

## 12

### **Ressources minérales et ressources en eau : l'apport de la téledétection dans le monde francophone**

ANDRÉ OZER

*Géomorphologie et géologie du Quaternaire, Université de Liège, Place du 20 Août, 7,  
B-4000 Liège, Belgique*

#### **Résumé**

La téledétection spatiale apporte chaque jour des informations précieuses dans les recherches géologiques par la mise en évidence de structures telles linéaments, failles, contacts lithologiques, plis, etc., et par l'analyse de signatures spectrales. La contribution des chercheurs francophones en ce domaine est remarquable quoique trop dispersée et parfois trop peu connue. Cet article tente d'une part de présenter l'état de la recherche dans le monde francophone et d'autre part de souligner son apport en téledétection géologique.

#### **1 Bilan de la recherche en téledétection géologique dans le monde francophone**

La téledétection spatiale comme outil de prospection dans la recherche géologique n'est utilisée que par relativement peu de laboratoires d'universités francophones. La majorité des recherches en ce domaine sont menées surtout aux États-Unis, au Royaume-Uni, aux Pays-Bas, en Allemagne, etc.

Dans les régions francophones, ce sont surtout des institutions publiques ou mixtes telles l'Institut français du pétrole (IFP) ou le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) ou encore l'École des mines de Paris (siège de Sophia-Antipolis) qui mènent des

recherches de prospection très intéressantes mais dont les résultats ne sont pas toujours accessibles ou de diffusion souvent fort restreinte. Dans le monde universitaire français, l'équipe du professeur Chorowicz, de l'Université de Paris VI, fait autorité et collabore avec le professeur Alem au Maroc et le professeur Zargouni en Tunisie; cependant, il faut également citer les chercheurs des autres centres comme Nancy, Strasbourg, Orléans, etc.

En Belgique, c'est surtout au Laboratoire de télédétection du Musée royal de l'Afrique Centrale, à Tervuren, que se développent, grâce au dynamisme du professeur L'Admirant, les recherches les plus intéressantes, tournées surtout vers le continent africain. Par contre, à l'Université de Liège, la télédétection est enseignée tant au second qu'au troisième cycle, parallèlement à des recherches sur la géologie et la géomorphologie des régions tempérées.

Au Zaïre, signalons aussi quelques recherches menées par l'Université de Lubumbashi. Enfin, au Canada, l'Université de Sherbrooke, pôle de développement de la télédétection dans le monde francophone, traite aussi les aspects relatifs aux sciences de la Terre.

Cependant, il faut noter le désintérêt ou la méfiance de nombreux laboratoires de géologie pour la télédétection satellitaire ou aéroportée. Cela est dû souvent à certaines conclusions tirées trop hâtivement d'interprétations de photos aériennes ou d'images satellites sans aucune vérification sur le terrain.

D'autre part, les résultats des recherches des francophones en télédétection géologique sont souvent publiés dans des revues régionales, rares sont ceux qui paraissent dans des revues spécialisées. Cette dispersion contribue à l'isolement des chercheurs qui utilisent cette technique.

Dans les congrès internationaux de télédétection, le phénomène est semblable : les communications de chercheurs francophones dans le domaine des sciences de la Terre sont rares. C'était le cas au congrès de l'ISPRS à Enschede en 1986 ou à celui de l'IGARSS à Edimbourg en 1988.

Cependant, grâce au satellite SPOT et aux projets PEPS, un regain d'intérêt des équipes francophones a été noté. Ainsi, à la réunion de Paris de novembre 1987, présentant les premiers résultats de SPOT, les communications relatives à la géologie étaient nombreuses. Le satellite SPOT a donc joué le rôle de catalyseur dans la télédétection géologique menée par des francophones.

Ce bilan, certes incomplet, est peut-être pessimiste mais il souligne une carence. Il est temps que les décideurs donnent plus de moyens aux recherches en télédétection consacrées aux sciences de la Terre. Cependant, malgré des conditions difficiles, le monde scientifique francophone peut s'enorgueillir de résultats très valables, très compétitifs mais certainement trop peu connus dans le monde international.

## 2 Les apports scientifiques des chercheurs francophones en télédétection appliquée à la géologie

### 2.1 Les linéaments

Depuis les années 70, les chercheurs ont porté leur intérêt sur la mise en évidence de structures linéaires que beaucoup relevèrent d'abord sur photographies aériennes, ensuite sur des documents satellites.

Ainsi, dans le cadre de recherches menées en Sardaigne septentrionale entre 1970 et 1975, nous avons relevé sur une photographie prise du satellite Skylab (1973) une série de structures

linéaires orientées S.O.-N.E., ce qui nous a permis de mieux comprendre le style tectonique de cette région à une époque où aucune carte géologique détaillée n'était encore publiée.

À la même époque, de nombreuses recherches régionales sur les structures linéaires repérées sur les premières images Landsat ont été réalisées. C'est cependant Cazabat (1975) qui, le premier, a donné une idée générale des linéaments relevés sur l'ensemble de la France et des pays limitrophes par interprétation visuelle des images satellitaires Landsat.

Rappelons que, par linéament, on entend toute trace linéaire, topographique ou de tonalité, simple ou composite, et dont les différentes parties sont en relation rectilinéaire ou légèrement curvilinéaire. Ils sont généralement supposés refléter des directions privilégiées de l'écorce terrestre, surtout des directions structurales ou tectoniques.

Les images satellites, par leur vue synoptique, permettent donc de donner aux linéaments leur dimension exacte.

Il est aujourd'hui admis que :

- 1) des relations étroites existent entre des linéaments et des fractures profondes et anciennes (celles-ci ayant pu influencer la surface tout au long des temps géologiques);
- 2) certains linéaments ont pu influencer l'alignement de récifs coralliens;
- 3) des linéaments déterminent des systèmes de drainage (subaérien ou souterrain) induisant des modifications linéaires dans la végétation ou des différences de tonalité dans le sol.

Pour la prospection des minerais, l'étude des linéaments s'est révélée particulièrement intéressante car elle met en évidence des zones de fractures qui peuvent diriger et localiser des dykes ou qui peuvent fournir les voies idéales pour la circulation de solutions qui altèrent et minéralisent les roches encaissantes.

Les travaux de Cazabat montrent que la France est découpée dans sa totalité par des structures linéaires et ceci d'une façon presque homogène. Si certaines de ces structures sont connues et rattachées aux orogénèses calédoniennes, hercyniennes ou alpines, beaucoup d'autres étaient ignorées et demeurent énigmatiques.

Il nous a paru intéressant de vérifier sur le terrain la signification de ces structures linéaires repérées tant sur photos aériennes que sur images satellites. Ainsi, en Haute-Belgique, au sud de Liège, tous les fronts de taille des carrières qui recoupaient des linéaments ont été analysés. Il est ainsi apparu que la majorité d'entre eux correspond à une augmentation de la densité des diaclases. Rares, par contre, sont les linéaments témoignant de la présence d'une faille. Il importe donc de ne pas toujours assimiler faille et linéament!

Comme le soulignent Fraipont et Ruhland (1986) de l'Université de Strasbourg, dans les recherches minières, les concepts de géologie structurale doivent être confrontés en permanence aux découvertes de forme et de structure par télédétection. En effet, l'analyse structurale permet de déterminer les recouvrements qui ont conduit à la formation et à la répartition des structures-pièges et à leur évolution.

Par ailleurs, en Belgique, plusieurs linéaments importants apparaissent sur l'imagerie Landsat et ne correspondent à rien de connu sur la carte géologique. Sur un de ces linéaments, Vandeven (1977) a localisé plusieurs gisements métallifères : cinq gisements de plomb et un d'antimoine, ce dernier étant situé au Grand-Duché de Luxembourg. Toujours en Haute-Belgique, il signale aussi que l'importance des gisements de fer est nettement accrue lorsque les linéaments recourent des roches calcaires et plus spécialement des calcaires du Carbonifère.

En France, il a été démontré que la distribution du bismuth dans les gîtes minéraux se répartit suivant trois axes principaux qui se confondent avec des linéaments télédectés. Ainsi, par diverses statistiques, Scanvic (1983) affirme que dans le Massif Central, plus de 70% des gîtes métallifères sont situés sur un linéament.

En outre, il est possible, par traitement numérique de l'imagerie satellitaire, de mettre en valeur, par des filtres orientés, des familles de linéaments. Il en résulte un «ombrage» artificiel des discontinuités linéaires qui sont ainsi soulignées.

Le repérage des linéaments correspondant à des discontinuités morphologiques est aussi possible sur les images de la bande 6 (infrarouge thermique) du Thematic Mapper. En effet, les versants d'adret, plus ensoleillés, plus chauds, apparaissent plus clairs. Ainsi, en Haute-Belgique, avons-nous repéré une série de linéaments dont la plupart sont méconnus et ne correspondent à aucun tracé cartographié. Un tel document représente le «pseudo-relief» du territoire et est d'autant plus intéressant qu'il n'est pas toujours aisé d'obtenir des images SPOT permettant un examen stéréoscopique.

### 2.1.1 Couloir linéamentaire

Tout récemment, Gagny et Marconnet (1987) ont introduit la notion de couloir linéamentaire qu'ils considèrent comme des zones beaucoup plus larges que les linéaments traditionnels ou linéaments-traités. L'aspect des couloirs linéamentaires est souvent moins tranché mais ils possèdent une extension latérale plus grande. Ces auteurs montrent que, dans l'ouest de l'Espagne, ces couloirs sont associés à la métallogénie de l'étain et du tungstène. Dans ce secteur, la corrélation entre la position des minéralisations et le tracé des couloirs linéamentaires est excellente. Ces structures prennent donc la valeur de métallotectes. On peut donc affirmer que les couloirs, aisément repérables sur une image satellitaire, représentent un guide pour la prospection minière.

### 2.1.2 Linéaments et ressources en eau

La cartographie des linéaments constitue aussi une approche intéressante pour les recherches hydrogéologiques dans les régions homogènes où les zones fracturées jouent à la fois le rôle de drain et de réservoir. Technique de prospection désormais classique, elle a été largement utilisée en France (Bassin parisien, Bretagne, etc.) et dans les pays du Sahel. Par des études statistiques, il a été prouvé que le débit des puits implantés au droit de linéaments pouvait être multiplié jusque par cent.

Au Burkina Faso, Bérard (1982) a pu choisir des sites d'implantation de forages d'eau grâce aux données fournies par la télédétection : sur 28 forages réalisés, 24 avaient un débit suffisant, dont 5 supérieurs à 11 m<sup>3</sup>/h.

### 2.1.3 Autres applications des linéaments

La représentation cartographique des linéaments s'avère être un document indispensable dans les rapports de sécurité préalables aux constructions d'ouvrages d'art, tels barrage, centrale nucléaire, etc.

La compréhension d'un séisme est aussi facilitée par l'examen des linéaments. L'étude sur le tremblement de terre du Frioul en est un exemple (Weber et Courtot, 1978).

## 2.2 Les structures circulaires

Si nous avons parlé surtout des structures linéaires, il en est d'autres, plus énigmatiques, qui ont déjà été signalées par Cazabat en 1975 : les structures circulaires. Leur origine est variée : cratère volcanique, impact météorique, plis en dôme, plis diapires, etc.

Weecksteen (1983) puis L'admirant (1986) soulignaient leur intérêt dans la recherche minière. Ces structures, liées à la géologie ou à la morphologie, ont été observées, entre autres, en Guinée en liaison avec des minéralisations aurifères et au Zaïre avec des gîtes primaires de cassitérite.

David et Perthuisot (1985) ont baptisé ces structures du nom de cycléament et en ont fait la typologie en fonction de leur forme, de leur relief, de leur couleur et de leur texture.

## 2.3 Les radargraphies

L'apport des radargraphies prises d'avions ou par des navettes spatiales s'est révélé particulièrement utile, surtout dans les régions désertiques. En effet, comme l'onde radar pénètre le sable sec sur une épaisseur de 5 m, elle fait apparaître sous une couverture de sable de déflation un réseau hydrographique fossile. L'utilisation de cette nouvelle technique constitue aussi un complément utile aux méthodes classiques de cartographie géologique par les informations nouvelles, surtout d'ordre structural, qu'elles contiennent.

Entre autres, les travaux de L'admirant et Waleffe (1984) sur des radargraphies prises par la navette spatiale Columbia, dans l'est du Mali, démontrent les apports de ces nouveaux documents.

## 2.4 Les signatures spectrales

Cependant, si les études géologiques par télédétection envisagent essentiellement le repérage de structures, l'analyse de réflectances ou signatures spectrales est aussi porteuse d'informations précieuses.

Pour que cette méthodologie soit d'application, encore faut-il que la roche affleure, qu'elle ne soit pas recouverte de dépôts sableux comme dans les zones désertiques. De même, les régions froides se prêtent très bien à ce type de mesure pour autant qu'elles ne soient pas recouvertes de neige ou de glace. En effet, les versants, évoluant sous les alternances gel-dégel, présentent des surfaces rocheuses fraîches.

Par contre, dans les régions tempérées, cette méthode n'est pas directement d'application à cause des couvertures sableuses ou limoneuses ou encore des colluvions qui masquent le substratum.

Des mesures de réflectance réalisées sur le terrain ainsi qu'en laboratoire sont comparées aux informations télédéteçtées. Le traitement des données numériques permet ainsi d'obtenir une cartographie objective de lithologies différentes et même de faire apparaître directement des minéralisations. Il apparaît ainsi que des anomalies linéaires de réflectance liées à des dykes ou à des fractures peuvent être des indices intéressants pour la prospection de minéralisation de Ba, F et Cu.

De même, des anomalies circulaires de réflectance engendrées par un massif granitique non affleurant peuvent être associées à des anomalies géochimiques liées à des concentrations de minéraux d'étain, wolfram, arsenic, or, cuivre, molybdène, etc. (L'admirant, 1986). Cette méthode a été appliquée récemment par Chorowicz et Alem au Maroc, à proximité d'une mine d'argent (Cervelle *et al.*, 1988).

Dans les régions tempérées, les mesures de réflectance se feront par l'intermédiaire de la végétation. Par des variations de couvert végétal, il sera possible d'induire des informations sur la roche sous-jacente. L'empoisonnement de certaines plantes sous l'effet de concentration de métaux lourds sera parfois observé : ce type de «stress» végétal constitue un indice intéressant pour la recherche minière.

Ainsi, Scanvic (1986) a relevé, dans le massif armoricain, des anomalies géobotaniques développées au-dessus d'un chapeau de fer. Ce même auteur a découvert, grâce à des anomalies de réflectance dans les champs de blé, des zones à forte teneur en plomb et en cuivre. Dans un seul secteur de Bretagne, il repéra 20 anomalies dont 18 sont associées à des anomalies géochimiques liées à la présence de Pb, As, Cu, Zn, etc.

### 3 Conclusion

Dans cet exposé qui est loin d'être exhaustif, notre intention était de souligner l'apport des chercheurs francophones dans le domaine géologique par la télédétection et plus particulièrement dans la recherche de ressources minérales et de ressources en eau.

Il faut cependant souligner, ainsi que cela a été fait au Congrès de télédétection appliquée à la cartographie géologique à Orléans en 1984, qu'en raison des progrès technologiques très rapides ainsi que devant la foule de données fournies par l'interprétation de l'imagerie satellitaire, un goulot d'étranglement se rencontre dans la recherche de vérité-terrain.

C'est la raison pour laquelle Teleki et Weber (1984) recommandent de travailler d'abord dans des secteurs dont la géologie est considérée comme bien connue. Aussi, est-ce avec cette philosophie que nous avons réalisé, dans le cadre d'un projet PEPS, pour un territoire de Haute-Belgique situé au sud de Liège, une série de cartes thématiques qui ont été comparées aux données fournies par le satellite SPOT (Ozer *et al.*, 1988).

### Bibliographie

- BÉRARD, P., 1982. Interprétation des images satellites en complément à la photo-interprétation traditionnelle pour la définition des structures hydro-géologiques au Niger et en Haute-Volta. — P. 67-82 in Colloque sur les milieux discontinus en hydrogéologie. Document 45, Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans.
- CAZABAT, C., 1975. Topologie ertsienne de la France. — Bulletin de la Société française de photogrammétrie, 60, p. 21-36.
- CERVELLE, B., J. CHOROWICZ, J. P. RUDANT, G. TAMAIN, E. M. ALEM et M. BEKKALI, 1988. Évaluation des données SPOT-1 pour l'activité minière : exemple de la mine d'argent d'Imiter, Maroc. — P. 743-748 in SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats. Paris, novembre 1987. Cepadues-Éditions, Toulouse, 1552 p.
- DAVID, E. et V. PERTHUISOT, 1985. Cycléaments de la province d'Alicante (Espagne). — Photo-interprétation. 1985-1,4.
- DE FRAIPONT, P. et M. RUHLAND, 1986. Télédétection appliquée à la géologie structurale minière. — P. 233-247 in First european workshop on remote sensing in mineral exploration. Rapport EUR 10511 de la Commission des communautés européennes.
- GAGNY, C. et B. MARCONNET, 1987. Interprétation structurale d'images Landsat et prospection minière : caractérisation de «couloirs linéamentaires» dans une province métallogénique à étain et tungstène (Estrémadure, Espagne). — Photo-interprétation. 1987-4,1.
- LADMIRANT, H., 1986. Télédétection aérospatiale et géologie dans le cadre de la coopération au développement. — P. 65-92 in La télédétection, facteur de développement outre-mer. Symposium de l'Académie royale des sciences d'outre-mer, Belgique.

- LADMIRANT, H. et A. WALEFFE, 1984. Test d'analyse géologique de radargraphies aérospatiales (Adrar des Iforas, Mali). — Bulletin de la Société belge de géologie. 93 : 179-186.
- OZER, A., J. M. MARION, C. ROLAND et P. TREFOIS, 1988. Signification de linéaments sur une image SPOT dans la région liégeoise. — Bulletin de la Société belge de géologie. 97 : 153-172.
- SCANVIC, J.-Y., 1983. Utilisation de la télédétection dans les sciences de la Terre. — Manuels et méthodes, 7, Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, 159 p.
- SCANVIC, J.-Y., 1986. Quelques aspects géobotaniques et structuraux de la télédétection spatiale : implications dans la prospection minière du massif armoricain, France. — P. 127-147 in First european workshop on remote sensing in mineral exploration. Rapport EUR 10511 de la Commission des communautés européennes.
- TELEKI, P. et C. WEBER, 1984. Télédétection appliquée à la cartographie géologique. — Document 82, Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, 313 p.
- VANDENVEN, G., 1977. Les Ardennes belges vues par le satellite ERTS 1. — Bulletin de la Société belge de géologie. 86 : 51-56.
- WEBER, C. et P. COURTOT, 1978. Le séisme du Frioul (Italie, 6 mai 1976) dans son contexte sismotectonique. — Revue de géographie physique et de géologie dynamique. (2) 20 : 247-258.
- WEECKSTEEN, G., 1980. Exemples d'application de la télédétection à la cartographie géologique et à la recherche minière. — Bulletin de la Société française de photogrammétrie. 77 : 5-20.
- WEECKSTEEN, G., 1983. Évolution de l'apport des radargraphies SIR-A en géologie: comparaison avec les images Landsat et les photographies aériennes. — Bulletin de la Société française de photogrammétrie. 82 : 43-62.