

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.

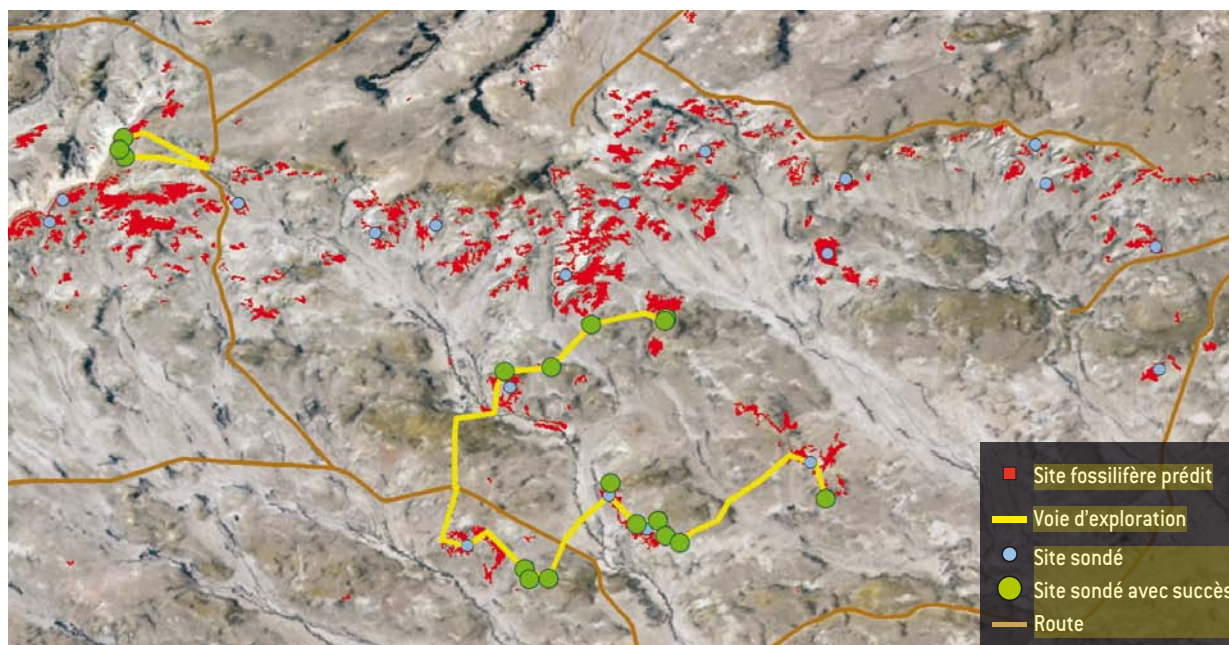
Nous avons ainsi obtenu une carte prédictive des gisements fossilifères potentiels du Great Divide Basin (*voir l'encadré ci-dessous*). Y sont portés tous les endroits présentant une signature spectrale proche de celle des sites fossilifères bien identifiés. Les résultats obtenus par le réseau neuromimétique 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.