestres vivants les plus proches des mammifères marins, sans en être les ancêtres. En outre, les paléontologues indiquent que les résultats d'analyses génétiques sont biaisés car les similarités constatées ne reflètent peut-être que des évolutions convergentes, plutôt que l'existence d'un ancêtre commun.

William Sanders, de l'Université du Michigan, remarque par ailleurs que les plus vieux fossiles d'hippopotames connus sont âgés d'environ 18 millions d'années, alors que les plus vieilles baleines datent de plus de 50 millions d'années. Un ancêtre commun aurait donc subsisté plus de 32 millions d'années sans laisser de traces. De plus, la dentition et la forme du crâne des baleines ne correspondent pas à celles des artiodactyles.

L'issue du débat reste confuse. D'une part, aucun fossile de mésonychien ne contient d'ADN suffisamment intact pour se prêter à des analyses comparées fiables. D'autre part, les morphologies des fossiles ne sont pas assez convaincantes. Seul un fossile de mésonychien bien conservé permettrait de trancher.

Lignes de billes

Peut-on aligner des billes sur une ligne de façon que quatre d'entre elles soient à coup sûr non équidistantes ?

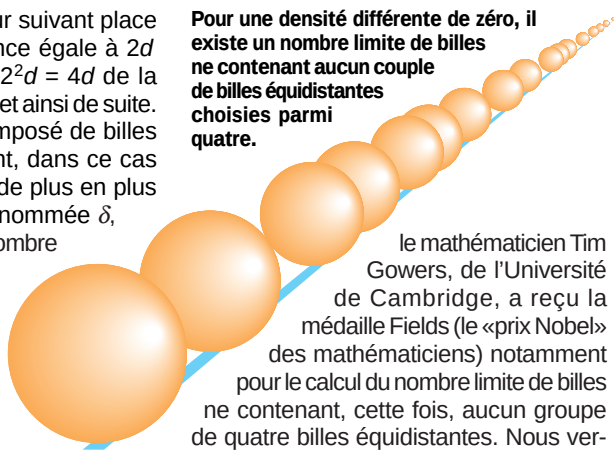
Cela ressemble à la règle d'un jeu pour les enfants. Deux joueurs disposent de billes, et chacun à son tour, ils en posent une sur une ligne. La condition imposée est qu'aucun groupe de trois billes choisies au hasard ne doit être formé de billes équidistantes (dans ce cas, aucune bille centrale de triplets ne doit être au milieu des deux autres). Est-ce que deux enfants peuvent jouer indéfiniment ?

Avec cette seule condition, la réponse est affirmative. Par exemple, lorsque d est la distance qui sépare les deux

premières billes, le joueur suivant place la troisième à une distance égale à $2d$ de la deuxième, puis à $2^2d = 4d$ de la troisième, puis à $2^3d = 8d$, et ainsi de suite. Aucun triplet ne sera composé de billes équidistantes. Cependant, dans ce cas de figure, les billes sont de plus en plus espacées, et la densité, nommée δ , c'est-à-dire le rapport du nombre de billes posées entre la première et la dernière sur le nombre total de billes que l'on pourrait poser, tend vers zéro à mesure que le jeu se déroule.

Imposons donc une nouvelle condition : la densité ne doit pas être nulle à l'infini. Les enfants peuvent-ils encore jouer indéfiniment ? La réponse est négative, il y a un nombre limité de billes à jouer qui dépend de la densité que les joueurs se sont imposé. En 1998,

Pour une densité différente de zéro, il existe un nombre limite de billes ne contenant aucun couple de billes équidistantes choisies parmi quatre.



le mathématicien Tim Gowers, de l'Université de Cambridge, a reçu la médaille Fields (le «prix Nobel» des mathématiciens) notamment pour le calcul du nombre limite de billes ne contenant, cette fois, aucun groupe de quatre billes équidistantes. Nous verrons que ses travaux concernaient des nombres et non des billes.

En 1936, les mathématiciens hongrois P. Erdős et G. Turán ont conjecturé que pour une densité δ donnée, il existait un nombre limite N de billes à poser tel que k billes prises au hasard ne soient pas

équidistantes. En 1953, K. Roth a calculé le nombre maximal de billes que l'on peut poser avec une densité δ , de façon qu'aucun triplet prélevé au hasard ne soit composé de billes équidistantes. Ce nombre est très élevé ; les enfants joueront quelques semaines en posant une bille par seconde !

T. Gowers a calculé récemment le nombre limite de billes qui ne contient pas quatre billes équidistantes, en fonction de la densité δ . L'intérêt de sa méthode réside dans son application possible pour des groupes de billes plus importants. Le calcul du nombre limite de billes ne contenant pas de groupe de plus de quatre billes est aujourd'hui en cours de vérification.

Laissons les billes aux enfants. Ces résultats intéressent les mathématiciens

lorsque la ligne de jeu est remplacée par l'ensemble des entiers naturels et les billes par des entiers. Des billes équidistantes signifient alors des nombres successifs d'une suite arithmétique où l'on calcule un terme en ajoutant une constante au précédent (par exemple, la suite 4, 9, 14, 19, 24,...). Le résultat de T. Gowers indique que dans la suite des entiers de 1 à N où N est supérieur à la limite calculée, chaque sous-ensemble de δN nombres contient au minimum une suite arithmétique de quatre termes. Anodin en apparence, ce résultat est le premier pas dans la résolution d'un problème soulevé par P. Erdős : l'ensemble des nombres premiers (divisibles uniquement par 1 ou par eux-mêmes) contient-il des suites arithmétiques de longueur quelconque ?

Nouveau regard sur des fards

Il y a 4 000 ans, les Égyptiens synthétisaient des cosmétiques à usage thérapeutique.

Un trait de maquillage noir qui souligne et allonge l'œil : la fréquence de cette caractéristique sur les portraits peints et sculptés dans l'Égypte ancienne y témoigne de l'importance du maquillage. Des tombes ont effectivement livré des coffrets de toilette qui contenaient, outre des miroirs, des épingles à cheveux et des stylets, des récipients encore remplis de poudres colorées. Les Égyptiens se maquillaient avec des fards verts, blancs, gris ou noirs, mélanges de minéraux colorés et de matières grasses. Outre des préoccupations esthétiques, ces produits avaient des fonctions thérapeutiques, qui motivaient des procédés de fabrication longs et complexes.

Le Musée du Louvre conserve, dans ses collections égyptiennes, de nombreux flacons à fard, en pierre, de roseau ou en bois, qui pouvaient contenir 50 à 100 grammes de poudre. Notre équipe, en collaboration avec la Source européenne de rayonnement synchrotron (ESRF) à Grenoble, a caractérisé les constituants des poudres cosmétiques noires contenues dans 49 de ces flacons, datés de 2000 à 1200 avant notre ère.

La microscopie électronique et la diffraction des rayons X révèlent que la couleur noire est due à la présence de galène (sulfure de plomb). La teinte est parfois éclaircie par de la cérusite, carbonate de plomb blanc.

La plupart des produits analysés contiennent aussi en abondance deux chlorures de plomb, la laurionite et la phosgénite. Ces minéraux ont été introduits intentionnellement par les fabricants : le bon état de conservation des poudres exclue une formation par des phénomènes d'altération lors du vieillissement des produits. Par ailleurs, ils ont été synthétisés : leur rareté naturelle aurait empêché les Égyptiens de les inclure dans des cosmétiques pendant plusieurs siècles comme ils l'ont fait. Enfin, la présence de laurionite et de phosgénite n'a certainement pas de motivations esthétiques : ces minéraux sont blancs et ils sont la plupart du temps associés à la cérusite, blanche aussi et beaucoup plus facile à se procurer. Les Égyptiens les ont-ils donc synthétisés pour conférer aux fards des propriétés particulières ?

Cette présomption est renforcée à la lecture de recettes de produits médicaux, décrites par Dioscoride et Pline l'Ancien au I^{er} siècle de notre ère. Ils décrivent, en particulier, comment l'«écume d'argent purifiée» (l'oxyde de plomb) était broyée et mélangée dans de l'eau avec du sel gemme et parfois du natron (des carbonates de sodium principalement), puis filtrée ; la procédure était répétée chaque jour pendant plusieurs semaines. Lorsque nous avons suivi ce mode opératoire et mélangé de l'oxyde de plomb et du chlorure de sodium dans de l'eau, une lente réaction a produit une solution basique que les remplacements quotidiens d'eau ont régulièrement neutralisée. Nous avons ainsi obtenu une très fine poudre de laurionite blanche. En présence de carbonates, on obtient, avec le même procédé, de la phosgénite. La préparation de tels composés par voie aqueuse met en jeu des réactions



C2RM/ID. VIGÉARS-T. BOREL

La poudre noire, visible sur le bord intérieur de ce flacon de quelques centimètres de diamètre en albâtre, du Nouvel-Empire égyptien (environ 1500 avant notre ère), et sur le couvercle, est un cosmétique à base de galène (sulfure de plomb). Il contient aussi des chlorures de plomb, obtenus par synthèse chimique. Sur la radiographie (à gauche), les zones claires correspondent aux composés de plomb, qui absorbent fortement les rayons X. Ces cosmétiques avaient une fonction esthétique, mais ils servaient aussi à protéger l'œil contre des maladies.

chimiques assez simples mais un procédé long et répétitif sans doute élaboré après de nombreux tâtonnements.

Au 1^{er} siècle de notre ère, ces produits servaient à soigner des maladies des yeux. Le médecin romain Celse préconisait ainsi un collyre qui mêlait de la gomme, de la galène, de la céruse et de l'«écume d'argent traitée». Il conseille aussi cette dernière pour des soins de la peau et des cheveux.

Ces vertus thérapeutiques étaient-elles déjà connues en Égypte 2 000 ans auparavant ? Le climat égyptien a été, et est toujours, cause de nombreuses infections oculaires, que le fard pouvait contribuer à prévenir ou à traiter. Des papyrus médicaux indiquent de nombreuses préparations pour soigner les yeux. Ainsi, le papyrus d'Ebers, daté d'environ 1550 avant notre ère, cite des traitements de maladies oculaires à base de galène, et d'autres matières minérales dont nous ne savons pas traduire les noms. Une tombe contemporaine de ce document a toutefois livré trois flacons en roseau, dont l'un portait l'inscription «vrai fard à paupière noir» et les deux autres «collyre à dis-

soudre, bon pour la vue». D'anciennes analyses chimiques ont montré que ces deux derniers contiennent un carbonate et un chlorure de plomb, sans doute la phosgénite.

La cohésion des fards était, comme aujourd'hui, assurée par un support gras, surtout d'origine animale. On distingue trois textures de fard, obtenues par des concentrations plus ou moins grandes de matières grasses. Certains échantillons n'en contiennent que des traces infimes, sans doute introduites involontairement lors de la préparation des produits minéraux. À l'inverse, les cinq à sept pour cent présents dans d'autres échantillons témoignent de la volonté d'ajouter un liant. On trouve enfin des cas intermédiaires, qui contiennent 0,1 à 0,5 pour cent de matières grasses. Ces trois catégories ressemblent étonnamment à celles que l'on trouve aujourd'hui dans les lignes de cosmétiques : les poudres libres, sans ou avec très peu de matières grasses, les fards à paupières et les crayons khôl, les plus gras.

Philippe WALTER, LRMF-CNRS-Culture
René BRENIAX, Société L'Oréal