

Traitements d'image spatiale appliqués à la recherche archéologique : mise en évidence de réseaux en Inde du Nord

Françoise DEBAINE⁽¹⁾, Catherine MERING⁽²⁾, Yveline PONCET⁽³⁾

(1) *Géographe allocataire ORSTOM et CNRS, Laboratoire de Géographie Physique, UAI41, 1, place A. Briand, 92195 Meudon*, (2) *Statisticienne ORSTOM*, (3) *Géographe ORSTOM, 70, rte d'Aulnay, 93143 Bondy cedex*

RÉSUMÉ

A partir d'une image Landsat MSS traitée par les méthodes de la Morphologie Mathématique, on a mis en évidence les réseaux d'irrigation et de circulation, parmi lesquels des linéaments qui sont présumés correspondre à un ancien réseau d'irrigation, aujourd'hui disparu.

MOTS-CLÉS : Télédétection — Morphologie Mathématique — Irrigation — Archéologie — Inde du Nord.

ABSTRACT

Image processings used in archaeology : networks revealed in Northern India

From a MSS Landsat image processed with the methods of Mathematical Morphology, we can find irrigation and traffic networks ; some of them are said to be the features of an ancient irrigation network, now disappeared.

KEY WORDS : Remote Sensing — Mathematical Morphology — Irrigation — Archaeology — Northern India.

INTRODUCTION

Cette étude concerne le piémont himalayen et la plaine qui se trouve dans l'espace compris entre New-Delhi et le fleuve Sutlej : cette région a été l'objet de prospections archéologiques et d'études d'environnement (1) qui participent aux travaux sur les conditions de développement de la civilisation de l'Indus (3^e-2^e millénaires) et de celles qui la suivent, jusqu'à l'époque moderne.

Au cours des études d'environnement, il est apparu que la localisation des sites archéologiques pouvait être reliée à la mise en valeur du milieu par l'irrigation.

Les reliefs sont faibles, principalement constitués d'ondulations dunaires, avec quelques larges vallées saisonnièrement fonctionnelles. La pluviométrie annuelle est de 600 mm environ. La végétation arborée spontanée, très

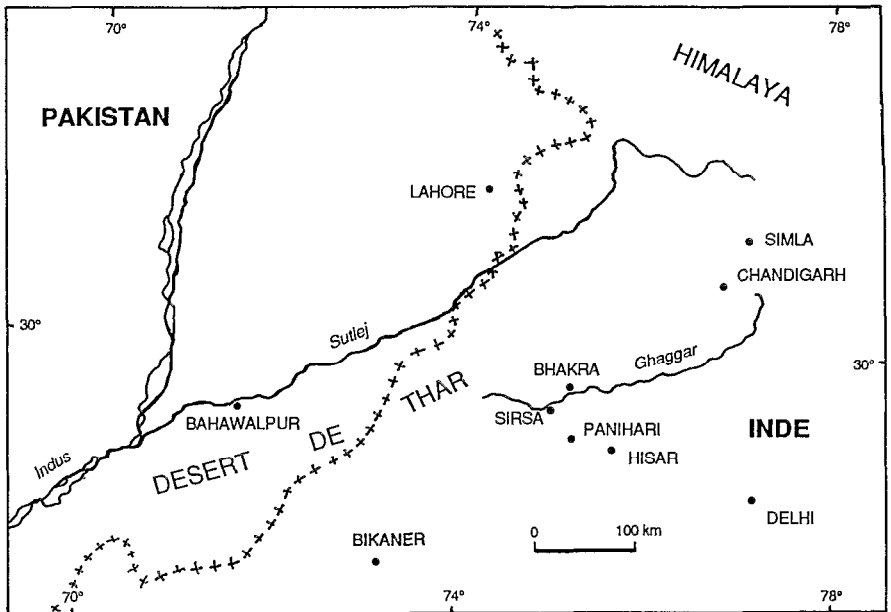


FIG. 1. — Carte de situation

clairsemée, est constituée de fourrés à acacias sur les aires les plus sèches, de formations plus hautes à proximité de l'eau. La région est densément peuplée (200 à 400 h/km²) d'agriculteurs qui produisent du mil, de l'arachide, du coton, en pratiquant une irrigation par gravité à partir de canaux venant des piémonts himalayens, construits, pour la plupart des tracés actuels, au XIX^e siècle.

Les peuplements anciens ont laissé des traces sous forme de buttes d'habitat. Des indices ponctuels de l'existence de canaux d'irrigation anciens (médiévaux et protohistoriques) ont été retrouvés sur le terrain mais sans que l'on puisse en reconnaître les tracés. En surface, ces indices se traduisent sous la forme de buttes sableuses allongées, vestiges présumés des sédiments évacués d'année en année par les curages, hautes de 3 à 5 mètres et parfois larges d'une cinquantaine de mètres. Le problème à résoudre est de préciser le tracé et l'extension des linéaments et éventuellement des réseaux correspondants.

Les photographies aériennes ne sont pas disponibles pour le moment, les cartes topographiques publiées ne sont pas suffisamment détaillées et les études de terrain ne peuvent fournir que des réponses limitées : le recours à la télédétection spatiale s'impose alors, d'une part pour compléter l'information sur l'organisation des espaces, d'autre part pour résoudre le problème de localisation et d'identification d'un thème sélectionné.

A partir de données numériques Landsat, nous avons donc cherché à mettre en évidence les réseaux ; dans un premier temps, la plus vaste gamme de réseaux de toute nature : canaux d'irrigation actuels, routes, voies ferrées... ; dans un second temps, les différences entre ces réseaux (différences de dimensions, de formes, de contrastes avec leur voisinage). Par ces moyens nous espérons identifier les linéaments et les réseaux qui n'appartiennent pas aux catégories actuelles et fonctionnelles citées plus haut et qui seraient assimilables à des réseaux d'irrigation anciens, désormais disparus.

LES TRAITEMENTS D'IMAGE (2)

Notre objectif est l'extraction automatique de réseaux à partir d'une image Landsat MSS.

Plutôt que de rechercher les thèmes linéaires à travers leur signature spectrale (eau libre des rivières et des canaux, sol nu des routes, végétation des haies...) nous avons cherché à mettre en évidence l'alignement des pixels, c'est-à-dire leur organisation, leur ordonnancement, constituant des traits topographiques observables aux échelles locales et régionales. Ainsi, structure ou élément, ensemble ou partie, nous avons considéré les réseaux avant tout comme une forme.

Les méthodes courantes en reconnaissance d'objets à partir des images multispectrales sont basées sur la classification des signatures spectrales ; mais ces méthodes ne différencient pas les objets ayant des signatures spectrales voisines et des formes différentes (un canal d'une rivière, par exemple). C'est pourquoi nous avons préféré, compte-tenu de notre objectif, utiliser des méthodes d'analyse de texture et les transformations de base de la Morphologie Mathématique : à travers le traitement des arrangements de valeurs des pixels dans un voisinage donné, ces transformations permettent de contrôler l'extraction des objets sur une image en teintes de gris en fonction de leur forme et non plus seulement de leur radiométrie.

Ces traitements ayant fait une apparition récente en télédétection, nous exposons ci-après les principes de base des transformations utilisées, en les illustrant par leurs résultats sur une image exemplaire.

Préalablement aux traitements de Morphologie Mathématique proprement dits, nous avons appliqué des filtres numériques dits de rehaussement de contours permettant de transformer l'échelle des gris de l'image d'origine, de sorte que les réseaux soient soulignés par les valeurs extrêmes (minimales et maximales) de la nouvelle échelle des gris. On appellera « pics » les valeurs les plus hautes et « vallées » les valeurs les plus basses de l'échelle des gris.

L'exemple est une fenêtre extraite de la scène Landsat 159-039 du 10 novembre 1975, centrée sur des tronçons de la rivière Ghagghar et du canal Bhakra.

L'image traitée à l'origine (fig. 2) est le canal 6 MSS.

Les rehaussements de contours

L'indice de texture : l'écart-type local

Le calcul consiste à remplacer la valeur du pixel central d'une maille 3×3 par la valeur de l'écart-type calculé à l'intérieur de cette maille (fig. 3) : les deux réseaux (rivière et canal) apparaissent dans les valeurs hautes de même que quelques points isolés (réservoirs présumés) ; l'environnement, dont les valeurs ont été lissées par l'application de cet indice, est aisément seuillable en deux paliers (bleu foncé et bleu clair).

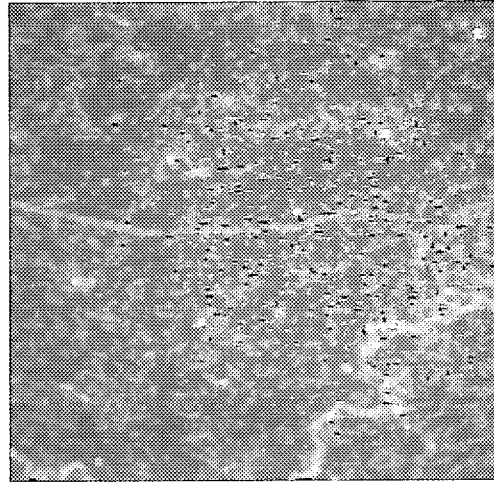
Le filtre gradient directionnel : ici le filtre *nord-ouest*

Ce filtre est obtenu en effectuant un produit de convolution entre une maille 3×3 et la matrice suivante :

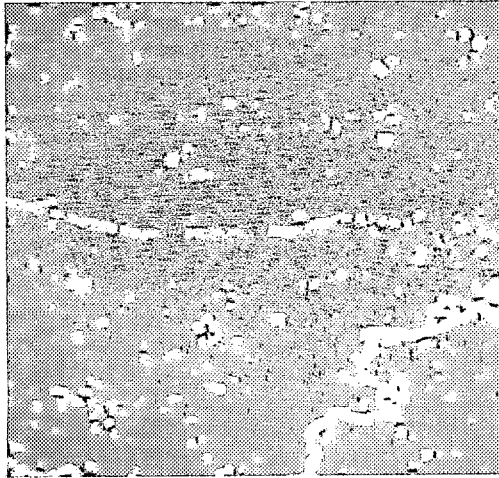
$$\begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{matrix}$$



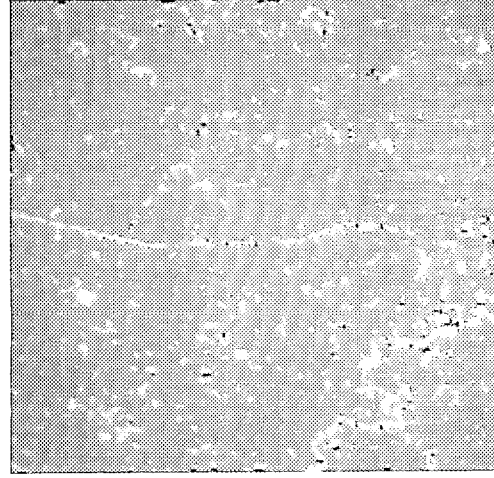
2



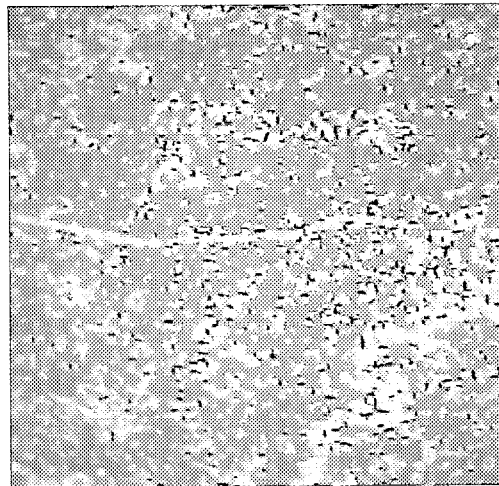
3



4



5



6

FIG. 2. — Région du canal Bakhra et de la rivière Ghagghar : canal 6 Landsat MSS, photo d'écran.

FIG. 3. — L'image précédente traitée par l'écart type local

FIG. 4. — Dilatation de la figure 3

FIG. 5. — Érosion de la figure 3

FIG. 6. — Ouverture de la figure 3

A partir d'une matrice 3×3 on peut fabriquer huit filtres directionnels (généralement identifiés par les noms de la rose des vents). Chacun d'entre eux rehausse les contours dans la direction et dans le sens choisis par l'intermédiaire des coefficients de la matrice de convolution (PRATT, 1978).

Transformations morphologiques en teintes de gris

Nous allons définir les transformations morphologiques utilisées au cours de cette étude.

Il s'agit de transformations d'images dites « en teintes de gris » par opposition aux transformations d'images dites « binaires » (en blanc et noir) qui furent à l'origine des développements de la Morphologie Mathématique et qui sont essentiellement définies comme des transformations ensemblistes (les ensembles étant en blanc sur l'image et le fond en noir). Comme il n'est pas question de décrire ici les bases théoriques des concepts de la Morphologie Mathématique (J. SERRA, 1982), nous nous contenterons de donner des définitions moins générales, mais appliquées à l'image numérique digitale en teintes de gris.

Toutes les transformations morphologiques sont définies à l'aide d'un élément structurant choisi par l'opérateur : hexagone, triangle, dodécagone, segment... La taille de cet élément est définie par son rayon (l'unité correspondant à la distance entre deux points voisins de la trame). Lors des transformations, l'élément structurant parcourt la totalité de l'image.

La Dilatation

La Dilatation d'une image en teintes de gris à l'aide de l'élément structurant B consiste à affecter les pixels de l'image intérieure à B de la valeur *maximum* de la fonction en teintes de gris rencontrée sur B et sa frontière. On dira que la Dilatation élargit les « pics » et comble les « vallées ». La dilatation peut être itérée jusqu'à ce que l'image ait une valeur constante (la valeur maximum).

Sur l'exemple de la figure 4, on a appliqué une Dilatation à l'aide d'un hexagone de rayon 1 à l'image de la figure 3. La rivière et le canal, ainsi que les points clairs isolés, ont épaissi et la rivière (en rouge) se distingue nettement du canal (en vert) car le contraste avec son environnement a été accentué par la Dilatation.

L'Érosion

L'Érosion d'une image en teintes de gris à l'aide d'un élément structurant B consiste à affecter les pixels de l'image intérieure à B de la valeur *minimum* de la fonction en teintes de gris rencontrée sur B et sa frontière. On dira que l'Érosion abaisse les « pics » et élargit les « vallées ». L'Érosion peut être itérée jusqu'à ce que l'image ait une valeur constante (la valeur minimum). Sur l'exemple de la figure 5, on a appliqué une Érosion à l'aide d'un hexagone de rayon 1 à l'image de la figure 3. La rivière et le canal ont été amincis et coupés par endroits, et les points isolés sont devenus presque invisibles.

L'Ouverture

L'Ouverture d'une image en teintes de gris à l'aide d'un élément structurant B consiste à opérer une Érosion de l'image par B, suivie d'une Dilatation par \bar{B} , élément structurant symétrique de B (identique à B si B est symétrique par rapport à son centre comme c'est le cas de l'hexagone). On dira que l'Ouverture rase les « pics » sans modifier les « vallées ». L'Ouverture itérée une fois ne modifie plus l'image. On appelle cette propriété l'*idempotence*.

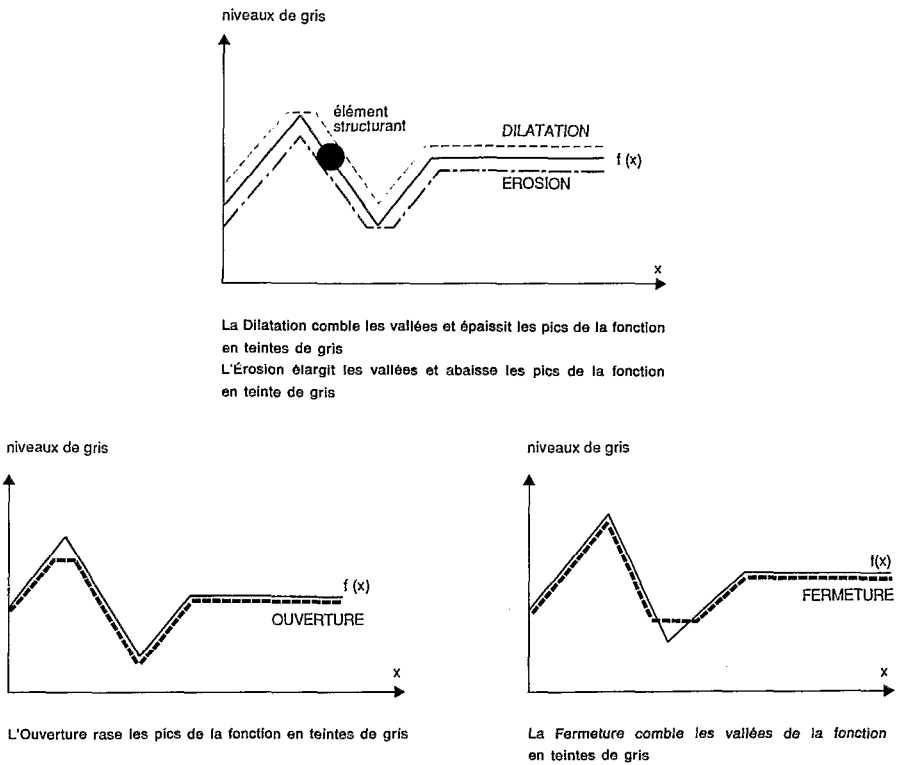


FIG. 7.

Figure 6 : on a appliqué une Ouverture à l'aide d'un hexagone de rayon 1 à l'image de la figure 3. La rivière et le canal sont toujours visibles sans avoir changé de taille, mais leur contraste avec le voisinage a été atténué.

La Fermeture

La Fermeture d'une image en teintes de gris à l'aide d'un élément structurant B consiste à opérer une Dilatation de l'image par B suivie d'une Érosion par \hat{B} , élément structurant symétrique de B . On dira que la Fermeture comble les « vallées » sans modifier les « pics ».

Comme l'Ouverture, la Fermeture est idempotente. On trouvera dans le chapitre suivant un exemple de Fermeture.

La figure 7 schématise les différentes transformations appliquées à la fonction $f(x)$, fonction en teintes de gris.

L'IDENTIFICATION DES RÉSEAUX

Nous avons cherché à mettre en évidence le plus grand nombre possible de linéaments au moyen de transformations appliquées à la fenêtre étudiée.

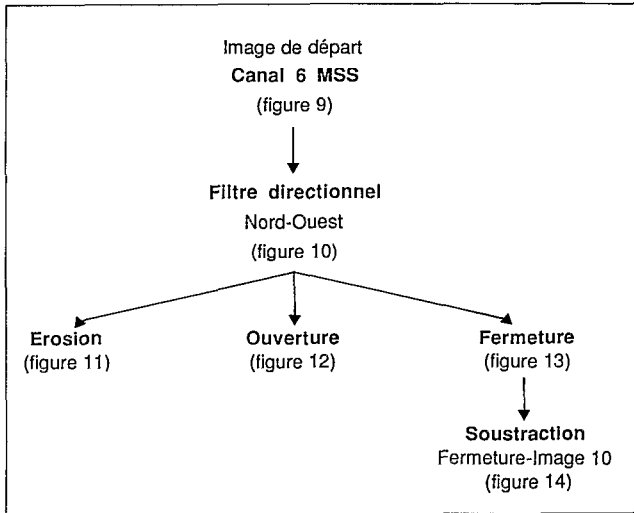


FIG. 8.

Cette fenêtre est située dans la même vue Landsat MSS à proximité immédiate de celle qui nous a servi d'exemple ci-dessus, et contient un grand nombre de réseaux divers : canaux de différentes largeurs, bordés ou non de routes et chemins, rivière Ghagghar, routes revêtues, chemins de terre (toutes informations partiellement fournies par les cartes disponibles) et parce que s'y trouvent plusieurs indices, relevés sur le terrain et en partie figurés sur les cartes sous la rubrique « talus » de canaux d'irrigation anciens.

L'absence de contraste dans toutes les bandes spectrales empêche une bonne visibilité des ensembles linéaires et l'hétérogénéité radiométrique de l'environnement masque leur continuité : il est donc nécessaire de rehausser les contours avant l'application des transformations morphologiques.

L'image traitée à l'origine est celle du canal 6, choisi parce qu'il présente la gamme de valeurs radiométriques la plus large et qu'il permet de mieux discriminer les différents types de texture de végétation : c'est sur le canal 6 que l'on peut distinguer, même à première vue, le plus grand nombre de linéarités.

On a ensuite tenu compte de l'orientation générale des axes régionaux (rivière, linéaments divers, axes dunaires) dans le choix de certaines opérations : cette orientation régionale est approximativement Nord-Est/Sud-Ouest ; afin de rehausser les contrastes de l'image de base, on a appliqué un filtre directionnel perpendiculaire à cette direction, soit le filtre dit Nord-Ouest cité plus haut (fig. 10) : sur cette restitution en noir et blanc, certains réseaux sont alors renforcés en noir (valeurs minimales), d'autres sont renforcés en blanc (valeurs maximales). On constate alors que les linéaments courts ou faiblement perceptibles sont représentés en valeurs basses alors que les réseaux les plus importants apparaissent en valeurs hautes. Sachant que les linéaments importants résisteraient à toutes les transformations morphologiques (même celles qui affectent les valeurs hautes), nous avons choisi d'appliquer des traitements morphologiques opérant sur les valeurs basses, afin de renforcer ces linéaments peu distincts et de « nettoyer » le fond de l'image des valeurs hautes isolées, des valeurs basses non significatives, et même des réseaux importants connus, donc sans intérêt ici.

Afin de renforcer l'effet des transformations morphologiques, nous avons choisi de les pratiquer au moyen d'un élément structurant lui-même choisi en fonction de l'existence de la direction régionale.

L'élément structurant est ici un segment directionnel parallèle à la structure régionale, ce qui accentue les linéarités dans cette direction sans empâter le trait.

Diverses procédures enchaînant plusieurs transformations morphologiques ont été expérimentées : nous présentons ici celles qui se sont révélées les plus efficaces pour atteindre l'objectif.

L'Érosion (fig. 11) élargit les linéaments de valeurs basses (réseaux sombres) et met ainsi en évidence des linéaments fins peu distincts sur la figure 10 : apparaissent ainsi un alignement dont certains éléments sont connus pour être des traces de canal ancien et des linéaments non indiqués sur les cartes topographiques, notamment dans le secteur dunaire.

L'Ouverture (fig. 12) supprime les hautes valeurs isolées et lisse le fond, rendant tous les linéaments plus distincts, notamment le même alignement que précédemment (canal ancien présumé) et de nouveaux linéaments non identifiés, y compris dans le secteur dunaire.

La Fermeture (fig. 13) accentue la continuité des alignements de basses valeurs (réseaux sombres) sans modifier les alignements de valeurs hautes (réseaux clairs) ; le fond est nettoyé par élimination des basses valeurs isolées.

La soustraction Fermeture moins image gradient Nord-Ouest (fig. 14) extrait les valeurs les plus basses : elle a donc pour effet d'accentuer les linéarités sombres. Un grand nombre de réseaux apparaissent avec une continuité que nous considérons comme satisfaisante, notamment, comme précédemment, le canal ancien déjà connu, ainsi que de nouveaux linéaments non identifiés.

Ces trois procédures ont donné des résultats intéressants pour des raisons différentes : dans le premier cas (Érosion) les linéaments apparaissent par élargissement des alignements sombres ; dans le second cas (Ouverture), les linéaments (les mêmes, plus quelques autres) apparaissent par contraste avec un fond lissé : ces deux traitements n'accentuent pas la continuité de la rivière Ghagghar, par exemple (continuité que nous savons bien réelle), mais ils mettent en évidence des réseaux très peu distincts sur l'image de départ, notamment dans le Sud et le Sud-Est de l'image et dans le secteur dunaire. La troisième procédure (Fermeture puis soustraction) accentue la continuité de réseaux situés au Nord et à l'Ouest de la rivière Ghagghar et celle de la rivière elle-même, complétant ainsi notre information sur l'ensemble des réseaux ; en revanche, elle révèle moins de linéaments dans la zone dunaire, qui est celle qui nous intéresse le plus : l'image est plus lisible (réseaux plus continus et plus fins) mais certains linéaments du secteur dunaire visibles sur les images précédentes (fig. 10 à 13) ont disparu.

CONCLUSION

Le but de l'opération était de rechercher, parmi le plus grand nombre de linéaments ou de réseaux révélés, ceux qui sont susceptibles de correspondre aux canaux anciens des archéologues. Sur le plan du traitement de l'image, le but est atteint. En effet, nous avons pu mettre en évidence :

a) des linéaments qui ne figurent pas sur les cartes topographiques actuelles : ils sont présumés appartenir à des classes non fonctionnelles des réseaux existants, c'est-à-dire avoir de l'intérêt pour les archéologues ;

b) un alignement continu dont seuls quelques éléments étaient connus pour être les traces d'un canal ancien : les linéaments de même type, mis en évidence ailleurs dans l'image, sont alors susceptibles de correspondre aux tracés de canaux anciens. La juxtaposition des informations sur ces anciens tracés issues du

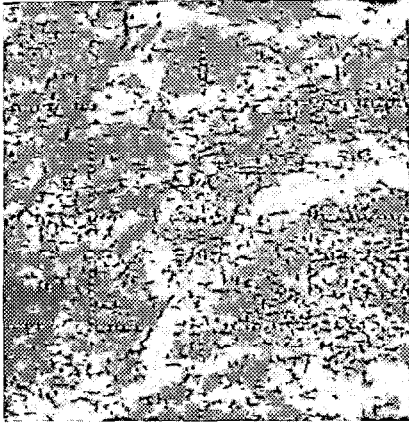


FIG. 9. — Région de Panihari, image de départ, canal 6 Landsat MSS

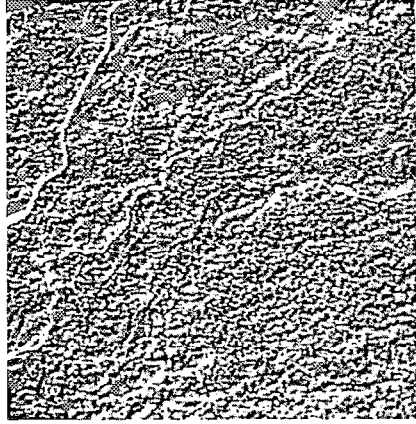


FIG. 10. — Image précédente traitée par un filtre directionnel Nord-Ouest

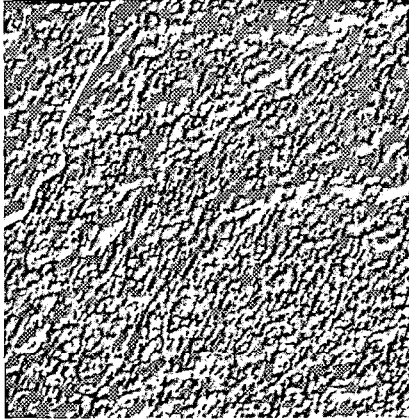


FIG. 11. — Érosion de la figure 10

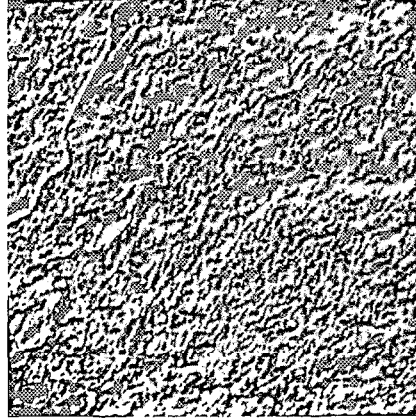


FIG. 12. — Ouverture de la figure 10



FIG. 13. — Fermeture de la figure 10

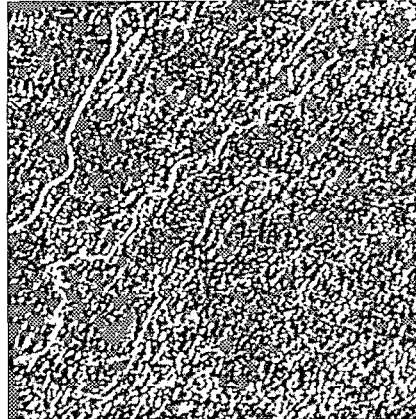


FIG. 14. — Soustraction de l'image 13 et de l'image 10

traitement d'image et des présomptions sur la présence de canaux anciens sur les aires dunaires en relief, permet aux archéologues de porter plus particulièrement leur attention sur les secteurs combinant aires dunaires et linéaments révélés.

Cependant, si nous avons pu mettre en évidence un grand nombre de linéaments auparavant peu distincts, nous n'avons pas effectué, sur une fenêtre aussi complexe, de discrimination automatique entre les différents types de réseaux. Un tel classement exigerait l'élaboration de procédures spécifiques.

Les lignes qui précèdent constituent un exemple de ce qu'il est possible de réaliser en traitement d'images spatiales. D'autres traitements avaient été expérimentés, avec des résultats intéressants et utiles, notamment la sélection de filtres directionnels différemment orientés pour constituer l'«image de départ». La gamme des transformations morphologiques est vaste (Érosion, Dilatation, Ouverture, Fermeture sont les opérations de base) et on peut choisir la forme des éléments structurants isotropes, faire varier dans six directions différentes l'élément structurant linéaire : les enchaînements possibles sont donc en nombre pratiquement illimité et la recherche consiste alors à sélectionner les enchaînements efficaces en fonction du but à atteindre : les travaux sur les applications des transformations morphologiques à des images satellitaires n'en sont qu'à leurs débuts ...

BIBLIOGRAPHIE

FRANCFORT (H.-P.) (sous la direction de), 1985. — *Prospections archéologiques au Nord-Ouest de l'Inde, Rapport Préliminaire*, 1983-1984, Mémoire n° 62, Recherches sur les Civilisations, Paris.

PRATT (W.), 1978. — *Digital Image Processing*, John Wiley and Sons, New York.

SERRA (J.), 1982. — *Image Analysis*, Academic Press, Londres.

Notes

- (1) Menées par l'U.P.R. n° 315 du CNRS sous la direction de H.-P. FRANCFORT, archéologue, dans le cadre de la Mission Archéologique Française en Inde.
- (2) Effectués avec les moyens développés par l'Atelier de Télédétection de l'ORSTOM à Bondy.