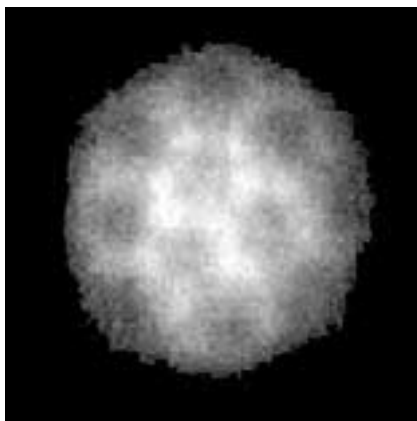
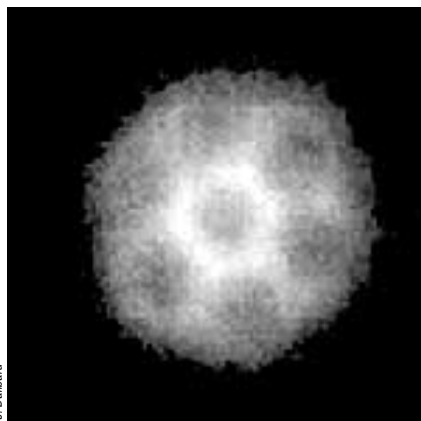
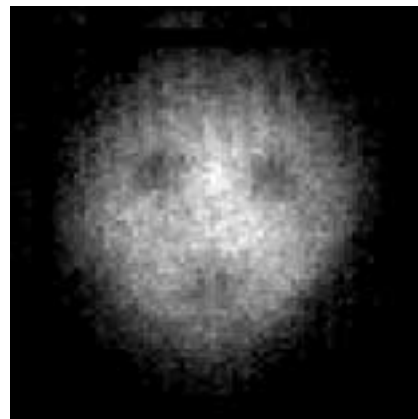
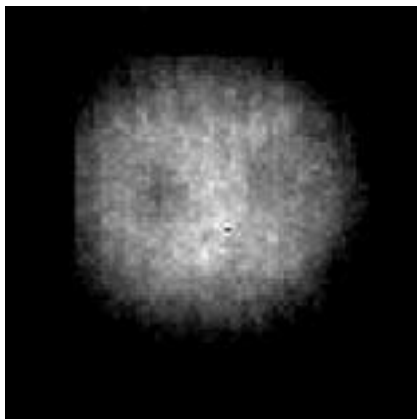
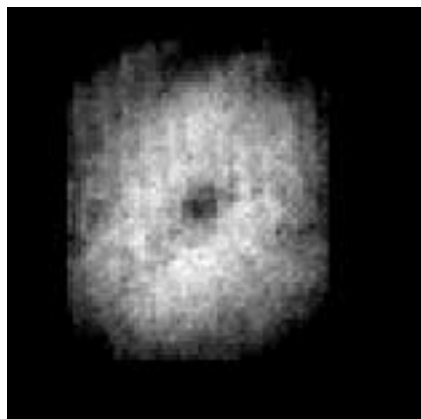




Les trous qui apparaissent dans ces condensats de Bose-Einstein correspondent à des tourbillons. Les atomes sont repoussés loin de l'axe de rotation, comme sous l'effet d'une force centrifuge. Le nombre de tourbillons augmente avec la fréquence de l'agitateur, pour former un réseau ordonné.

l'interaction des lasers et des atomes ralentit ces derniers, ce qui les refroidit. Puis, on comprime ces atomes en les piégeant, au centre du dispositif, avec des champs magnétiques. Un certain nombre d'atomes, trop rapides, sont éjectés du piège magnétique, emportant une énergie qui est alors prélevée aux atomes qui restent piégés : la température de ces derniers est encore abaissée, et la condensation de Bose-Einstein se produit.

Tous les atomes des condensats sont dans le même état d'énergie minimale. En mécanique quantique, les particules sont assimilées à des ondes. Dans un condensat, les atomes ont tous la même fonction d'onde, c'est-à-dire qu'on ne peut pas les distinguer, car ils se comportent comme une même entité.

On a découvert que les condensats sont des superfluides : ils se comportent comme l'hélium liquide à très basse température. Dans un superfluide, un objet qui se déplace lentement n'est pas freiné, et le superfluide ne s'échauffe pas. Quand on met un récipient contenant un superfluide en rotation lente, la surface de celui-ci reste plane, car il n'est pas entraîné par les parois. Au contraire, la surface d'un

liquide classique se creuse en son centre à cause des forces d'adhérence aux parois.

Les physiciens de l'École normale supérieure ont étudié la dynamique des condensats. Ils ont travaillé sur des condensats d'atomes de rubidium, qu'ils ont mis en rotation à l'aide d'un faisceau laser, une sorte d'«agitateur». Ils ont constaté qu'au-dessous d'une fréquence critique de rotation de l'agitateur, rien ne se passe : le condensat reste au repos. En revanche, au-dessus de ce seuil, un tourbillon apparaît au centre du condensat. L'existence de ce seuil est due à la nature quantique des condensats : un gaz classique (ou un liquide classique) serait mis en mouvement quelle que soit la fréquence de l'agitateur.

Les physiciens ont observé ce tourbillon en interrompant les champs magnétiques qui confinent le condensat. Ce dernier se dilate et, au bout de quelques dizaines de millisecondes, le tourbillon a une taille suffisante pour être observé. Les physiciens envoient alors sur le condensat une brève impulsion lumineuse, dont ils mesurent ensuite l'absorption : ils obtiennent ainsi une image du nuage

atomique. Dans le tourbillon, les atomes sont repoussés loin de l'axe de rotation, comme sous l'effet d'une force centrifuge : le tourbillon apparaît ainsi sous la forme d'un trou.

Lorsque les physiciens ont augmenté la fréquence de l'agitateur laser, ils ont observé la formation d'un réseau ordonné de tourbillons de tailles identiques. Le nombre de tourbillons augmente avec la fréquence, jusqu'à onze. Ces tourbillons sont visibles à l'œil nu : leur diamètre est de l'ordre de huit micromètres au moment où on les «photographie». On avait déjà observé des réseaux de tourbillons dans l'hélium liquide, mais, leur diamètre étant inférieur au nanomètre (milliardième de mètre), on ne pouvait pas les observer directement. Pour les visualiser, on envoyait sur l'hélium liquide des électrons, qui étaient canalisés par les tourbillons et déclenchaient un phénomène de luminescence sur un écran au phosphore, grâce auquel ils étaient détectés.

La mise en évidence des tourbillons constitue un pas en avant dans la compréhension et la modélisation des condensats de Bose-Einstein, car on sait désormais qu'ils obéissent aux théories développées pour les superfluides. Les physiciens espèrent mettre au point des jets d'atomes cohérents et intenses issus de condensats de Bose-Einstein, analogues aux lasers, mais constitués d'atomes et non de photons. Ils seraient utilisés pour la nanolithographie atomique. La parfaite collimation de ces atomes cohérents en ferait des outils de déposition très précis. Si l'on sait d'ores et déjà extraire un filet continu d'atomes d'un condensat, on devra encore trouver le moyen de guider ces atomes sur une surface pour y reproduire un motif donné et augmenter le flux d'atomes que peut fournir un condensat (qui ne contient pour l'instant qu'un million d'atomes) : le «laser à atomes» deviendra alors, comme son équivalent lumineux, un outil pratique.

Plastique biodégradable

Les bactéries sont en passe de fournir à l'homme des plastiques biodégradables, des polyhydroxyalcanoates, qu'elles synthétisent naturellement pour constituer des réserves énergétiques lorsque le milieu s'appauvrit. Toutefois, ce comportement n'est qu'un dernier recours, car en grande quantité, ces longues molécules sont agressives et détruisent les bactéries. En régulant la température et les sources de carbone et d'azote, une équipe suisse a réussi à empêcher cette destruction qui interdisait toute exploitation. Les biochimistes font fabriquer aux bactéries quelques centaines de grammes de bioplastiques par bioréacteur et espèrent atteindre bientôt une production de l'ordre du kilogramme.

Mammoth surgelé

Un courageux paléontologue américain, Daniel Fisher a conservé de la viande de cheval pendant plusieurs mois sous la surface d'un lac gelé. Puis il en a mangé quelques bouchées, pour prouver qu'il y a 10 000 ans, les Américains dirigeaient les mammoths vers un lac gelé afin d'y conserver la viande. Ce stockage était attesté par des montagnes d'os au fond des lacs, mais il fallait convaincre les incrédules de la comestibilité de la viande ainsi conservée. D. Fisher a affirmé être prêt à manger de la viande de mammoth de l'époque.



Maladie du sommeil

La mouche tsé-tsé véhicule le trypanosome, le parasite de la maladie du sommeil. Comme beaucoup d'agents pathogènes le trypanosome est un agent caméléon : dès que le système de défense produit des anticorps dirigés contre l'un des antigènes de surface, le parasite se pare de nouveaux antigènes contre lesquels le système immunitaire doit à nouveau apprendre à lutter. Or ces antigènes de surface sont ancrés grâce à des substances dont la synthèse requiert un acide gras : on pensait que le parasite était incapable de le synthétiser et qu'il le prélevait dans son environnement. Or on vient de découvrir que le parasite en assure lui-même la synthèse. Un antibiotique inhibe cette synthèse dépouillant le parasite de sa couverture antigénique qui le protège du système immunitaire qui, dès lors, peut détruire le parasite.

Nucléosynthèse légère

Des échantillons lunaires révèlent des mécanismes de physique nucléaire dans le Soleil.

La plupart des atomes qui nous constituent ont été créés lors de la fusion des noyaux légers dans des étoiles comme le Soleil. D'autres atomes ont été synthétisés lors d'explosions d'étoiles, les supernovae. Certains éléments, parmi les plus légers, ont été créés dans les premières minutes du Big Bang. C'est notamment le cas du lithium 7. Une autre variété du lithium, le lithium 6, qui comprend trois neutrons au lieu de quatre pour le lithium 7, a été créée au cours de l'histoire de l'Univers, lors d'interactions entre les atomes du milieu interstellaire et ceux du rayonnement cosmique de haute énergie, des particules qui se déplacent à grande vitesse dans notre Galaxie.

Ces deux isotopes du lithium sont détruits au sein des étoiles par les réactions nucléaires. En mesurant la quantité de lithium 7 contenue dans des échantillons lunaires par rapport à celle de lithium 6, nous avons montré que, contrairement à toute attente, du lithium 6 est fabriqué dans le Soleil.

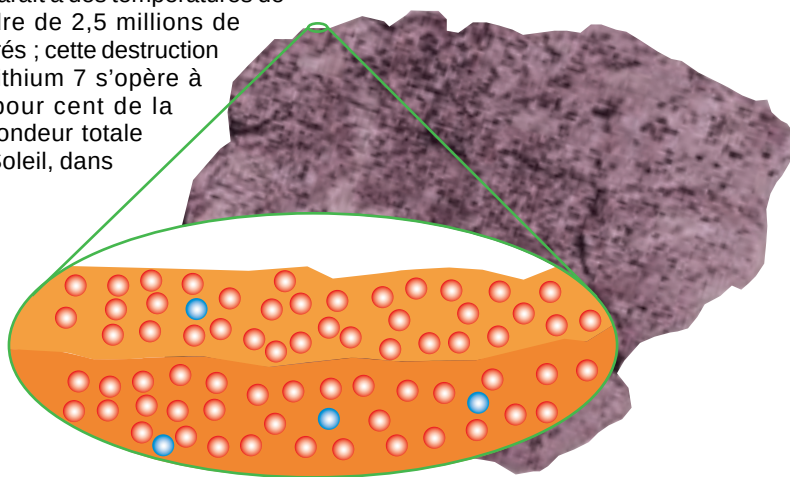
Dans les étoiles, les deux variétés du lithium sont détruites efficacement par des réactions de fusion avec l'hydrogène, mais ces réactions se font à des températures différentes et, donc, à des profondeurs différentes. Dans le Soleil, le lithium 6 est détruit tout près de la surface, à une température de 800 000 degrés, alors que le lithium 7 disparaît à des températures de l'ordre de 2,5 millions de degrés ; cette destruction du lithium 7 s'opère à 30 pour cent de la profondeur totale du Soleil, dans

la zone convective, où de grands mouvements de gaz ramènent du matériau profond du Soleil en surface (et réciproquement).

À partir de ces données, les astrophysiciens avaient avancé deux hypothèses : la première est qu'une grande partie du lithium initialement présent dans le Soleil avait été détruite au cours des 4,5 milliards d'années de son histoire. Cette hypothèse a été vérifiée grâce à l'analyse spectroscopique de la lumière solaire qui révèle la nature des éléments chimiques présents dans l'atmosphère du Soleil : la concentration en lithium à la surface du Soleil est 150 fois inférieure à celle du gaz qui a donné naissance au Soleil.

Seconde hypothèse : le lithium qui a survécu dans le Soleil devrait être presque uniquement du lithium 7, car le lithium 6 est détruit à une température inférieure. Dans toutes les classes de météorites, dans la Terre ou dans la Lune, la proportion de lithium 7 par rapport au lithium 6 est rigoureusement constante, environ un atome de lithium 6 pour 12 de lithium 7. Nous connaissons donc aussi la composition isotopique du Soleil initial. Du fait de la combustion préférentielle du lithium 6, les théoriciens prévoyaient dans le Soleil une quantité de lithium 7 un million de fois supérieure à celle de lithium 6.

Pour vérifier cette hypothèse, il fallait analyser la composition du vent solaire, une émission continue d'atomes en provenance de l'atmosphère du Soleil. Ces particules, dont la composition est voisine de celle du Soleil, voyagent dans le milieu interplanétaire. Pour en trouver une quantité suffisante, il fallait identifier un endroit où ces particules avaient pu s'accumuler



En analysant un échantillon de roche lunaire bombardé par le vent solaire, les physiciens ont trouvé que les premières couches atomiques contenaient un atome de lithium 6 (en bleu) pour 30 atomes de lithium 7 (en rouge), alors qu'on pensait que le lithium 6 avait presque entièrement disparu, brûlé dans le Soleil. Cette mesure indique que du lithium 6 est créé en permanence dans le Soleil.

pendant au moins une centaine de millions d'années.

Dépourvue d'atmosphère, la Lune récolte le vent solaire. Les particules du vent solaire bombardent continuellement notre satellite et s'implantent dans les roches pulvérulentes du sol lunaire, sur quelques nanomètres d'épaisseur (un micromètre au maximum). Jusqu'à aujourd'hui, seuls les éléments volatils, comme les gaz rares, l'azote ou le carbone, ont pu être extraits par chauffage sous vide des échantillons lunaires. Grâce aux nouvelles sondes ioniques, nous avons bombardé les échantillons lunaires sur des surfaces de 100 micromètres carrés et nous en avons analysé les premières couches atomiques.

Ces couches renferment en profondeur du lithium lunaire dont la composition isotopique est semblable à celle de toutes les météorites : un lithium 6 pour douze lithium 7. En revanche, dans les dix premières couches atomiques de la surface des échantillons, le lithium émis est fortement enrichi en lithium 7 par rapport au lithium 6. Ce composant de surface résulte de l'implantation du vent solaire dans le sol lunaire.

Contre toute attente, le rapport entre les deux isotopes ($^7\text{Li}/^6\text{Li}$), n'est pas d'un million, mais d'une trentaine. Le Soleil est donc bien plus riche en lithium 6 que ne le laissaient prévoir les théories classiques. Comme la vitesse de destruction du lithium 6 est établie à l'aide des théories nucléaires corroborées par de nombreuses autres études, nous en concluons qu'il existe une source de lithium 6 dans le Soleil. Le lithium 6 résulterait de collisions à haute énergie entre noyaux de carbone et d'oxygène dans l'atmosphère solaire : ces collisions casseraient ces noyaux en noyaux plus petits.

Ainsi, la vitesse de synthèse du lithium est nécessairement supérieure à celle de sa destruction par le recyclage en profondeur dû à la convection. L'analyse poussée d'autres échantillons lunaires ayant résidé sur notre satellite à des périodes différentes des échantillons déjà étudiés (de tels échantillons ramenés par les missions *Apollo* existent dans les collections de la NASA) précisera la variation des vitesses de production et de recyclage du lithium au cours de l'histoire du Système solaire. À l'instar des éclipses totales de Soleil qui renseignent sur la couronne solaire, les échantillons lunaires nous informent sur la physique nucléaire à l'intérieur du Soleil.

Marc CHAUSSIDON,
CRPG-CNRS, Nancy,
François ROBERT, MNHN, Paris

Détection gamma sensible

Une caméra sensible au rayonnement gamma traquera les supernovae enfouies.

Comment voir les supernovae malgré la matière qu'elles éjectent ou les trous noirs cachés par la poussière ? En les observant dans le domaine du rayonnement gamma, car ce rayonnement électromagnétique de très haute énergie traverse les milieux les plus denses. Pour le détecter, les astronomes lanceront, début 2002, l'observatoire spatial INTEGRAL, sensible aux photons de haute énergie. À bord de cet observatoire, les ingénieurs placeront le télescope gamma IBIS, muni d'un détecteur d'une sensibilité inégalée.

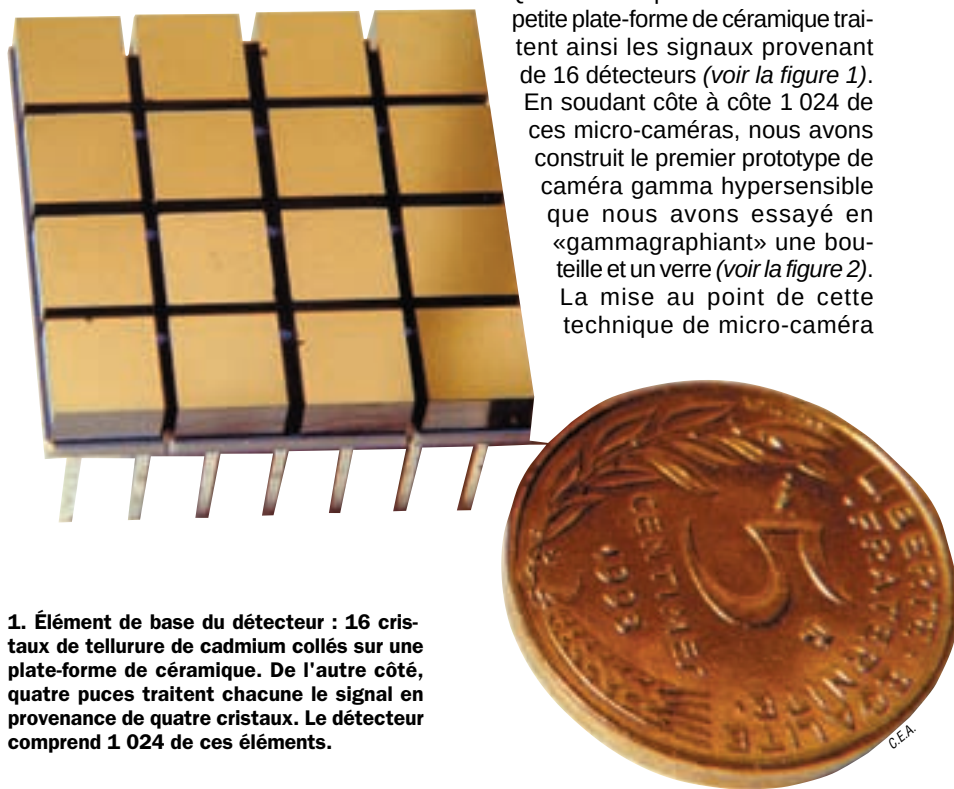
Le télescope IBIS est le descendant direct du télescope spatial français SIGMA qui, au début des années 1990, a fourni les premières images du ciel dans le domaine gamma. Ces télescopes fonctionnent sur le principe du masque codé : au sommet du télescope, un masque laisse passer la lumière en des endroits judicieusement choisis. Lorsque les photons entrent dans le télescope, ils éclairent le détecteur, situé au fond, selon un motif qui dépend du masque et de la position de la source qui l'éclaire. La résolu-

tion angulaire dépend du pas du masque, c'est-à-dire de la taille des plus petits motifs qui y sont dessinés. Sur SIGMA, le détecteur était une caméra gamma à scintigraphie inspirée de celles qui sont utilisées dans les hôpitaux. Sa résolution et sa sensibilité étaient médiocres.

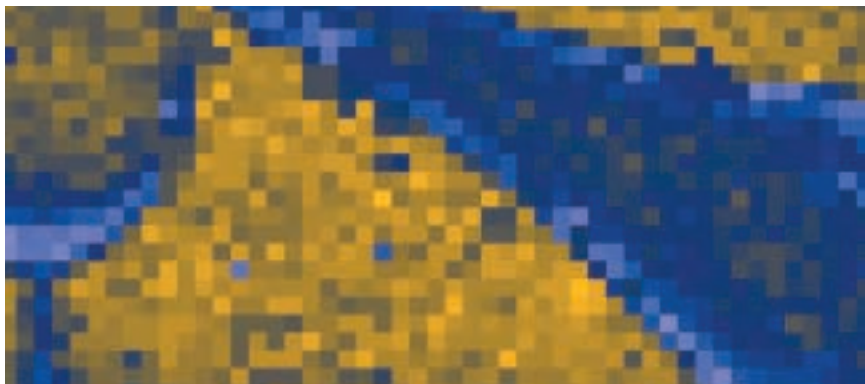
Pour l'améliorer, les ingénieurs ont fait appel à une technique différente. Le détecteur n'est plus constitué d'une mosaïque de photomultiplicateurs qui collecte la lumière d'un gros cristal scintillant, mais d'une mosaïque de 16 384 pixels formés chacun d'un petit cristal semiconducteur de tellure de cadmium. Ces détecteurs autorisent une mesure bien plus précise de l'énergie des photons détectés. Dix fois plus légère que SIGMA, cette caméra a un bruit de fond bien inférieur et sa surface de détection est quatre fois supérieure. Grâce à cette technique, le télescope IBIS effectuera en cinq ans un travail de détection qui aurait demandé cinq siècles d'observation à SIGMA.

La réalisation de ce détecteur révolutionnaire tient à plusieurs facteurs. D'abord, les progrès en cristallogénèse ont permis la fabrication de cristaux de tellure de cadmium suffisamment purs pour une détection efficace des photons gamma (les impuretés perturbent la mesure de l'énergie). Ensuite, il a fallu mettre au point un circuit intégré capable de traiter les signaux qui arrivent sur chacun des détecteurs élémentaires. Au CEA, nous avons conçu une telle puce, résistant aux radiations spatiales, qui traite les signaux issus de quatre détecteurs.

Quatre de ces puces collées sur une petite plate-forme de céramique traitent ainsi les signaux provenant de 16 détecteurs (voir la figure 1). En soudant côte à côte 1 024 de ces micro-caméras, nous avons construit le premier prototype de caméra gamma hypersensible que nous avons essayé en « gammagraphiant » une bouteille et un verre (voir la figure 2). La mise au point de cette technique de micro-caméra



1. Élément de base du détecteur : 16 cristaux de tellure de cadmium collés sur une plate-forme de céramique. De l'autre côté, quatre puces traitent chacune le signal en provenance de quatre cristaux. Le détecteur comprend 1 024 de ces éléments.



2. Radiographie gamma d'une bouteille et d'un verre. Comme dans une radiographie classique, l'objet radiographié est placé entre le détecteur et une source de rayonnement, ici une source gamma de cobalt 57. En absorbant le rayonnement de la source, ces deux objets apparaissent en négatif sur l'image.

permet d'entrevoir la fabrication de télescopes gamma beaucoup plus petits, adaptés aux micro-satellites, dont le développement est en plein essor.

Au carrefour des progrès en cristallographie et en microélectronique, cette caméra ne servira pas uniquement à traquer les sources gamma cosmiques : dans un avenir proche, les micro-caméras gamma seront utilisées pour l'analyse de la fluorescence *in situ* du sol martien, à la recherche de traces d'éléments lourds. À plus long terme, ce type de caméra pourra être utilisée à l'hôpital pour des gammagraphies plus contrastées avec une irradiation réduite du patient.

François LEBRUN,
Service d'astrophysique, CEA, Saclay

L'art du mélange

Une technique de coloration révèle les tours de main des peintres de la Renaissance.

Les tableaux anciens sont constitués pour une large part de composés organiques *a priori* fragiles. Pourtant ils ont traversé les siècles grâce à la remarquable mise en œuvre de leurs matériaux, leur «formulation». Quels secrets des peintres assuraient-ils une si bonne conservation des œuvres? Nous avons examiné cette question à l'aide d'une technique de coloration des protéines présentes dans les couches picturales.

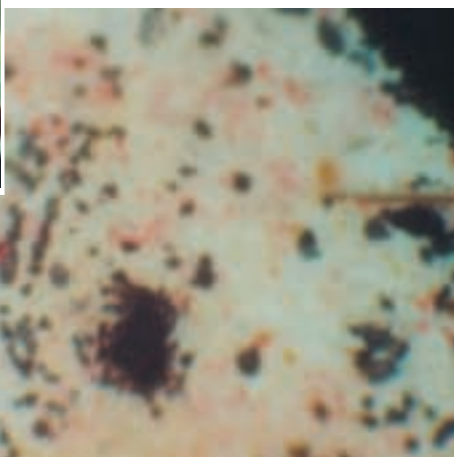
Les peintures de la Renaissance sont constituées d'une superposition de couches très minces (d'épaisseur comprise entre 10 et 50 micromètres), composées de pigments, de charges et de

liants. Ces couches sont déposées sur un support (bois ou toile) revêtu d'une couche de préparation et protégées par un vernis. L'étude des manuscrits et livres techniques anciens, tel *Il Libro del Arte* de Cennino Cennini (fin du XIV^e siècle), donne une idée des liants employés, éléments essentiels des peintures puisqu'ils assurent la cohésion des diverses couches. Jusqu'à la Renaissance, les liants étaient majoritairement constitués de protéines extraites de peaux, tendons et os («colle de peau»), du lait caillé (caséine) ou de l'œuf (jaune seul ou œuf entier). Puis, lorsque la peinture à l'huile se généralisa, le liant devint une huile siccative, c'est-à-dire polymérisable en présence de l'oxygène de l'air (huile de lin, d'œillette, de noix).

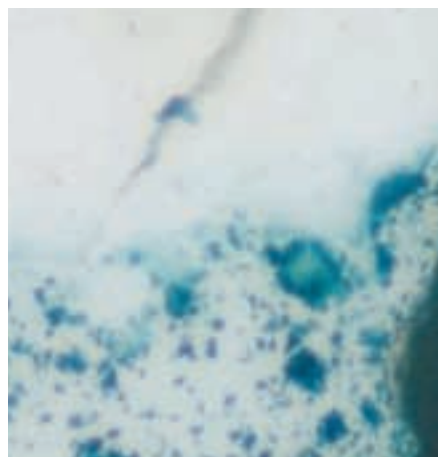
Quelle est la composition des liants utilisés? Quelles en sont les caractéristiques dans les divers courants artistiques? Quels sont les tours de main propres à chaque artiste? Comment

restaurer les œuvres si besoin est sans risquer de provoquer des altérations ultérieures?

Le Centre de recherche et de restauration des Musées de France, au Musée du Louvre, a mis au point une technique de coloration, dérivée des méthodes histochimiques, afin de caractériser les protéines des couches picturales dans des coupes stratigraphiques (40 à 80 micromètres d'épaisseur) ou dans des écailles de petites dimensions (100 à 500 micromètres). Parmi les colorants classiques des protéines, seule l'utilisation de «Noir Amido» ou «Naphтол Blue Black» à trois pH différents permet de différencier des couches picturales peintes à l'œuf de celles qui sont étendues à la colle : selon le pH (qui mesure l'acidité), des protéines différentes réagissent avec le colorant (l'œuf se colore à pH égal à 2, la gélatine à pH 7, et l'ensemble des protéines à pH 3,6). Ainsi nous avons découvert que les



Écaille issue du tableau *La Diseuse de Bonne Aventure* du Caravage, après coloration : les amas de protéines apparaissent en bleu, le pigment rouge est le vermillon (grossissement : $\times 100$)



Écaille issue du tableau *Les pèlerins d'Emmaüs* de Le Nain, après coloration. La partie supérieure de l'écaille est recouverte d'un vernis qui inhibe l'action du colorant ($\times 100$).