

en est aussi rempli et le lendemain, ces larves ont quitté le cadavre et se sont enfouies dans le sol. Il ne reste que le squelette et des lambeaux de peau qui disparaîtront en quelques mois.

La connaissance du cycle de ponte dans un habitat naturel permet d'adapter les cycles théoriques : aujourd'hui on date la mort avec une précision de deux jours, si la mort remonte à moins de six mois, et de une semaine, si la mort est antérieure. Outre son apport technique, cette expérience enseigne aux enquêteurs à rechercher des asticots autour du cadavre alors même que celui-ci en est exempt : ces précieux indices pour l'enquêteur ont pu en effet s'enfoncer dans le sol à l'entour.

Le prix immérité

Le problème à n -corps est résolu, mais trop tard.

En 1885 trois géants des mathématiques, Karl Weierstrass, Charles Hermite et Gösta Mittag-Leffler établirent une liste des problèmes mathématiques qui leur semblaient importants. Celui qui en résoudrait un seul recevrait 2 500 couronnes d'or à l'occasion du soixantième anni-

versaire du Roi de Suède, en 1889. Parmi ces problèmes, figurait le problème à n -corps : étant donné les positions et les vitesses initiales de n objets qui s'attirent selon la loi de la gravitation, par exemple les planètes du Système solaire, il fallait prédire leurs positions et leurs vitesses après un temps quelconque.

Après plus d'un siècle de recherches, le problème formulé par Weierstrass a été résolu par Wang Qiu-Dong en 1991. Personne ne s'en aperçut avant que Florin Diacu de l'Université de Colombie Britannique ne proclame sa pertinence dans le *Mathematical Intelligencer*.

Weierstrass était convaincu qu'il n'existait pas de solution analytique. Une solution analytique est une formule ne contenant qu'un nombre fini de termes, comme l'équation de l'ellipse, la solution du problème à deux corps (le mouvement de la Terre autour du Soleil). Weierstrass demandait aux concurrents non pas une telle formule, mais un série unique comportant un nombre infini de termes, et dont la somme donnerait la réponse avec autant de précision qu'on le désirait. Il fallait que la série solution converge pour toutes les valeurs du temps. Ainsi, la série $1 - a^2 + a^4 - a^6 + \dots$ converge si et seulement si a est compris entre -1 et $+1$.

Les collisions étaient une difficulté majeure. Si deux particules entrent en collision, alors les trajectoires indépen-

dantes n'existent plus et ces événements singuliers faisaient obstacle à la convergence des séries. Wang introduisit une dilatation temporelle, qui fait que le temps s'écoule plus vite à mesure que deux objets se rapprochent, et ainsi les collisions ne se produisent qu'après un temps infini. Ayant repoussé le problème jusque dans l'éternité, la série de Wang converge toujours.

Malheureusement la solution est de peu d'intérêt pratique car il faut additionner un nombre énorme de termes pour avoir une solution très approximative. Et Wang ne gagnera pas le prix : il a été décerné à Henri Poincaré qui avait montré qu'il ne pouvait exister de solutions pour des temps infinis.

L'article de Poincaré était brillant et allait mettre «sur orbite» ce que l'on désigne aujourd'hui par la théorie du chaos. Toutefois Poincaré n'était pas tatillon, et son article était truffé d'erreurs. À tel point qu'il dut être retiré de la vente par Mittag-Leffler et réimprimé, aux frais de Poincaré...

Il n'empêche : pour ce fait d'armes, Poincaré obtint injustement un prix qu'il méritait certainement mille fois pour sa vision de l'imprévisibilité du problème à n corps. Car outre le problème posé par les collisions, il subsiste la sensibilité aux conditions initiales découverte par Poincaré, sensibilité qui impose une précision initiale infinie si l'on veut prédire les mouvements des planètes à l'infini.

Christoph PÖPPE



Laure Graudon/Art Resource

Les mouvements des planètes, représentés ici sur une peinture de tapisserie du XVIII^e siècle, est le plus fameux exemple du problème à n -corps.



Collection Viollet

Henri Poincaré (1854-1912) a gagné le prix du roi de Suède en 1889 sur la base de son mémoire sur le problème à n corps. Une de ses affirmations n'a été infirmée qu'après un siècle.

L'invention retrouvée de la photographie

JEAN-LOUIS MARIGNIER • MICHEL ELLENBERGER

La reconstitution expérimentale des procédés de Niépce fondée sur l'interprétation de ses lettres dévoile le génie «édisonien» de l'inventeur de la photographie.

Nicéphore Niépce (1765-1833) a inventé le premier procédé photographique : il a ainsi exaucé le vieux rêve humain de fixer pour l'éternité un moment de vie. Ses recherches, commencées en 1816, ont duré plus d'une décennie, et les principaux résultats en sont consignés dans sa *Notice sur l'héliographie* de 1829.

Si les historiens de la photographie rendent généralement justice à cet inventeur de génie, ils situent mal son apport original et mésestiment les difficultés qu'il a affrontées, puisqu'ils ont analysé son œuvre sur la base des connaissances actuelles, évidemment inconnues du père fondateur. Niépce a utilisé de façon personnelle des concepts scientifiques et techniques de son époque et il les a énoncés dans un langage qu'il faut savoir déchiffrer.

En effet, la compréhension de ces documents, leur interprétation en termes actuels pour en situer le mérite et les enjeux sont les premières tâches de l'historien des sciences. Dans le cas de Niépce, l'analyse des textes est loin d'être suffisante. Il faut l'accompagner sur les diverses voies de son cheminement expérimental pour saisir le sens de telle expérience particulière, ou ce qui a motivé l'adoption ou le rejet de telle autre opération. C'est ce qu'a fait l'un de nous (J.-L. Marignier).

C'est en analysant les documents originaux que les expériences de Niépce ont été reconstituées. Ainsi

s'éclairent les observations de Niépce, ainsi sont comblées les lacunes de ses écrits, puisqu'il ne précisait pas certains phénomènes qui lui semblaient aller de soi. Cette démarche, la reconstitution expérimentale historique, permet de comprendre le principe, les mécanismes et performances du procédé, et d'éliminer les contresens faits par les historiens de la photographie (qui ne sont pas chimistes). Depuis 160

ans, cette reconstitution originale d'expériences historiques n'avait pas été faite dans sa totalité. Maintenant, il nous est possible de suivre les pas de Niépce pour saisir «l'instant de genèse» de la photographie.

La correspondance de Niépce, une source codée

En 1816, Nicéphore Niépce a cinquante et un ans. Il partage son temps entre sa maison de Chalon-sur-Saône et sa propriété, proche, de Saint-Loup-de-Varennnes, où il a installé son laboratoire. L'abondante correspondance qu'il entretient avec son frère Claude, son aîné de deux ans, qui habite à Londres, donne, au jour le jour, un reflet détaillé de ses activités ; il assure la difficile gestion du domaine familial et poursuit avec passion et persévérance ses recherches.

Il décrit à sa manière ses expériences, ses tâtonnements et les conclusions qu'il en tire. Une fois déchiffrée et placée dans son contexte, cette correspondance a valeur de cahiers de laboratoire. Écrite dans une prose claire et imagée, elle montre un vif sentiment de la nature. Nicéphore Niépce s'y révèle un inventeur curieux, alliant la vivacité d'esprit des Lumières à la sensibilité du premier romantisme.

Lorsque débute, en 1816, les recherches de Nicéphore qui le mèneront à l'héliographie, les deux frères ont déjà une carrière d'inventeurs derrière eux. Ils ont mis au point le



1. NICÉPHORE NIÉPCE (1765-1833) est un inventeur prolifique : il met au point le premier moteur à explosion en 1807 et se consacre, à partir de 1816, à la photographie.

premier moteur à combustion interne, le *pyréolophore* (1807), ils se sont intéressés à la propulsion des bateaux, au pompage des eaux, à l'extraction de l'indigo, aux «végétaux nourissants». Ouverts à l'air du temps malgré leur éloignement de la capitale, ils participent activement à l'avènement du monde industriel.

L'idée qui guide les recherches de Nicéphore Niépce, telle qu'il la présentera dans sa *Notice* de 1829, est de «reproduire spontanément, par l'action de la lumière, avec les dégradations de teintes du noir au blanc, les images reçues dans la chambre obscure». Projet ancien, puisqu'il rappellera à son frère (lettre du 16 septembre 1824) qu'ils ont travaillé ensemble à cette découverte lors de leur séjour à Cagliari, en Sardaigne (1797). L'idée de conserver par des moyens chimiques l'image qui se forme dans la chambre obscure avait certes déjà été avancée en 1802 par Thomas Wedgwood (1771-1805), mais il n'y a aucune raison de supposer que les frères Niépce aient connu les tentatives de ce chercheur mort prématurément.

Le mois de mai 1816 apporte de grandes satisfactions à l'inventeur. Une couche d'un composé photosensible dont, d'après les textes ultérieurs, nous avons tout lieu de penser qu'il s'agissait de «muriate d'argent» (chlorure d'argent) qui noirci à la lumière, est étalée sur une feuille de papier. Celle-ci est placée au fond de la chambre obscure. L'objectif ayant été changé à la suite d'un incident, la focale utilisée (comme nous dirions aujourd'hui) est plus courte. L'incident est fécond. Niépce constate que l'image de la vue de sa fenêtre qui «se peint» sur le papier



Harry Ransom Center

2. VUE DE LA FENÊTRE à Saint-Loup-de-Varennes. Cette photographie, réalisée par Niépce en 1827, est la seule qui soit parvenue jusqu'à nous. C'est une image négative au bitume de Judée, sous-exposée, sur de l'étain blanc réfléchissant. Le vernis qui reste aux endroits illuminés a été attaqué par le solvant du fait de la sous-exposition et est devenu mat. Dans un endroit sombre et sous éclairage oblique, l'étain reflète de l'ombre (parties noires), alors que le vernis, qui diffuse la lumière, apparaît clair (parties blanches) : l'image semble être un positif. Le fait que les deux murs opposés à droite et à gauche soient éclairés simultanément témoigne de la longueur du temps de pose (au moins une journée). Cette photographie de l'image obtenue par Niépce a été réalisée sous éclairage rasant en 1952. Au tirage, le contraste a été augmenté artificiellement, puis la photographie a été retouchée. Le résultat est assez éloigné de la plaque de Niépce.

est plus lumineuse et plus nette que prévu, mais, sur la couche sensible, l'ordre des teintes est inversé.

«Le fond du tableau est noir, et les objets sont blancs, c'est-à-dire plus clairs que le fond.» Néanmoins, affirme Niépce, «la possibilité de peindre de cette manière me paraît à peu près démontrée» (lettre du 5 mai 1816). Nicéphore a réalisé ce jour-là le premier négatif photogra-

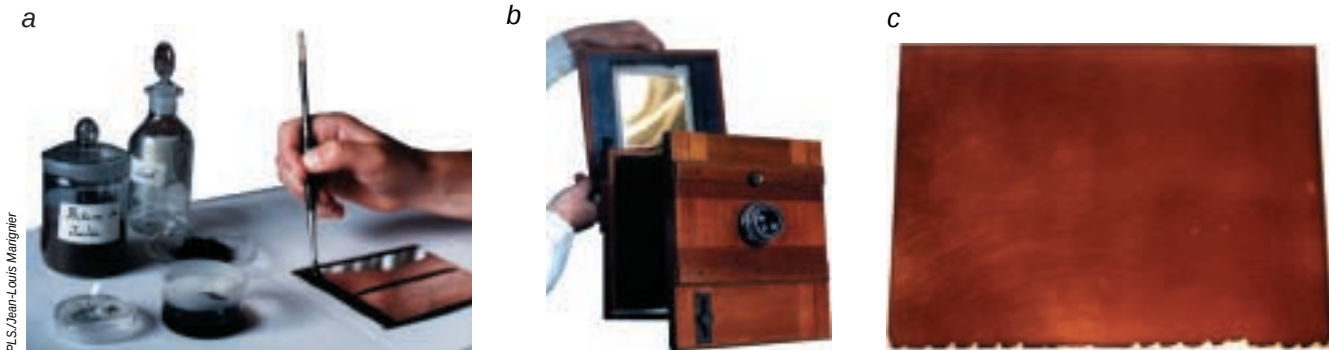
phique sur papier de l'histoire. Mais celui-ci n'est pas fixé, il continue à noircir quand on le regarde à la lumière.

Niépce multiplie les expériences, construit de nouvelles chambres obscures dont il garnit les objectifs de «disques de carton percé» (diaphragmes) pour gagner en netteté (la profondeur de champ augmente quand la taille du diaphragme diminue).



P.L.S./Jean-Louis Margnier

3. HÉLIOGRAPHIE au bitume de Judée sur étain réalisée de la même façon que la plaque de Niépce de la figure 2. En vue normale, l'étain reflète la lumière et l'image apparaît négative (a). En éclairage oblique dans un endroit sombre, l'image apparaît en positif (b).



P.L.S./Jean-Louis Margnèr

3. PROCÉDÉ PHOTOGRAPHIQUE DE NIÉPCE. Le bitume est broyé en poudre et dissous dans de l'essence de lavande. La solution brune est étendue sur une plaque de cuivre recouverte d'argent (a), puis séchée à chaud. Après séchage, il reste sur la plaque d'argent une couche de vernis au bitume, très fine, brillante et de couleur vermeil. Cette pellicule de vernis est photosensible, sa solubilité diminuant avec l'exposition à la lumière. La plaque est exposée au fond

de la chambre obscure(b). Avec un objectif ayant une luminosité identique à celle de la lentille qu'utilisait Niépce, le temps de pose est de 3 à 4 jours pour un paysage en plein soleil. Après exposition à la lumière, aucune trace de l'image projetée n'est visible sur la plaque (c). Elle est alors immergée dans un bain d'essence de lavande diluée qui dissout les parties n'ayant pas, ou peu, reçu de lumière. Le bitume des parties illuminées est devenu insoluble dans l'essence de lavande

Il envoie à son frère de nouvelles épreuves (le mot est resté) de différents formats. Et il définit un triple programme : «1° de donner plus de netteté à la représentation des objets ; 2° de transposer les couleurs ; 3° et enfin de les fixer, ce qui ne sera pas le plus aisé ; mais [...] nous ne manquons pas de patience, et avec la patience on vient à bout de tout.» (Lettre du 19 mai 1816.) En langage actuel : améliorer l'optique ; inverser l'image négative en image positive (Niépce utilise les mots *teinte* et *couleur* pour *valeur*) ; fixer (autre terme qui s'est imposé) l'image. Ce dernier point est le plus important, puisque l'image obtenue continue de noircir quand on la regarde à la lumière.

Niépce tente déjà d'obtenir des images positives à partir d'une seule épreuve négative : «En mettant dans la boîte optique une épreuve bien marquée sur un papier [...] recouvert de la substance que j'emploie, l'image viendrait se peindre sur ce papier avec ses couleurs naturelles, puisque les parties noires de l'épreuve, étant plus opaques, intercepteraient plus ou moins le passage des rayons lumineux.» (Lettre du 16 juin 1816.) Cette expérience, proche de ce que nous appelons le tirage-contact, échoue.

Puis l'inventeur recherche des composés qui se décolorent à la lumière au lieu de noircir. Toutefois, le problème le plus difficile reste celui du fixage, c'est-à-dire de l'élimination du produit initial qui n'a pas été transformé par la lumière.

Empiriquement, il dresse un inventaire des corps sensibles à la lumière, condition préliminaire à l'avènement d'une nouvelle science, la photochimie. Il cherche aussi à conjuguer l'ac-

tion du «fluide lumineux» sur les composés sensibles et celle des acides sur la plaque de cuivre du graveur. Il pense à étendre un acide sur une plaque de métal et l'exposer à la lumière ; Niépce espère que la puissance de l'acide dépendrait de l'intensité de la lumière et que cet acide graverait plus ou moins le métal suivant les nuances de l'image projetée. Hélas, l'action d'aucun acide connu ne dépend de la lumière.

La notion d'image latente

D'essais en essais, Niépce affine son grand projet. Il ne lui paraît plus nécessaire que l'action de la lumière détermine sur le composé un changement visible à l'œil ; une seconde réaction pourrait faire apparaître l'image.

À la recherche de la substance photosensible, Niépce lit les traités de chimie, les dictionnaires, les encyclopédies. Il y apprend que la solubilité dans l'alcool de la résine extraite d'un arbre de Saint-Domingue, le gaïac, varie en fonction de l'exposition à la lumière. Il y aurait là, pour la première fois, un moyen chimique de distinguer la substance transformée par la lumière de celle qui ne l'est pas, et donc de fixer l'image. Les essais faits par Niépce à la lumière du soleil sont concluants, mais ne se reproduisent pas après exposition en chambre obscure. Aujourd'hui, nous en comprenons la raison : seuls les rayons ultraviolets transforment la résine de gaïac, et ils étaient filtrés par le verre ordinaire de la lentille qui équipait la chambre noire. Toutefois, ce premier essai décevant avec un corps organique (en langage actuel) met l'inventeur sur la voie du bitume

de Judée, ou asphalte. On en extrayait notamment de la mine du Parc, à Seyssel, à une centaine de kilomètres de Châlon-sur-Saône.

Le bitume de Judée, couche photosensible

Pour refaire l'expérience de Niépce, il faut broyer le bitume de Judée et le dissoudre dans de l'essence de lavande. La solution visqueuse est étalée sur une plaque de métal (dans le procédé le plus avancé, en 1828, une plaque de cuivre recouverte d'argent), séchée, et le tout est placé dans la chambre obscure. Après exposition, aucune image n'est visible.

La plaque est alors plongée dans un bain d'essence de lavande diluée qui dissout les seules parties qui n'ont pas, ou peu, reçu de lumière. C'est l'étape que nous appelons le *dépouillement*. L'image est rincée à l'eau et séchée. Sur les plages de lumière de l'image, le bitume résiduel reste brun ; à la place des ombres apparaît le métal brillant. Regardée en incidence normale, l'image est donc un négatif.

À partir de 1822, les expériences donnent des résultats prometteurs. Nicéphore Niépce obtient une image négative permanente, une *héliographie* ; il reste à en tirer une image positive.

Désormais, ses recherches s'orientent dans trois directions.

1. *Faire apparaître l'image positive par un simple effet d'éclairage.* Le traitement lui aura probablement été révélé lors de l'obtention d'images sous-exposées. Dans les parties de l'image correspondant aux zones d'ombre du sujet, on voit apparaître



et subsiste ; les zones illuminées demeurent sur la plaque (d). C'est un négatif. Pour obtenir un positif, l'image négative au bitume (de la maison de Niépce à Saint-Loup-de-Varennes) est placée dans une boîte (e) où sont disposés des cristaux d'iode qui s'évaporent spontanément. Les vapeurs d'iode traversent l'image au bitume et attaquent l'argent en surface : il se forme des dépôts d'iodure d'argent d'autant plus importants que le vernis est fin. À la lumière, l'iodure

d'argent se transforme en microparticules d'argent. À l'endroit des parties claires du négatif au bitume, la plaque d'argent devient noire, tandis que, dans les parties sombres, la plaque protégée par la couche épaisse de bitume demeure brillante. Après avoir éliminé le vernis avec de l'alcool, l'image positive apparaît sur la plaque d'argent (f). Les héliographies ainsi obtenues sont de grande qualité : on peut séparer 102 paires de traits par millimètre.

le métal poli. Par ailleurs, du fait de la sous-exposition, le vernis qui reste sur la plaque, dans les zones de lumière, est insuffisamment réticulé. Il est alors partiellement attaqué dans le bain d'essence de lavande diluée et devient mat. Sous un éclairage oblique, alors que les parties polies reflètent de l'ombre et sont peu lumineuses, le vernis mat paraît clair et l'image devient positive. Ainsi regardons-nous les daguerréotypes.

Niépce, qui avait déjà observé ce phénomène dès 1824, ne s'y intéressera qu'en 1827, pour l'abandonner un an plus tard. La célèbre héliographie *Point de vue du Gras* (1827 plutôt que 1826), la plus ancienne photo au monde, qui est conservée sous atmosphère d'hélium au *Harry Ransom Center* d'Austin (Texas), est de ce type. L'un de nous (J.-L. Marignier) a pu l'examiner hors de sa vitrine dans les conditions d'éclairage appropriées, constater les nuances que ne rendent pas les reproductions et en expliquer la genèse.

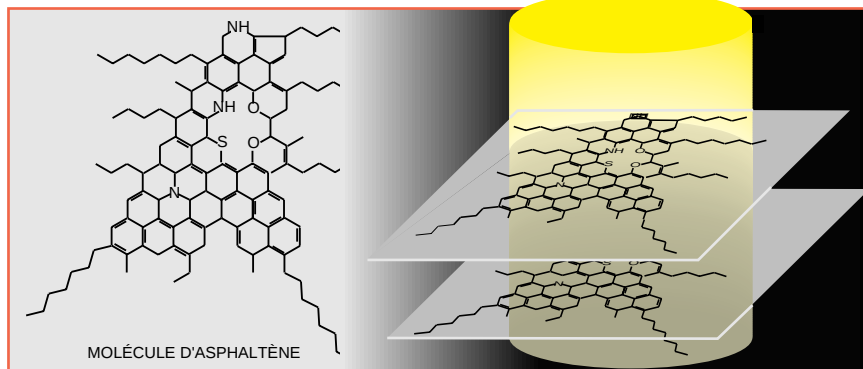
2. *Transformer la plaque héliographique en gravure à l'eau-forte.* La plaque est plongée dans un bain d'acide qui attaque et creuse les plages métalliques non protégées par le vernis. Les ombres sont ainsi gravées dans le métal, et le vernis peut être enlevé. La plaque (en cuivre ou en étain) est encrée, puis essuyée et recouverte d'une feuille de papier humide. Sous la presse, le papier va chercher l'encre au fond des plages gravées, les surfaces non attaquées restant blanches. Il en sort une image positive qui peut être tirée à un petit nombre d'exemplaires. Niépce travaille dans cette

voie à partir de 1824. L'inconvénient de la gravure à l'acide est de manquer de nuances ; elle ne convient qu'à la reproduction de dessins au trait ou de gravures dont les dégradés sont produits par des hachures. Niépce n'utilisera cette méthode que pour reproduire des gravures. Il en reste aujourd'hui quelque neuf exemplaires dans des musées de France et de Grande-Bretagne. Ce procédé a donné naissance à la *photogravure*, dont Niépce est incontestablement l'inventeur. Le bitume de Judée a d'ailleurs été utilisé à cette fin pendant des décennies. Ce même principe sert aujourd'hui, en microlithographie, à fabriquer les microcircuits électroniques.

3. *Inverser l'image négative par action chimique.* Le principe est le suivant : noircir sur le négatif au bitume les plages métalliques brillantes (les ombres du sujet, car c'est un négatif),

puis déverner les autres plages sombres (les parties illuminées du sujet) pour laisser apparaître les différentes nuances des clairs. Niépce y travaille à partir de 1828. Il utilise des plaques en métal argenté poli, puis soumet le négatif à l'action des vapeurs corrosives d'iode. Là où le métal est à nu, il se forme rapidement une fine couche d'iodure d'argent. À la lumière, l'iodure se transforme en particules microscopiques d'argent métallique qui apparaissent noires à l'œil. Après élimination à l'alcool du vernis résiduel, l'image est un positif.

Lors de la reproduction de ce procédé, on ne peut qu'être émerveillé par la qualité et la finesse de l'image, comparable à celle des meilleures photographies actuelles. En effet, l'iode gazeux, en plus de son action sur le métal nu, diffuse à travers le vernis (ce que ne fait pas l'acide) en un temps proportionnel à son épaisseur. Le



4. *LE BITUME DE JUDÉE, la couche photosensible utilisée par Niépce, est étendue sur une plaque de métal argenté. La couche est un asphalte constitué, à l'échelle atomique, de feuillets parallèles. Sous l'effet de la lumière, des liaisons locales se créent entre les feuillets de l'empilement. Après exposition, les parties illuminées sont moins solubles dans l'essence de lavande ; elles subsistent après dissolution des parties solubles et apparaissent en brun sur la plaque métallique.*

L'analyse expérimentale des travaux de Niépce

En 1989, j'entrepris des recherches sur le premier procédé photographique inventé par Nicéphore Niépce après avoir constaté que personne n'avait refait des héliographies et qu'aucune de celles faites par Niépce n'avait survécu. Seule l'épreuve de la figure 2 subsiste, mais cette ébauche dégradée par le temps n'est pas la forme finale de l'invention.

En étudiant le procédé de Niépce au bitume de Judée, je me heurtai à des contradictions. Les livres d'histoire de la photographie qui décrivaient le procédé étaient unanimes : selon ces auteurs, le bitume de Judée, qui est brun, blanchissait à la lumière, ce qui permettait d'obtenir directement un positif. Pourtant Niépce écrivait à propos de la plaque recouverte du vernis brun : *«Après avoir été exposée assez de temps [à la lumière] pour que l'effet ait eu lieu, rien n'indique qu'il existe réellement ; car l'empreinte reste inaperçue.»* Cela signifiait-il qu'une fois séché sur la plaque, le bitume était devenu entièrement blanc ? Une lecture attentive de la correspondance ne permettant pas de trancher, je décidai de refaire l'expérience.

Les premiers essais furent effectués avec du bitume commercial. Il fallut déterminer quelle quantité de bitume devait être dissous dans l'essence de lavande. À la première lecture, la description donnée par Niépce paraît simple : *«Je remplis à moitié un verre de ce bitume pulvérisé. Je verse dessus, goutte à goutte, de l'huile essentielle de lavande jusqu'à ce que le bitume n'en absorbe plus et qu'il en soit seulement bien pénétré. J'ajoute ensuite assez de cette huile essentielle pour qu'elle surnage, de trois lignes environ, au-dessus du mélange qu'il faut couvrir et abandonner à une douce chaleur, jusqu'à ce que l'essence ajoutée soit saturée de la matière colorante du bitume. Si ce vernis n'a pas le degré de consistance nécessaire, on le laisse évaporer, à l'air libre, dans une capsule.»* Trois lignes correspondent à un peu moins de sept millimètres. Le bitume se dissout très lentement dans l'essence de lavande et il faut une journée pour que l'essence devienne brune. Au fil des jours, elle devient de plus en plus épaisse. À quel moment avait-elle la consistance nécessaire ? Comment devait-on étaler le vernis au tampon ?

Niépce indique, dans un écrit ultérieur, qu'il étale ses vernis au pinceau. C'est ce que je fis. Une fois la plaque enduite, Niépce explique : *«On place ensuite la*

planche sur un fer chaud [...] et, lorsque le vernis ne poisse plus, on retire la planche pour la laisser refroidir et finir de sécher à une température douce.» Les premières expériences montrèrent que le mauvais choix d'un seul paramètre (temps de dissolution, quantité étalée, température de séchage, temps de chauffage) entraînait l'échec. Après de multiples essais, je définissais la préparation comme suit : trois grammes de bitume dissous dans 15 millilitres d'essence de lavande, utilisation de cette solution après quatre ou cinq jours, séchage à 90 °C pendant 20 minutes. L'étalement restait alors le seul paramètre sur lequel on pouvait agir : après avoir acquis le coup de main, les expériences furent reproductibles.

L'héliographie retrouvée

Afin de me rapprocher davantage des travaux de Niépce, je me rendis sur le site des mines de bitume de l'Ain, où Niépce s'était approvisionné. Bien que non exploitées depuis longtemps, je localisai ces mines grâce aux renseignements des anciens de la région, et je prélevai quelques kilogrammes de calcaire imprégné de bitume. L'extraction du bitume eut lieu au laboratoire. Au moyen de lampes dont le flux lumineux était contrôlé, je mis en évidence les effets de variations de solubilité, car c'était là le vrai principe de l'héliographie. En effet, le premier résultat intéressant fut de montrer que le bitume ne change pas de couleur sous la lumière, mais qu'il s'insolubilise plus ou moins en fonction de l'intensité de lumière reçue. Le principe de l'héliographie était retrouvé.

Parallèlement, le temps de pose apparaissait beaucoup plus long que les huit heures annoncées dans la littérature. Il me fallut attendre cinq jours pour obtenir une image dans une chambre photo équipée d'un objectif aussi lumineux que celui de Niépce. Curieusement, Niépce n'a jamais mentionné le temps de pose dans aucun de ses écrits. Mais, en 1824, il expliquait à son frère : *«J'ai fait [...] un nouveau point de vue du Gras, sur mon autre grande pierre, et j'ai recommencé mes deux petits points de vue, sur pierre et sur verre, du côté de la basse-cour. Les deux premiers seront prêts samedi prochain, et celui sur verre, qui a été mis plus tard, lundi soir.»* Cette lettre est écrite le jeudi qui précède. Seule la pratique, c'est-à-dire la réalisation d'images sur des pierres lithographiques et sur verre per-

mit d'expliquer ce passage et d'affirmer que le temps de pose pour l'image sur verre mentionnée par Niépce était bien de cinq jours.

Dès les premiers résultats, les images présentèrent une très haute définition, ainsi qu'un excellent dégradé de teintes qui ne pouvaient se prévoir au vu de la seule image connue de Niépce (figure 2). Il apparaissait aussi de façon éclatante que l'image au bitume de Judée était négative, au lieu d'être directement positive comme on le croyait. Or Niépce ne pouvait se satisfaire d'un négatif, comme en témoignent tous ses efforts pour inverser l'image (gravure sur cuivre à l'acide de 1822 à 1827 et traitement aux vapeurs d'iode à partir de 1828).

Pourtant une phrase de la *Notice* sur cette image négative au bitume excitait ma curiosité : *«Une chose certaine c'est, qu'après le lavage, pourvu que l'empreinte soit bien sèche, le résultat obtenu est déjà satisfaisant.»* Comment une image négative peut-elle être satisfaisante ? C'est à nouveau l'expérience qui permit d'interpréter cette phrase : au cours d'un essai, une image négative au bitume de Judée apparut, tantôt positive, tantôt négative, selon l'angle sous laquelle on la regardait. L'image avait été obtenue par sous-exposition et de ce fait le vernis, attaqué par le dissolvant, était mat, et non plus brillant. Seul le support parfaitement poli renvoyait soit la lumière, soit l'ombre, et ce reflet, suivant son intensité, faisait paraître le vernis plus foncé ou plus clair, d'où une image négative ou positive qui satisfaisait Niépce.

Niépce avait observé et exploité l'effet négatif / positif. Un écrit de 1824, le confirme : *«Comme cette contre-épreuve n'est presque pas colorée, on ne peut bien juger de l'effet qu'en regardant la pierre obliquement ; c'est alors qu'il devient sensible à l'œil, à l'aide des ombres et des reflets de lumière.»* Il ajoutait : *«...et cet effet, je puis le dire, mon cher ami, a quelque chose de magique.»*

Le fait d'avoir connu ce type d'images me permit, au cours d'un séjour que je fis à Austin (Texas) en 1990, d'expliquer comment était faite la plaque de Niépce. C'est une image sur de l'étain blanc pur, brillant comme un miroir (l'étain blanc ne s'oxyde pas à l'air). Niépce s'est arrêté à l'image au bitume sans traitement ultérieur, car là aussi il s'agit d'un négatif, visible en positif sous un éclairage oblique.

Pour la première fois, on comprenait comment avait été réalisée cette plaque et on pouvait la dater.

Niépce se heurta à des difficultés pour graver à l'acide ses «points de vue» : la présence du vernis sur toute la surface, qui permettait de reproduire les demi-teintes, empêchait que l'acide n'atteigne le métal, comme l'ont montré les expériences en laboratoire. Je tentai alors de rendre le vernis le plus mince possible, au détriment de la richesse des demi-teintes. Lorsque le vernis fut extrêmement fin, j'obtins des images où l'acide, en traversant le vernis, gravait le métal suivant une multitude de points. Je compris aussitôt que j'observais l'effet de «sablé» que mentionne Niépce dans les lettres qu'il échange avec le graveur-imprimeur lorsqu'il met au point l'invention de la photogravure au trait.

Le Physautotype

La reconstitution des expériences se révèle fructueuse : elle me permet de redécouvrir le Physautotype inventé par l'association Niépce-Daguerre, procédé demeuré jusqu'ici inconnu, et dont la base est le résidu de l'essence de lavande. En 1830, Daguerre est intrigué par le résidu qu'il obtient après distillation de l'essence de lavande. Il commente sa distillation de l'essence de lavande dans une lettre à Niépce de février 1830. En langage codé, certains mots sont remplacés par des numéros, et ceux entre parenthèses ont été ajoutés au crayon par Niépce : «*Mais voici le grand point pour la promptitude. Il arrive tout à fait la même chose avec le 53 (distillation), qu'avec le 14 (jour). Ce qui reste dans le 53 (distillation) après le 55 (évaporation) est inattaquable par le 21 (dissolvant). Les parties qui reçoivent le 14 (jour) facilite [sic] le 55 (évaporation). Ce qui reste sur la planche est de même inattaquable par le 21 (dissolvant). Donc le 14 (jour) semble agir comme le 24 (feu), ce qui prouve seulement que le même principe, celui qui opère se trouve dans ces deux actions.*

Comment comprendre de tels textes ? Les lettres de Daguerre en sont remplies. Un seul moyen : refaire l'expérience. Au cours de la distillation, l'essence de lavande, initialement jaune clair, devient de plus en plus foncée jusqu'à devenir

brune. À la fin, il ne reste plus qu'un goudron solide brun noir. C'est le résidu. Cette couleur brune ne pouvait se laisser deviner, car Arago avait déclaré en 1839 que le résidu était un produit intéressant «à cause de sa plus grande blancheur». Je compris, en reconstituant le procédé, que le résidu en solution dans de l'alcool, une fois étalé sur le support, donne une couche de couleur blanche qu'Arago confondait avec la couleur du résidu. La couleur est en fait identique à celle du bitume. Et c'est là que tout s'éclaire. C'est dans cette couleur que Daguerre vit des analogies avec le bitume. Il constata que ce résidu n'était pas soluble dans les solvants du bitume, c'est-à-dire qu'il se trouvait dans un état identique à celui du bitume après expo-

allait jusqu'à prétendre que la lumière provoquait une évaporation ! Il pensait, semble-t-il, que ce qui restait sur la plaque, après l'effet de la lumière et le dépouillement, était le résidu brun de l'essence de lavande obtenu par action de la lumière, comme par l'action de la chaleur. C'est avec ce même résidu que, deux ans plus tard, les deux associés mettront au point le nouveau procédé.

Le malentendu expliqué

La redécouverte de ce second procédé ou physautotype contredit ce qui avait été écrit sur la collaboration Niépce/Daguerre, qualifiée indûment de stérile. Au contraire, il apparaît maintenant que cette collaboration avait bien

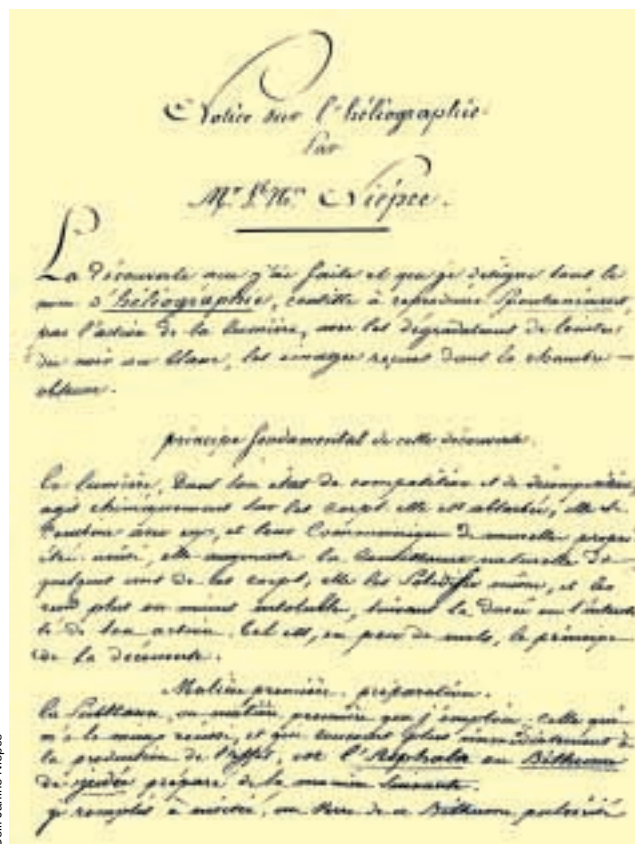
fonctionné et porté ses fruits.

Un second procédé a été inventé, à temps de pose réduit. Les images étaient directement positives en une seule opération de révélation, ce qui était le but souhaité dès le début de l'association.

Un autre résultat important fut de découvrir que les images obtenues ressemblent à s'y méprendre à des daguerréotypes, c'est-à-dire aux images que Daguerre produira par le procédé qu'il inventera en 1839, après la mort de Niépce, en s'inspirant des travaux de la collaboration. On comprend maintenant pourquoi s'est installée une polémique entre la famille de Niépce et Daguerre quand celui-ci divulgua en 1839 son procédé portant son nom. En effet, Daguerre montra des images, les daguerréotypes, dont l'aspect était identique à celles que la famille de Niépce avait vu réaliser pendant l'association. Il était

logique qu'elle crie au vol de l'invention de Niépce, ce en quoi elle n'avait pas complètement tort, car si les procédés étaient différents, il n'en demeure pas moins que Daguerre emprunta de nombreux aspects des travaux de Niépce pour mettre au point son invention.

JEAN-LOUIS MARIGNIER



Première page de la Notice sur l'héliographie de Niépce, rédigée en 1829 pour Daguerre afin d'établir leur association.

sition à la lumière, mais là, c'était la chaleur qui était responsable de cet état. Il en déduisit que la lumière et la chaleur produisaient le même effet.

Il n'eut pas de mal à aboutir à cette conclusion, car, à plusieurs reprises, Niépce lui avait signalé cette similitude des effets de la lumière et de la chaleur. Daguerre



6. RECONSTITUTION D'UN PHYSAUTOTYPE selon le procédé de Niépce et Daguerre. Une résine de pin est fondue pendant quelques heures à 200 °C et versée dans un mortier (a) pour être broyée après refroidissement ; quelques milligrammes de la poudre obtenue sont ensuite dissous dans de l'alcool (b). On verse la solution jaune sur la plaque d'argent support (c). Après évaporation, la plaque est recouverte

de treize ans de travail obstiné, le difficile passage de la science «privée» à la science «publique» peut s'effectuer. Dans cet ambitieux dessein, Nicéphore Niépce va s'associer avec Louis-Jacques-Mandé Daguerre (1787-1851), son cadet de 22 ans.

Avant d'évoquer les acquis de cette collaboration, il est intéressant de revenir, en fonction de la physico-chimie actuelle, sur les transformations chimiques subies par le bitume de Judée. La molécule photosensible de ce composé est l'asphalène. Constituée d'un feuillet aromatique plan entouré de chaînes aliphatiques, ces molécules s'organisent naturellement en empilements parallèles. Que se passe-t-il sous l'influence de la lumière? Il est admis que les feuillets se lient en fonction de l'intensité de lumière reçue (processus de réticulation par photo-oxydation). L'action des photons restant locale, la résolution est excellente. L'épaisseur de la couche photosensible après dépouillement varie avec les gradations de clair-obscur, ce qui forme l'empreinte de l'image.

En revanche, la sensibilité est très faible. Niépce n'a pas précisément indiqué le temps de pose nécessaire pour obtenir ses «points de vue». Les expériences montrent qu'il était de l'ordre de 40 à 60 heures pour un paysage par temps ensoleillé. Cela correspond à une sensibilité de 10^{-6} ISO! (Les films actuels ont une sensibilité de 100 ISO.)

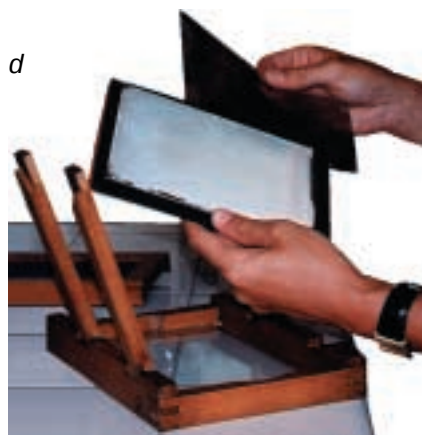
Associés par contrat le 14 décembre 1829, Niépce et Daguerre se fixent deux objectifs : (1) obtenir directement une image positive, sans passer par un négatif, et (2) raccourcir le temps de pose, qu'ils appellent la «promptitude».



contraste et la densité du positif dépendent donc de la durée de l'exposition à l'iode. Notons que l'iode avait été découvert en 1811 par Courtois et que son action sur l'argent avait été étudiée quelques années plus tard

par Gay-Lussac : Nicéphore était à l'affût des avancées de la chimie.

En 1829, l'inventeur peut estimer avoir rempli le programme qu'ils s'étaient fixé en 1816! Son invention est mûre pour être divulguée au public. Au bout



d'un dépôt de résine blanc (d). Nous souhaitons ici tirer une diapositive grand format posée en contact (e) avec la plaque (temps d'exposition de ce tirage contact : 10 minutes). Après exposition, l'image

encore invisible est placée au-dessus d'une cuvette contenant du pétrole blanc (f). L'image, le palmarium des jardins Albert Kahn, à Boulogne, apparaît sous l'action des vapeurs de pétrole et elle est fixée (g).

L'association avec Daguerre

Niépce transmet à Daguerre sa passion pour la chimie. Pendant quatre ans, jusqu'à la mort de Niépce, Daguerre séjourne, à quatre reprises et parfois jusqu'à deux semaines, à Saint-Loup-de-Varennes pour travailler du matin au soir aux expériences communes. Dans les intervalles, ils communiquent par lettres, et celles de Daguerre ont été conservées. Un long travail d'analyse a permis de reconstituer pour la première fois les travaux des deux associés et de les reproduire en laboratoire.

En deux ans et demi ils mettent au point un nouveau procédé photographique que Niépce nomme le *physautotype* (mot néo-grec savant signifiant «image de la nature par elle-même»). La mince couche photosensible est constituée de résines ou de résidus de distillation de l'essence de lavande. Elle est étendue sur une plaque de métal argenté. Après exposition en chambre noire, la plaque est révélée à la vapeur de pétrole blanc (les raisons physico-chimiques de ces phénomènes ne sont pas encore complètement élucidées). Vue en éclairage oblique, l'image obtenue est positive. La résolution est excellente, les nuances sont bien rendues. Le temps de pose a été réduit à une journée, voire à trois ou quatre heures pour des objets rapprochés.

Les deux hommes savent qu'ils sont tout près d'aboutir. Mais Daguerre insiste pour ne pas divulguer leur invention avant d'avoir atteint le but : un temps de pose d'un quart d'heure au plus. «*Dans l'état où sont les arts présentement il ne faut pas arriver à demi, car le moindre perfectionnement*

apporté à une découverte fait souvent oublier son premier auteur», avait-il déjà écrit à Niépce, le 12 octobre 1829. Remarque ô combien pertinente!

Après la mort de Niépce (1833), Daguerre continue seul les recherches qui aboutiront au daguerréotype, image obtenue avec de l'iodure d'argent, essentiellement grâce à deux opérations : la première utilisant un révélateur (la vapeur de mercure) et la seconde un fixateur (le chlorure de sodium).

Daguerre comprend – et c'est son idée de génie – qu'il faut à l'invention une consécration scientifique officielle. Sa visite à François Arago, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences et homme politique, allait être décisive pour l'avenir de la photographie. L'invention sera présentée au cours de la séance solennelle de l'Institut le 19 août 1839. L'État se porte propriétaire de la découverte, afin d'en «*doter libéralement le monde entier*». Daguerre et Isidore Niépce, héritier de son père,

reçoivent des pensions à vie. Mais la découverte devait être accompagnée d'un message simple : un seul inventeur. Dans la brochure de présentation de 1839, le texte de la *Notice* de Niépce est assorti de remarques critiques de Daguerre qui se révèlent sans fondement. L'examen des documents permet d'y voir l'influence d'Arago : pour s'imposer, semble penser Arago, un inventeur doit rehausser son propre rôle et dévaloriser celui des prédécesseurs. D'ailleurs, les recherches d'un autre Français contemporain, Hippolyte Bayard, sont passées sous silence.

Les péripéties qui accompagnent la «naissance officielle» de la photographie et son triomphe actuel remettent en lumière l'œuvre du pionnier : Niépce, inventeur de la photographie, a fait le premier pas vers la révolution des images. Il y a plus. Cet autre symbole de la modernité, l'ordinateur, doit beaucoup à la photogravure, dont Niépce est aussi l'inventeur.

Archimède, l'émission franco-allemande de vulgarisation scientifique d'ARTE, présente deux sujets sur «La reconstitution des procédés de Niépce», les 4 et 11 février 1997.

Jean-Louis MARIGNIER est chargé de recherche au CNRS (Laboratoire de physico-chimie des rayonnements de l'Université Paris-Sud). Il est lauréat de l'Académie des sciences (Grand Prix Kodak 1991) et a reçu la médaille de Salverte 1991 de la Société française de photographie.

Michel ELLENBERGER, ancien chercheur en physico-chimie biologique, est journaliste scientifique.

J.-L. MARIGNIER, *À la découverte des héliographies de Niépce*, *Le Photographe*, 1470, 13 (1989).

J.-L. MARIGNIER, *Mystères éclaircis de la plus ancienne photo au monde*, *Le Photographe*, 1480, 50 (1989).

J.-L. MARIGNIER, *Première reconstitution du deuxième procédé photographique au monde*, *Le Photographe*, 1499, 26 (1992).

J.-L. MARIGNIER, *Découverte de l'invention par Niépce et Daguerre d'un procédé photographique à base de colophane*, *Le Photographe*, 1524, 36 (1995).

J.-L. MARIGNIER, *Photochemistry of Asphaltene Films. A Study of the World's first photographic Process and its Invention*, in *J. Imag. Sci.*, 40, 123 (1996).

Le deutérium primordial

CRAIG HOGAN

Les noyaux de cette forme d'hydrogène furent créés dans les premiers instants de l'Univers. La détermination de sa quantité confirme l'existence de matière noire exotique.

Selon la théorie du Big Bang, l'Univers primordial était extraordinairement simple : il ne renfermait aucune structure de taille supérieure à celle des particules élémentaires. La théorie du Big Bang n'est fondée que sur la relativité générale, le Modèle standard de la physique des particules et les lois de la thermodynamique, mais elle semble décrire de manière presque parfaite l'évolution de l'Univers et, en particulier, ses premières étapes.

Les noyaux atomiques synthétisés pendant les premières minutes de l'Univers nous renseignent sur les événements du début de l'Univers, ainsi que sur sa composition et sa structure d'aujourd'hui. Le Big Bang a principalement engendré de l'hydrogène et de l'hélium. Le deutérium, isotope lourd de l'hydrogène, n'a été fabriqué qu'au début de l'Univers ; il révèle donc la jeunesse de celui-ci. Le rapport entre le nombre d'atomes de deutérium et le nombre d'atomes d'hydrogène dépend fortement de l'uniformité et de la quantité totale de matière nucléaire créée lors du Big Bang. Les mesures directes du deutérium présent dans des nuages de gaz anciens, effectuées ces dernières années, promettent un test précis de la théorie du Big Bang.

L'expansion de l'Univers aurait commencé voici 10 à 20 milliards d'années. Tout était alors plus compact et plus dense qu'aujourd'hui. La température de l'Univers âgé d'une seconde était supérieure à dix milliards de degrés, soit 1 000 fois la température au centre du Soleil. À cette température, on distingue mal les différentes formes de matière et d'énergie : les particules nucléaires, les neutrons et les protons, se transforment constamment les uns en les autres, en

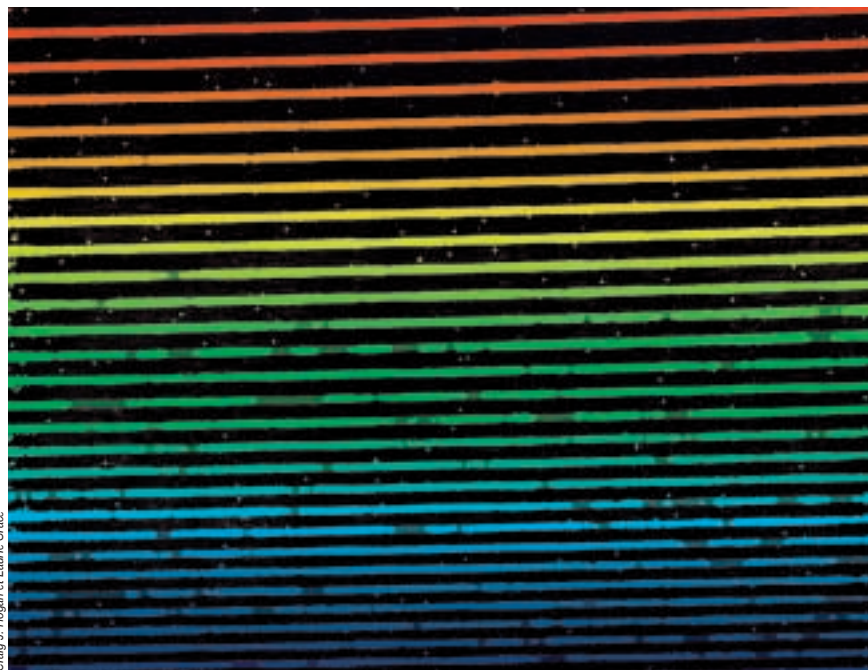
subissant de violentes collisions avec les neutrinos, les positons et les électrons. Comme les neutrons sont un peu plus massifs que les protons, le refroidissement de l'Univers a conduit à la formation d'un nombre supérieur de protons. Lorsque la température a été inférieure à dix milliards de degrés, les transmutations mutuelles ont cessé, et les protons ont été sept fois plus nombreux que les neutrons.

À la sortie de la fournaise primordiale

Quelques minutes après le Big Bang, lorsque la température était voisine d'un milliard de degrés, les protons et

les neutrons se sont associés en noyaux. Les paires composées d'un neutron et d'un proton étaient des noyaux de deutérium, les deutons, qui se combinèrent presque tous en noyaux d'hélium, composés de deux protons et de deux neutrons. Lorsque cet hélium primordial s'est formé, la densité de l'Univers était devenue trop faible pour que des fusions nucléaires ultérieures synthétisent des éléments plus lourds : la quasi-totalité des neutrons se sont retrouvés dans les noyaux d'hélium.

Sans neutrons pour vaincre les répulsions électriques, les protons restants n'ont pu se lier en noyaux d'atomes plus lourds : six protons sur sept subsistent aujourd'hui en tant que



Craig J. Hogan et Laurie Grace

1. LE TÉLESCOPE KECK (à droite), sur le Mauna Kea, à Hawaii, a recueilli la lumière d'un quasar lointain et l'a focalisée sur le détecteur d'un spectroscopie à haute résolution. Le spectre obtenu (ci-dessus) est zébré de lignes sombres, parce que des nuages de gaz, entre le quasar et la Terre, ont absorbé la lumière à des longueurs d'onde spécifiques. L'analyse de cette absorption révèle la présence de deutérium, un isotope lourd de l'hydrogène.