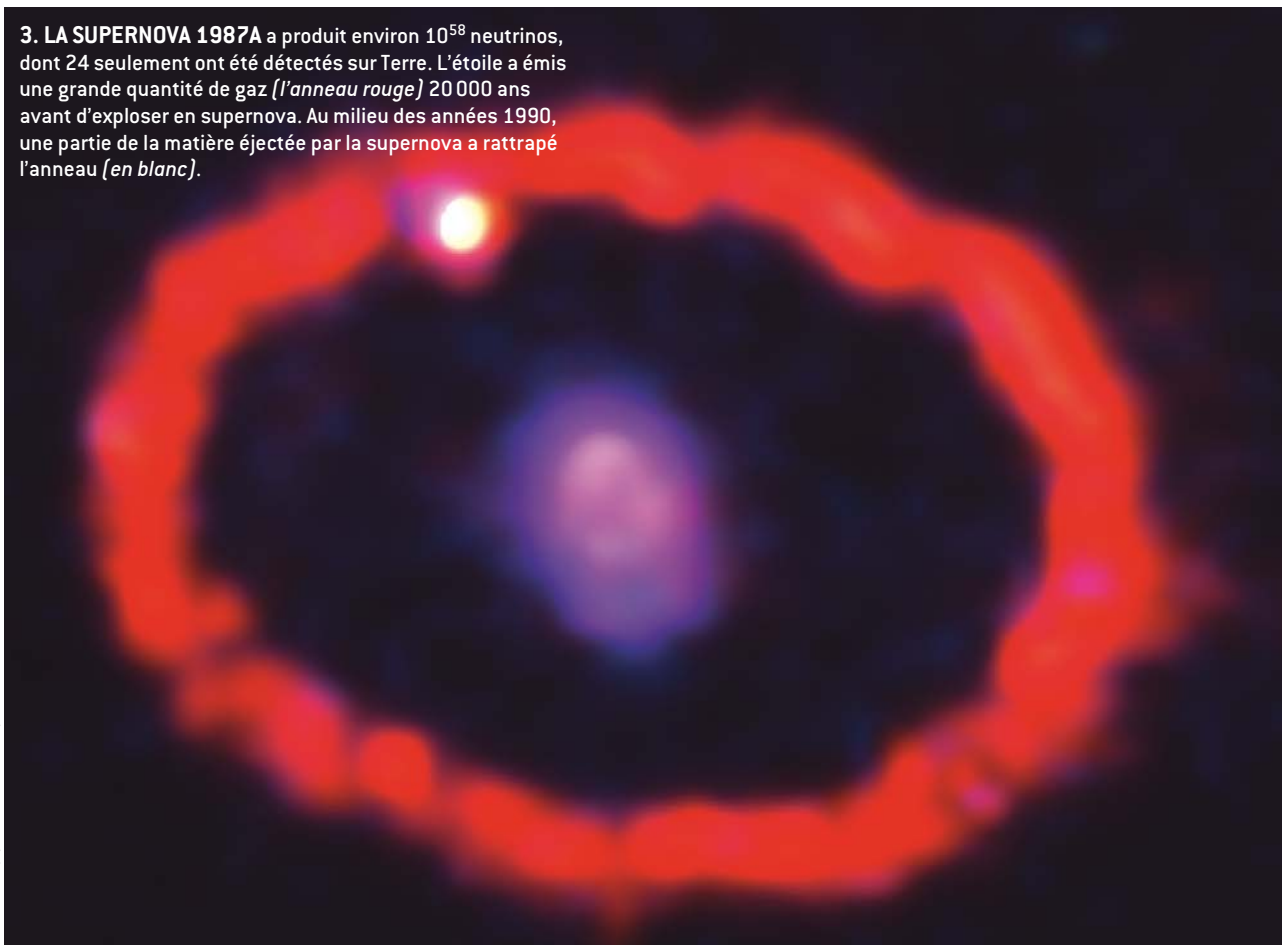


3. LA SUPERNOVA 1987A a produit environ 10^{58} neutrinos, dont 24 seulement ont été détectés sur Terre. L'étoile a émis une grande quantité de gaz (*l'anneau rouge*) 20 000 ans avant d'exploser en supernova. Au milieu des années 1990, une partie de la matière éjectée par la supernova a rattrapé l'anneau (*en blanc*).

Center for Astrophysics, Harvard University



à quelques degrés près, limitant ainsi la zone du ciel à scruter avec les télescopes à une aire à peine plus étendue que celle de la pleine Lune.

L'expérience *IceCube*, qui pourrait enregistrer un million de neutrinos, serait la plus performante pour analyser l'évolution du flux de particules au cours du temps. Francis Halzen, de l'Université du Wisconsin à Madison (États-Unis) et à la tête de l'expérience *IceCube*, précise que le dispositif sera capable de reconstruire l'intégralité du flux d'une durée de dix secondes avec une mesure toutes les quelques millisecondes. Les physiciens pourront ainsi déterminer avec une grande précision le moment où se forme l'étoile à neutrons ou le trou noir.

Cependant, les détecteurs actuels ne sont sensibles qu'à un seul type de particules provenant des supernovæ, l'antineutrino électronique (le neutrino et son antiparticule, l'antineutrino, existent sous trois « saveurs » : électronique, muonique et tauique). L'observation d'un seul type de neutrinos revient à prendre une photographie avec un filtre monochromatique.

L'image composée de toutes les couleurs serait beaucoup plus intéressante. Ainsi, pour enrichir la palette des neutrinos détectables, K. Scholberg et des chercheurs canadiens construisent le dispositif HALO (pour *Helium and Lead Observatory*, Observatoire à l'hélium et au plomb) à SNOLAB dans l'Ontario. Le matériau de détection est constitué de 76 tonnes de plomb, ce qui confère à HALO une sensibilité aux neutrinos électroniques. Comme l'expérience est de taille modeste, seule une supernova dans la moitié la plus proche de la galaxie lui sera visible.

D'ici quelques années... ou quelques décennies

Les perspectives sont passionnantes, mais elles ne se concrétiseront que lors de l'effondrement d'un cœur stellaire en supernova dans le voisinage galactique.

Le flux de neutrinos en provenance d'une supernova extérieure à la Voie lactée n'apporterait que très peu d'informations. Par exemple, *Super-Kamiokande* ne détec-

terait qu'une poignée de neutrinos d'une supernova née dans la galaxie d'Andromède, la galaxie de taille comparable à la Voie lactée et qui en est la plus proche, à quelque 2,5 millions d'années-lumière.

S'il est certain que des étoiles vieillissantes, telles Bételgeuse ou Eta Carinae, exploseront dans un futur proche, il est impossible d'être plus précis. Dans ce domaine, le « futur proche » peut correspondre à plusieurs centaines de milliers d'années.

Mais la Voie lactée est peuplée d'un très grand nombre d'étoiles et les chances sont grandes que l'une d'elles explose dans les prochaines décennies. A. Friedland me confiait que s'il devait parier sur ce qui arriverait en premier, une supernova dans la Galaxie ou la construction d'un accélérateur de particules aux États-Unis, il miserait sur l'explosion d'une étoile. Et même si celle-ci est trop éloignée pour que sa lumière nous parvienne, ses neutrinos brilleront intensément dans les détecteurs, un moment qui sera historique pour tous les chercheurs de neutrinos. ■

Traquer des fossiles au GPS

Robert Anemone et Charles Emerson

Jusqu'à présent, la chance était le principal auxiliaire des prospecteurs de fossiles. Avec la mise au point d'une méthode de recherche des gisements de fossiles par satellite, la géolocalisation pourrait prendre le relais.

1. RECHERCHER DES FOSSILES dans une région aussi vaste que le Great Divide Basin, dans le Wyoming, n'a rien de facile. Mais une nouvelle méthode de prélocalisation des sites fossilifères multiplie les chances de faire des découvertes.

Par une brûlante journée de juillet 2009, quatre véhicules tout-terrains foncent vers le Salt Sage Draw. La «ravine de l'armoise du sel» se trouve dans le Great Divide Basin, un désert d'altitude d'où aucune eau ne parvient jamais à la mer. Depuis 1994, je (Robert Anemone) guide des expéditions scientifiques dans le bassin. Paléoanthropologue et paléontologue moi-même, j'emmène cette fois mon équipe vers le Salt Sage Draw à la recherche de fossiles pouvant attester du remplacement des lignées archaïques de mammifères par des lignées modernes pendant l'Éocène (56 à 34 millions d'années).

Malgré mon expérience de ce terrain difficile, je ne reconnais pas la route empruntée les années précédentes. Tout d'un coup, elle disparaît sous les arbrisseaux d'armoise et autres hautes herbes qui peuplent le Great Divide Basin. Hésitant, j'arrête le convoi et pars reconnaître le chemin à pied. Après avoir contourné une petite butte, j'aperçois la route à quelques mètres. C'est

Andrew Gailger

L'ESSENTIEL

- **Même si les paléontologues se servent de cartes, les découvertes de fossiles sont pour l'essentiel fortuites.**
- **L'identification, sur les images prises par satellite, des signatures spectrales particulières des sites fossilifères pourrait aider la prospection paléontologique.**
- **La méthode vient d'être testée avec succès dans le Great Divide Basin, une dépression du Wyoming, aux États-Unis, où abondent les fossiles éocènes et paléocènes.**

là qu'aura lieu la découverte majeure qui transformera notre expédition en un succès scientifique. Son côté fortuit me poussera à rechercher les moyens de réduire le rôle du hasard dans la prospection paléontologique, et à développer avec mon collègue géographe Ch. Emerson la recherche de fossiles à l'aide d'images satellitaires.

Des bancs de grès prometteurs

Ce que je découvre à côté de la route disparue, c'est un banc de grès que je n'aurais sans doute pas vu si nous ne nous étions pas arrêtés. Or je sais bien que dans l'Ouest américain, ce type de sédiment est très souvent fossilifère. Il faut donc que j'en aie le cœur net : je décide de consacrer plusieurs heures à inspecter ces strates avant de reprendre la route. Au bout d'une heure passée à scruter la roche à quatre pattes, mon étudiant Tim Held se met à crier. Lui et son camarade Justin Gish viennent de découvrir

un trésor paléontologique : de très belles mâchoires de mammifères ! Une trouvaille, parce que ce type d'ossements suffit en général pour identifier l'espèce ou du moins le genre d'animal et renseigne aussi sur son alimentation.

La suite ne peut être décrite que comme un rêve de paléontologue : nous avons trouvé près de 500 mâchoires bien préservées et des milliers de dents et autres ossements issus de 20 espèces de mammifères différentes ayant vécu il y a quelque 50 millions d'années. Nous avons nommé le site *Tim's Confession* (la confession de Tim). Ce lieu reste, aujourd'hui encore, le plus riche gisement de fossiles de mammifères du début de l'Éocène non seulement du Great Divide Basin, mais aussi de tout l'Ouest américain.

Mon équipe est loin d'être la première à découvrir des fossiles par accident. L'histoire de la paléontologie est truffée de découvertes aussi heureuses que fortuites. En fait, la façon dont les paléontologues essaient de trouver des fossiles de vertébrés n'a guère changé depuis les premiers jours de la paléontologie. Comme les pionniers du XIX^e siècle, nous continuons à suivre des indices géologiques et topographiques à la recherche de zones sédimentaires propices. Cette préparation topographique mise à part, la découverte de gisements fossilifères est surtout une question de chance. Or, le plus souvent, les chercheurs n'ont pas de chance...

Des prospections moins aléatoires ?

Le caractère fortuit de la découverte de Tim's Confession m'a amené à m'interroger sur le moyen d'améliorer la planification d'une prospection paléontologique. Préalablement à notre expédition dans le Great Divide Basin, nous savions deux choses utiles : d'une part, que les fossiles que nous recherchions se rencontrent dans les grès de 50 à 55 millions d'années ; d'autre part, où ces sédiments affleurent d'une façon favorable à la découverte. Ces deux informations nous ont aidés à réduire la zone de prospection, mais il nous restait des dizaines de kilomètres carrés de terrains gréseux à explorer, avec de grands risques de rentrer bredouilles.

Cette réalité frustrante me tracassait, puis, une nuit au camp, une idée m'est venue. Ce qui l'avait inspirée ? L'atmosphère



phère vierge de toute pollution lumineuse du Great Divide Basin : elle nous donnait souvent l'occasion de regarder passer les points lumineux signalant un satellite dans le ciel.

Je me suis demandé si notre expertise de la topographie et de la géologie paléontologiques du Great Divide Basin pourrait nous servir à planifier nos expéditions sur une image satellitaire des 10 000 kilomètres carrés de cette région. Si nous y placions les gisements très fossilifères déjà connus, me suis-je dit, leurs caractéristiques s'y manifesteraient peut-être, alors que sur le terrain, elles sont le plus souvent indécélables. Pourrions-nous ainsi distinguer les zones contenant des fossiles de celles qui n'en contiennent pas ?

Des yeux dans le ciel

L'idée n'était pas vraiment nouvelle : je savais que d'autres paléontologues avaient déjà employé l'imagerie satellitaire pour améliorer l'efficacité de leur quête sur le terrain. Bon connaisseur du registre fossile des primates et des humains anciens, je savais notamment que dans les années 1990, Berhane Asfaw, du Service de recherche de la Vallée du Rift à Addis-Abeba, et ses collègues ont utilisé des images satellitaires pour identifier des affleurements de roches pouvant contenir des fossiles humains anciens en Éthiopie. À la même époque, Richard Stucky, du Musée de la

■ LES AUTEURS



Robert ANEMONE est paléoanthropologue et paléontologue à l'Université de Caroline du Nord, à Greensboro aux États-Unis.

Charles EMERSON est maître de conférences en géographie à l'Université de l'Ouest du Michigan, aux États-Unis.



Robert L. Anemone



nature et de la science à Denver, montra qu'il était possible de reconnaître certains types géologiques de terrain sur des images satellitaires du bassin très fossilifère d'une rivière du centre du Wyoming – la rivière Wind. Au cours de ces deux projets, les paléontologues ont collaboré avec succès avec les experts de la télédétection de la NASA.

Toutefois, je me demandais s'il était possible d'aller plus loin, c'est-à-dire de tirer des images satellitaires assez d'informations pour orienter les recherches sur le terrain avec plus de précision.

C'est pourquoi je me suis tourné vers un géographe, Ch. Emerson. L'idée était de se procurer les images satellitaires libres de droit du Great Divide Basin prises par le système de cartographie *Enhanced Thematic Mapper* (Cartographie thématique améliorée) du satellite *Landsat 7*. Ce capteur mesure le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par une surface de la Terre et le décompose selon huit bandes spectrales (intervalles de longueurs d'onde) du domaine visible et infrarouge. Les signaux correspondants constituent la signature spectrale du point terrestre observé, et permettent de déterminer le type de sol ou de couvert végétal.

L'idée était de développer une identification spectrale fine des sédiments du Great Divide Basin, dans l'espoir que les gisements de fossiles aient une signature spectrale commune ou du moins des carac-

téristiques spectrales communes. Si cela s'avérait possible, la perspective d'une meilleure planification de la prospection de zones immenses serait ouverte. Avant de partir en expédition, nous définirions notre parcours sur les écrans de nos ordinateurs. Pour réaliser ce projet, il fallait d'abord mettre au point la méthode, puis la tester en allant prospecter sur le terrain les endroits qu'elle nous aurait conduits à désigner comme prometteurs...

S'orienter dans un paysage multidimensionnel

Pour rechercher la signature spectrale éventuelle de gisements fossilifères, nous disposions des sites ayant produit des découvertes importantes, tel Tim's Confession. Déterminer quelle combinaison des signaux spectraux fournis par *Landsat 7* pouvait caractériser un site fossilifère n'a pas été facile. Il nous a fallu apprendre à nous déplacer dans un paysage multidimensionnel, tâche ardue pour un être humain, mais où les ordinateurs excellent.

Nous avons choisi de rechercher les signatures spectrales à l'aide d'un réseau neuromimétique. Inspiré dans sa structure des réseaux de neurones biologiques, ce type de programme peut, comme un cerveau, être entraîné à reconnaître des

2. EN 2009, LE SITE FOSSILIFÈRE

nommé Tim's Confession a été découvert presque par hasard dans le Great Divide Basin. Il a livré des centaines de rarissimes mâchoires de mammifères bien préservées, vieilles de 50 millions d'années (*ci-dessus*). Depuis, la localisation satellitaire des gisements potentiels de fossiles a multiplié les découvertes de sites intéressants. L'un d'eux, nommé TKTK, est proche d'un ancien volcan connu sous le nom de Boar's Tusk (*à gauche*).

motifs dans le paysage. Pour cela, il faut l'exercer en lui fournissant de nombreux exemples de paysages comportant le motif à déceler. Au cours de cet apprentissage, le réseau neuromimétique se modifie petit à petit afin de le reconnaître plus vite et plus sûrement.

Une fois entraîné, notre réseau neuronal s'est révélé capable de reconnaître tous les gisements que nous avions identifiés, par exemple distinguer les surfaces gréseuses d'autres types de terrains, que ce soient des dunes ou des milieux humides. Apparemment, les zones fossilifères avaient bien une signature spectrale commune !

Pour autant, un réseau neuromimétique est aveugle : pure machine numérique, il est incapable d'extraire, des données qu'il traite, les raisons qui lui ont fait prendre sa décision. Il peut distinguer une zone humide d'un gisement fossilifère, mais, à l'inverse, ne peut inférer en quoi les

signatures spectrales de ces deux types de terrains différent, c'est-à-dire nous livrer l'information qui nous serait utile pour affiner notre technique de prospection satellitaire des zones riches en fossiles.

Une autre limite de la recherche par réseaux neuromimétiques est que le traitement numérique des données porte sur les pixels individuels, c'est-à-dire sur les unités élémentaires qui constituent l'image (pixel est la contraction de l'anglais *picture element*). Or dans la bande spectrale où ils sont le plus petits, les pixels de *Landsat 7* mesurent 15×15 mètres, surface qui peut soit dépasser celle d'un gisement fossilifère, soit lui être inférieure. En raison de cette limite technique, les repérages par réseau neuromimétique des emplacements prometteurs ne coïncident pas toujours avec la réalité de terrain.

Afin de surmonter cet obstacle, il fallait prendre en compte les pixels de signatures

spectrales similaires et adjacents à un pixel prometteur, et pour ce faire reconstituer statistiquement les signatures spectrales globales de zones couvertes par tout un groupe de pixels, qu'il s'agisse d'une forêt ou d'un gisement.

Analyser des pixels de moins d'un mètre

Nous nous sommes ainsi tournés vers une technique dite d'analyse d'image orientée par objet géographique, qui s'appuie sur des images satellitaires en haute résolution disponibles dans le commerce et dont les pixels correspondent à des surfaces de taille inférieure au mètre.

Par cette approche, il devient possible de diviser les images satellitaires en groupes de pixels homogènes sur le plan spectral. Ces groupes sont ensuite caractérisés à l'aide de paramètres physiques tels la brillance

ou les textures moyenne ou médiane, obtenues par des calculs statistiques à partir de la répartition de pixels considérée. La nature de ce qui se trouve au sol peut ainsi être approchée au plus près. C'est par cette approche que nous sommes parvenus à un jeu de critères caractérisant une zone probablement fossilifère.

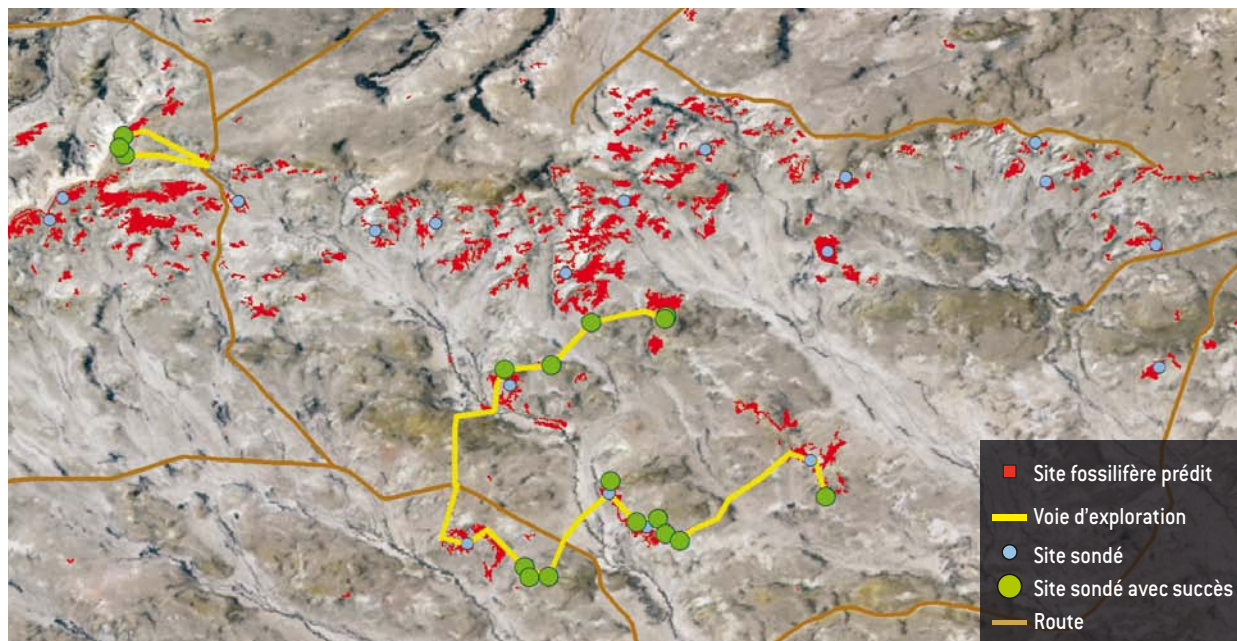
Nous avons ainsi obtenu une carte prédictive des gisements fossilifères potentiels du Great Divide Basin (*voir l'encadré ci-dessous*). Y sont portés tous les endroits présentant une signature spectrale proche de celle des sites fossilifères bien identifiés. Les résultats obtenus par le réseau neuromimétique et ceux de l'analyse d'image orientée par objet géographique concordent souvent, mais divergent aussi dans un certain nombre de cas.

Nous nous sommes concentrés sur les zones déclarées prometteuses par les deux méthodes. Au cours des étés 2012 et 2013,

LES SITES FOSSILIFÈRES POTENTIELS DU GREAT DIVIDE BASIN

Des programmes informatiques de localisation de gisements fossilifères ont été développés pour analyser les signatures spectrales de toutes les zones d'une région et ont subi un apprentissage à partir des signatures spectrales des gisements déjà connus. L'analyse de toute la région a fait apparaître de nombreux endroits présentant les mêmes caractéristiques spectrales (*en rouge*). La carte prédictive obtenue (*ci-dessous*) a servi pour planifier les expéditions de 2012 et de 2013 dans le Great Divide Basin (*en jaune*). Nous avons ainsi pu nous restreindre à seulement quelques régions prometteuses. Nous n'avons pas trouvé de fossiles en chaque endroit sélectionné, mais nous en avons mis au jour bien plus que lorsque nous explorions à l'aveugle. La moisson de fossiles était ainsi bien plus importante que celle de nos précédentes expéditions, planifiées sans l'appui d'une carte prédictive.

- R. A. et C. E.



U.S. Geological Survey (image satellite); C. W. Emerson et R. L. Anemone (points)

nous nous sommes rendus dans le Great Divide Basin notre carte prédictive à la main et remplis d'espoir que nos gisements fossilifères numériques seraient aussi des gisements fossilifères réels.

Le réseau neuromimétique s'est révélé très efficace pour identifier des dépôts de grès, qui contiennent souvent des fossiles de vertébrés. Ainsi, en juillet 2012, l'un des premiers bancs de grès vers lequel il nous a dirigés contenait plus d'une dizaine de fossiles caractéristiques des mammifères de l'Éocène, notamment le cheval à cinq doigts *Hyracotherium*, le primate précoce *Cantius* et plusieurs membres du groupe des Condylarthra, dont les espèces de mammifères ongulés (mammifères à sabots) sont toutes éteintes aujourd'hui. Le réseau neuromimétique nous guida aussi vers plusieurs endroits qui ont livré des fossiles de vertébrés aquatiques, de poissons, de crocodiles et de tortues.

Des fossiles dans 31 des lieux sélectionnés

Notre méthode d'analyse d'image orientée par objet géographique nous a aussi conduits à de nouveaux sites. Après une phase durant laquelle trois ou quatre endroits de notre présélection se sont révélés vides de fossiles, nous avons mis le cap vers Freight Gap (le fossé du chariot), au Nord du Great Divide Basin. Là, nous avons passé une semaine intense à mettre à l'épreuve nos programmes.

Bryan Bommersbach, un des étudiants de notre équipe, nous avait épuisé une semaine auparavant en nous guidant jusqu'à un endroit prometteur, mais qui s'est révélé sans intérêt et que nous avons surnommé la « Folie de Bryan ». Ce fut lui à nouveau qui prit la direction des opérations et sélectionna une série de zones déclarées prometteuses par nos programmes. Heureusement pour lui (et pour nous !), nous avons découvert cette fois des fossiles dans 31 des lieux dont les signatures spectrales étaient proches de celle des gisements déjà connus. Parmi ces sites, 25 contenaient des fossiles de vertébrés et 10 d'entre eux nous ont offert des fossiles de mammifères. Plus extraordinaire encore : un fossile de mammifère datait de la fin du Paléocène (65 à 55,8 millions d'années), ce qui est rarissime.

Ainsi, le taux de réussite de notre chasse aux fossiles d'un nouveau style s'est révélé bien au-dessus de ce à quoi nos prospec-

tions préparées sans carte prédictive nous avaient habitués.

Nous avons toutes les raisons de croire que la même méthode de repérage de gisements de fossiles potentiels fonctionnerait dans d'autres régions que le Great Divide Basin, voire partout dans le monde. En théorie, pour dresser sur un terrain donné une carte prédictive des gisements fossilifères d'un certain type, il suffit de disposer d'images satellitaires et d'assez de lieux de découverte pour entraîner le réseau neuromimétique.

Nous avons ainsi testé ce réseau, entraîné à découvrir des fossiles dans le Great Divide Basin, dans une région voisine : le Bison Basin. Le « bassin du bison » contient lui aussi des fossiles de mammifères du Paléocène et, comme ses formations sont géologiquement similaires à celles du Great Divide Basin, nous pouvions espérer que le réseau ferait preuve d'une certaine efficacité. C'est bien ce qui s'est produit, puisqu'il nous a dirigés vers les trois sites les plus fossilifères du Bison Basin. Clairement, une équipe de paléontologues utilisant notre méthode aurait eu bien plus de chances de découvrir ces sites que si elle était venue pratiquer dans cette région les méthodes classiques de l'exploration paléontologique.

Ainsi, nos campagnes de 2012 et de 2013 dans le Wyoming ont montré que l'utilisation combinée de l'imagerie satellitaire et de programmes prédictifs augmente l'efficacité de la prospection paléontologique. Toutefois, nous voudrions aller plus loin en affinant la caractérisation et la discrimination des signatures spectrales de sites fossilifères. Nous voudrions imposer davantage de contraintes à nos programmes afin de limiter le nombre de faux résultats positifs figurant sur les cartes prédictives obtenues.

Une prospection plus scientifique

Nous sommes convaincus que, grâce à ces outils, la prospection paléontologique peut devenir plus scientifique et plus sûre en limitant les risques de passer à côté d'un fossile important. Cet objectif vaut bien tous les efforts encore à faire pour perfectionner notre méthode. Le registre fossile est très lacunaire. S'en remettre au hasard reviendrait à accepter que 15 ans s'écoulaient entre deux découvertes de l'importance de celle de Tim's Confession! ■

■ BIBLIOGRAPHIE

C. W. Emerson et R. L. Anemone, **An artificial neural network-based approach to identifying mammalian fossil localities in the Great Divide Basin, Wyoming**, *Remote Sensing Letters*, vol. 3, pp. 453-460, 2012.

R. Anemone *et al.*, **Finding fossils in new ways: An artificial neural network approach to predicting the location of productive fossil localities**, *Evolutionary Anthropology*, vol. 20, pp. 169-180, 2011.

R. L. Anemone *et al.*, **GIS and paleoanthropology: Incorporating new approaches from the geospatial sciences in the analysis of primate and human evolution**, *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 54, pp. 19-46, 2011.

HISTOIRE DES SCIENCES

Illustration botanique en Chine et en Inde

Aux XVII^e et XVIII^e siècles, les artistes asiatiques ont insufflé leur talent et leur style aux dessins qu'ils ont réalisés pour le compte de collectionneurs européens.

Martyn RIX

Au fil des explorations botaniques qui ont accompagné le colonialisme européen, à la fin du XVII^e siècle et au début du XVIII^e, de nombreux artistes venus de Grande-Bretagne, de France et d'autres pays ont réalisé une multitude d'illustrations et de collections de plantes. On sait moins que des artistes asiatiques ont aussi exécuté des peintures destinées au public européen. Fondée à Londres en 1600 et active jusqu'en 1874, la Compagnie anglaise des Indes orientales

a établi des comptoirs dans toute l'Asie. Ses activités sont centrées sur l'Inde, mais elles incluent aussi la Chine et la Malaisie, entre autres. L'exportation de marchandises de ces régions va de pair avec un intérêt marqué pour la valeur horticole et économique des plantes locales. À la fin du XVIII^e siècle, des naturalistes européens chargent des artistes chinois et indiens de peindre des spécimens. Les œuvres nées de cette collaboration reflètent à la fois les traditions esthétiques des artistes et l'influence occidentale.

À cette époque, les artistes et jardiniers chinois s'appuient sur des traditions raffinées, tant en matière d'art que d'horticulture. Au XVII^e siècle, sous la dynastie Qing, leurs prédécesseurs avaient abandonné la simplicité des peintures plus anciennes, telles celles réalisées par les empereurs de la dynastie Song (960–1279) : de simples fleurs sauvages et du bambou dessinés avec de l'encre et des pinceaux. Les jardiniers s'étaient spécialisés dans la culture de quelques fleurs sauvages locales et



Museum national du Palais, Taipei