

6

ANALYSE DES IMAGES SPOT APPLIQUEE A LA RECHERCHE ARCHEOLOGIQUE AU NORD-OUEST DE
L'INDE : RECHERCHE DE LINEAMENTS

F. DEBAINE (1 et 3), H.-P. FRANCFORT (2), C. MERING (1)

(1) ORSTOM, Unité de Télédétection, 70-74, route d'Aulnay, 93140 Bondy

(2) CNRS, UPR n°315, 23 rue du Maroc, 75940 Paris cedex 19

(3) CNRS, U.A.141, 1 Place Aristide Briand, 92195 Meudon

Résumé : Cette étude s'inscrit dans une recherche géoarchéologique concernant le nord-ouest du sous-continent indien (UPR n°315 du CNRS et Arch. Surv. of India). Nous appliquons aux images Spot les principes de l'analyse quantitative d'images, en particulier ceux de la morphologie mathématique, afin de retrouver les tracés de réseaux d'irrigation protohistoriques et historiques.

Abstract : The study comes within an archaeological research in northwestern India. We use the quantitative image analysis, especially mathematical morphology, in order to find traces of ancient irrigation systems, which are evidences of historic and protohistoric human occupation.

1. Objectifs

L'étude des images satellitaires Spot, entreprise à la suite des prospections géoarchéologiques menées dans la partie subaride du Nord-Ouest indien (Françfort, 1985), doit permettre de préciser les liens qui existent entre les traces de paléo-écoulements naturels, des vestiges d'irrigations anciennes, et l'occupation humaine, marquée par la présence d'une forte concentration de sites archéologiques, protohistoriques (3ème-2ème millénaire) et historiques. Elle doit aboutir à la description des conditions de développement du peuplement de la région, en particulier ses rapports avec les ressources en eau.

Il s'agit donc de retrouver sur les images Spot la continuité linéaire des canaux d'irrigation anciens, dont les vestiges sont enfouis ou prennent la forme de levées sableuses plus ou moins arasées. Cette étude vise aussi à retrouver le tracé des paléo-chenaux de rivières et des traces de drainage asséché qui ne sont pas portées sur les cartes, et dont on connaît mal le tracé et l'extension.

Pour le moment, le seul critère robuste dont nous disposons, pour reconnaître ces différents types d'objets sur les images, est le critère morphologique. Les vestiges de canaux d'irrigation et les chenaux d'écoulement n'ont pas en effet de signature spectrale spécifique et stable, leur forme est par contre toujours linéaire, rectiligne ou plus ou moins sinueuse. Nous avons donc choisi d'extraire d'abord l'ensemble des *linéaments* présents dans le paysage et perceptibles sur l'image, de les trier et de les analyser ensuite. L'analyse qualitative (l'étude de la forme : taille, tracé, structure), et l'analyse quantitative (la mesure des distances séparant les sites des différents types de linéaments) doivent aider à la formulation d'une typologie des linéaments et conduire à l'explication des liens existant, à différentes époques, entre l'hydrographie, l'irrigation et l'habitat.

2. Traitements d'image : principes et résultats

Nous utilisons principalement les méthodes de la morphologie mathématique, particulièrement adaptées à l'analyse automatique et à l'interprétation d'entités ayant une forme déterminée. Notre travail a consisté à mettre au point des séquences de transformations morphologiques permettant la mise en évidence et l'extraction des linéaments. Les étapes de classification et d'analyse des réseaux linéaires feront l'objet d'une étude ultérieure.

2.1. Séquence de mise en évidence des linéaments

Les séquences de transformations morphologiques sont testées sur des fenêtres de 256 par 300 pixels riches en linéaments artificiels de différents types (routes, chemins, canaux actuels) et en chenaux de drainage non fonctionnels. Les résultats sont validés à l'aide des cartes topographiques au 1:50 000 et des données recueillies sur le terrain.

Ces traitements sont appliqués à la première composante principale obtenue après transformation de Karhunen Loeve. Cette image est en effet plus contrastée que les trois bandes spectrales brutes, et les réseaux linéaires y sont ainsi beaucoup plus nettement perceptibles (fig.1).

Pour rehausser les linéaments, nous effectuons d'abord une série de *fermetures morphologiques* (Serra, 1982), les objets étant caractérisés par les valeurs basses de la fonction en teintes de gris. Les éléments structurants sont anisotropes, il s'agit de segments de droites dont les orientations varient, puisque nous n'avons pas a priori sur l'orientation des linéaments. Nous effectuons donc six *fermetures* avec un segment de taille 2 dans les trois directions dites de la trame (0°, 60°, 120°) et dans les trois directions dites conjuguées (30°, 90°, 150°). Ces *fermetures* ont pour effet d'éliminer les ensembles de forme linéaire et de teinte sombre dans chacune des orientations.

Ces ensembles sont ensuite filtrés par soustraction de l'image originale aux six images fermées : nous effectuons une série de six top-hat (Serra, 1982). Selon l'orientation de l'élément structurant, seuls certains linéaments sont restitués (fig.3 et 4). Dans tous les cas, les linéaments les plus épais sont mis en évidence. Le filtrage n'a pas permis, par ailleurs, d'éliminer les ensembles non linéaires.

2.2. Séquence d'extraction des linéaments

La méthode de reconstruction des composantes connexes permet d'obtenir, à partir d'une image binaire, l'ensemble des linéaments sur un fond uniforme.

Les images en teintes de gris obtenues à l'étape précédente doivent donc être seuillées. A cette fin, nous avons mis au point une méthode de seuillage automatique inspirée d'un "seuillage manuel" : le seuil choisi sera celui qui permet de définir le plus grand nombre d'éléments rectilignes relativement à la surface totale de l'ensemble défini par le seuillage. Pour cela nous choisissons le seuil qui maximise la fonction suivante :

$$R_L(g) = \frac{N_L(g)}{A(g)}$$

$N_L(g)$: nombre de configurations linéaires pour le niveau de gris g

$A(g)$: surface de l'ensemble obtenu pour le niveau de gris g

Les configurations linéaires sont estimées par des configurations numériques particulières à l'intérieur de l'hexagone pour chacune des douze directions. Nous assimilons par exemple, une configuration linéaire horizontale (0°) aux configurations numériques suivantes :

```

0 0          0 0
1 1 1      1 1 1
0 0          1 1

```

En général, on réduit ainsi automatiquement le nombre de seuils possible à quatre, un seul pour certaines images.

Sur les images ainsi binarisées, l'extraction des linéaments s'effectue en plusieurs étapes. On applique aux images l'algorithme de reconstruction, qui se traduit par la séquence de transformations morphologiques suivante :

$$X_1 = X_0 \ominus B$$

$$X_2 = (X_1 \oplus B) \cap X_0$$

$$X_n = (X_{n-1} \oplus B) \cap X_0$$

Les images binaires sont assimilées à un ensemble X_0 , B est un élément structurant isotrope, l'hexagone. La première transformation X_1 est une érosion. Elle permet d'éliminer les ensembles isolés de pixels dont la taille est inférieure à celle de l'élément structurant ; ici, un hexagone de taille 2. Les composantes connexes qui n'ont pas été éliminées par l'érosion sont reconstruites par une séquence de dilatations, qui ont pour effet d'augmenter la surface des ensembles et d'en connecter les parties disjointes. Ces dilatations sont dites "conditionnelles" parce qu'on effectue à la suite de chacune d'elle l'intersection de l'ensemble dilaté $X_1 \oplus B$ et de l'ensemble initial X_0 , ce qui a pour effet de ne pas dilater les linéaments au-delà de leur taille initiale. Cette séquence est itérée n fois jusqu'à ce que l'image ne soit plus modifiée.

L'algorithme est appliqué aux six images "top-hat". Nous parvenons ainsi à extraire l'ensemble des linéaments dans chacune des six directions. L'image obtenue après en avoir effectué la réunion contient encore, mais en petit nombre, des éléments non linéaires de petite taille.

On calcule alors le diamètre géodésique de chaque composante et on élimine les ensembles ayant un petit diamètre géodésique. Sur l'image, ne demeurent que des ensembles d'une longueur suffisante, pouvant être assimilés à des linéaments (fig.5).

Nous nous sommes avant tout efforcés de produire une séquence automatique de traitement d'images permettant d'extraire les linéaments. Ceux-ci pourront ainsi être analysés ultérieurement de façon qualitative et quantitative. Chacune des opérations élémentaires (transformations morphologiques, seuillage), ne coûte par ailleurs que quelques dizaines de secondes en temps de calcul sur un matériel de traitement d'images standard.

3. Résultats et conclusion

Si l'on compare les images obtenues aux cartes au 1/50 000, on constate que les réseaux principaux, routes et canaux d'irrigation sont correctement extraits ; leur tracé s'interrompt lorsque les linéaments ne sont pas distincts de leur environnement, notamment à l'emplacement des villages (fig. 2 et 5).

Les réseaux fins correspondant sur le terrain à des chemins ou à des canaux d'irrigation très étroits (de largeur inférieure à 5 mètres) n'ont pas été reconstruits. L'oeil les perçoit sur les images brutes et accentuées, mais ils sont trop fins, trop discontinus ou trop peu distincts de leur environnement pour qu'il soit possible, pour le moment, de les extraire automatiquement.

En revanche, les séquences de transformations morphologiques ont permis la mise en évidence, et l'extraction de chenaux de drainage non fonctionnels. Ces paléo-écoulements n'étaient pas indiqués sur les cartes topographiques, et ils n'ont pu être repérés sur le terrain. Les observations faites a posteriori in situ, permettent de penser que ces chenaux ont été, à une époque encore indéterminée, aménagés par l'homme à des fins d'irrigation. L'analyse automatique a donc permis

d'extraire des linéaments non connus a priori, et pourtant d'un grand intérêt sur le plan archéologique et paléogéographique. Bien que n'étant pas "intelligente" (ne prenant pas en compte des connaissances préalables), elle peut donc dans une certaine mesure fournir des éléments d'analyse en amont de l'interprétation thématique proprement dite. La méthode qui a été utilisée ici, sera appliquée à l'étude de véritables réseaux hydrographiques, donc de systèmes plus complexes, dans une région plus aride (Nord-Est pakistanais) qui n'a pas été bouleversée par les mises en cultures récentes, ce qui rend plus aisée la recherche de réseaux irrigués anciens.



Fig. 1A - Première composante principale.

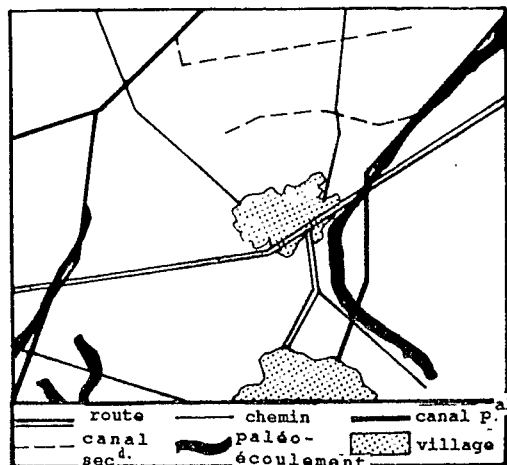


Fig. 2 - Différents types de linéaments..

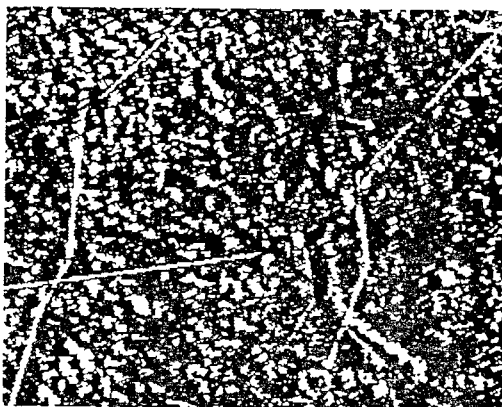


Fig. 3B - Top-hat (30°) sur A

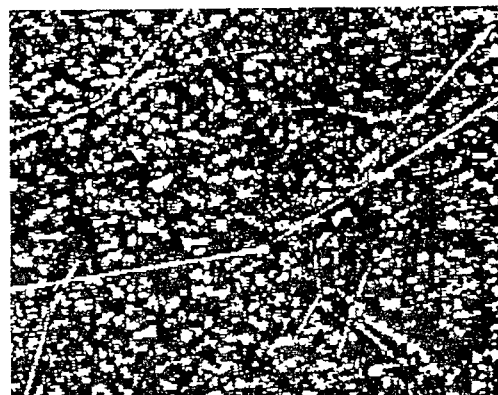


Fig. 4C - Top-hat (90°) sur A

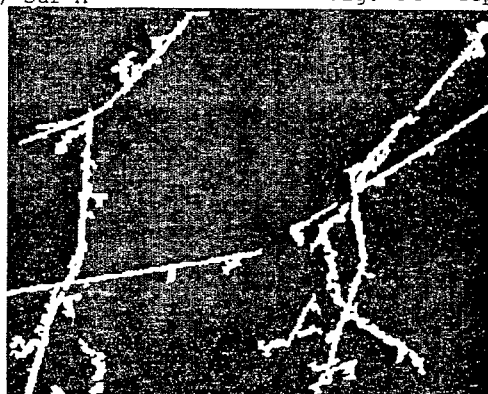


Fig. 5D: Reconstruction

BIBLIOGRAPHIE

- MERING (C.), DEBAINE (F.), "Analysis of satellite image applied to archaeological research in north-west India : delimitation of linear networks", *Proceedings of the Ninth Asian Conference on Remote Sensing*, 23-29 Nov. 1988, ACRS, Bangkok, p.p. B-2-1 - B-2-8
- FRANCFORT (H.-P.) éd., *Prospection archéologique au Nord-Ouest de l'Inde. Rapport préliminaire 1983-1984 (travaux de la Mission Archéologique Française en Inde n°1)*, Editions Recherches sur les Civilisations, Paris, "Mémoires" n°62, 1985.
- SERRA (J.), *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, London, 1982.