

EXTRACTION DE RESEAUX LINEAIRES A PARTIR DES IMAGES SPOT. EXEMPLE PRIS DANS UNE REGION SEMI-ARIDE : LE NORD-OUEST DE L'INDE

Françoise DEBAINE

I. PROBLEMATIQUE GEO-ARCHEOLOGIQUE

Cette étude a été conduite dans le cadre d'une prospection géo-archéologique menée depuis 1983 dans la zone sub-aride du nord-ouest de l'Inde, dans l'Etat d'Haryana (fig. 1), par l'UPR n°315 du CNRS ("Archéologie de l'Asie centrale") et par l'Archaeological Survey of India. Cette prospection, à laquelle coopèrent des chercheurs appartenant à plusieurs disciplines, l'archéologie, la géographie, la géologie, a pour objectif général la reconstitution de l'histoire du peuplement, de son implantation agricole et en particulier, de ses rapports avec les ressources en eau (Francfort, 1985).

Une démarche méthodologique fondée sur l'exploitation des données satellitaires est développée depuis 1985, en collaboration avec l'Unité de Télédétection et l'UR 3J du Département MAA de l'ORSTOM. Commencée avec des images Landsat MSS (Debaine, Mering, Poncet, 1988), l'étude se poursuit depuis novembre 1987 sur des données multispectrales Spot. L'analyse de ces images doit permettre de préciser les liens existant entre les traces de paléo-écoulements naturels, les vestiges d'irrigations anciennes et l'occupation humaine marquée par la présence d'une forte concentration de sites archéologiques protohistoriques et historiques.

La période protohistorique (3ème - 2ème millénaire) est celle de la civilisation de l'Indus (ou harappéenne) qui a connu un développement considérable, comparable à celui de la Mésopotamie ancienne. Cette période est suivie de siècles mal connus qui précèdent la phase de l'histoire ancienne (5ème siècle avant J.-C. - 8ème siècle après J.-C.), marquée principalement par quelques dynasties célèbres, celle des Mauryas et celle des Kouchans, puis des Guptas. L'avènement des dynasties musulmanes marque le début du moyen-âge que l'on étire jusqu'au dernier Moghol, au 18ème siècle.

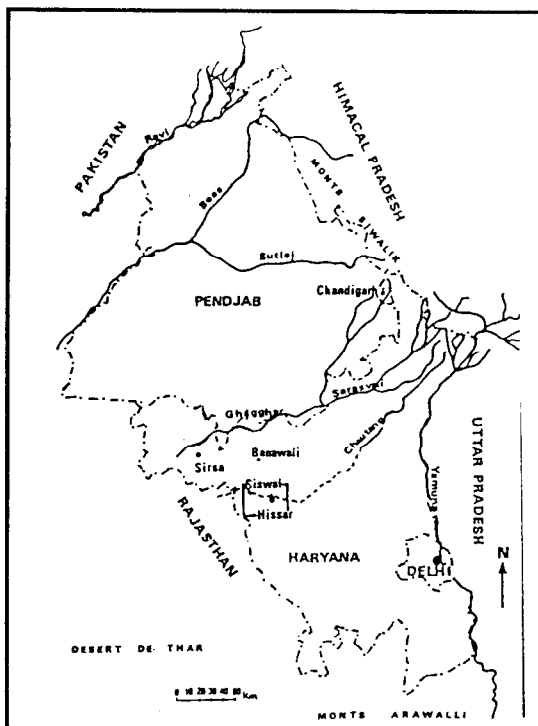


Figure 1 Situation de la région étudiée dans le N. - O. de l'Inde

Le problème de la mise en valeur de la région se pose depuis les années 1940-1950. Les variations du peuplement dans le temps et dans l'espace ont jusqu'à présent été mises en relation avec les perturbations du réseau hydrographique, les variations de régime et les divagations de grands cours d'eau issus de l'Himalaya, cours d'eau aujourd'hui asséchés et dont les traces apparaissent très distinctement sur les images satellitaires Landsat et Spot.

De nouvelles données apportées par trois campagnes de terrain effectuées au Rajasthan et en Haryana par la Mission Archéologique Française en Inde (collaboration entre l'UPR n°315 et l'Arch. Surv. of India) ont conduit à la remise en question de ces théories. Les résultats de l'étude sédimentologique permettent en effet d'affirmer que ces puissantes rivières s'écoulaient à la fin de la période glaciaire, mais se sont asséchées progressivement alors que les conditions climatiques devenaient semi-arides. Ces cours d'eau ne pouvaient donc en aucun cas assurer à l'époque protohistorique, époque des premiers établissements humains importants, un approvisionnement en eau permanent de la région (Francfort éd., pp. 11-31). Les sites archéologiques que l'on trouve dans la plaine, sites dont la taille révèle l'existence de moyens économiques relativement importants devaient cependant bénéficier d'un apport d'eau régulier et abondant. L'étude des graines retrouvées dans les échantillons de sols prélevés sur les sites protohistoriques montre par ailleurs une abondance de céréales d'hiver qu'il n'est possible d'expliquer que par un apport d'eau artificiel après la mousson, les conditions climatiques étant, nous l'avons dit, à peu près identiques à ce qu'elles sont actuellement, aucun indice ne validant l'hypothèse d'une augmentation significative des précipitations à l'époque protohistorique, comme cela a été souvent suggéré.

Dans ces conditions, la question qui se pose est de savoir si des réseaux d'irrigation n'auraient pas existé dans cette région du nord-ouest de l'Inde dès le 3ème millénaire.

Certains indices permettent déjà d'étayer cette hypothèse. Comment expliquer en effet, compte tenu du milieu, la dispersion d'un grand nombre de sites archéologiques loin des bords des rivières asséchées et hors des limites des zones inondables par ces mêmes rivières (Francfort, 1985, pp.55-65), sinon par l'existence d'une autre source d'approvisionnement en eau ? Les caractères pédologiques des sols enterrés sous les sites protohistoriques attestent dans plusieurs cas la mise en valeur de ces sols par l'irrigation. Mais de quel type d'irrigation s'agissait-il : d'inondations dirigées avec une accumulation saisonnière des eaux de pluie visant à les préserver tout au long de la saison sèche ? ou bien d'un système plus évolué comparable au système actuel et à ceux qui existaient en Mésopotamie ou en Asie Centrale à la même époque ?

C'est à cette étape de la recherche que les données satellitaires sont apparues comme susceptibles d'apporter de nouvelles données.

II. L'APPORT DES IMAGES SATELLITAIRES

Nous ne possédons pas, pour le moment, de preuves de l'existence de systèmes d'irrigation à l'époque protohistorique. Ces preuves seraient bien sûr apportées par la découverte de canaux datables de façon fiable, mais les prospections de terrain se sont sur ce point révélées infructueuses. Trop partielles, à des échelles inadéquates, les données fournies par les moyens d'investigation classiques tels que les cartes, les documents d'archives ou le terrain sont très souvent inutilisables. En l'absence des photographies aériennes (non diffusées aux étrangers), les images satellitaires fournissent des informations que nous ne pourrions donc obtenir autrement.

Notre objectif est, par des traitements numériques, de mettre en évidence des linéaments interprétables comme étant des chenaux d'écoulement artificiels, de connaître leur forme, leur tracé, leur extension à l'échelle locale et régionale, et de rechercher si ces traces constituent un réseau identifiable.

Des vestiges de canaux d'irrigation datant du moyen-âge et du 19ème siècle, souvent connus par ailleurs grâce aux cartes anciennes et aux textes persans ou britanniques, ont été découverts en surface. Ils sont révélés par la présence de levées sableuses, vestiges des sédiments évacués d'année en année lors des curages (Francfort éd, 1985, pp. 39-41). Ces levées sont plus ou moins arasées selon l'ampleur des bouleversements qui ont affecté le milieu depuis l'abandon du canal (mise en culture intensive, nouvelles irrigations, nivellements) ou selon le type de construction de celui-ci (présence ou absence de terrassement). Un canal de ce type a pu être mis en évidence à la suite du traitement d'une image Landsat MSS (Debaine, Mering, Poncet, 1988). Il était intéressant d'essayer de mettre ces tracés en évidence, même s'il s'agit de vestiges d'époques plus récentes car ils peuvent être les indicateurs d'états antérieurs de l'occupation du sol. Il existe en effet une certaine permanence des tracés, les plus anciens ayant été fréquemment réutilisés, après des périodes d'abandon plus ou moins longues. Des coupes profondes ont permis de mettre en évidence la superposition de vestiges de chenaux d'écoulements entre des buttes de déblais (Francfort éd., 1985, pp. 37-41).

Pour la période historique ancienne, des canaux (datables par la thermoluminescence, grâce à des tessons de poteries, ont été observés sur des coupes de sédiments, enfouis dans une dépression à fort alluvionnement. Mais, dans la plupart des cas, tant pour la protohistoire que pour l'histoire, les niveaux des sols des sites d'implantation anciens montrent une faible sédimentation et par conséquent un enfouissement peu important (50 cm à 1 mètre). Cette faible épaisseur des sédiments post-dépositionnels rend pertinente la quête de canaux d'irrigation anciens, même protohistoriques, en particulier lorsque la région n'a pas été trop remaniée par des mises en cultures récentes. Les paléo-chenaux naturels ne doivent pas non plus être ignorés : tracés privilégiés des écoulements, ils ont été parfois réaménagés à des fins d'irrigation.

Notre objectif est ainsi de mettre en évidence sur les images satellitaires les canaux d'irrigation anciens, quel que soit leur âge, aucun critère ne permettant d'ailleurs de les dater d'après les images, et les chenaux d'écoulement naturels, quelle que soit leur taille (largeur, longueur).

Le manque d'informations concernant la signature spectrale spécifique de ces différents objets nous a conduit à adopter dans un premier temps des méthodes de traitement d'image exploitant les informations relatives à leur forme. En effet, si nous admettons aisément que les canaux d'irrigation ont toujours la même forme, il n'en va pas de même de leur signature spectrale qui peut être totalement différente selon l'époque considérée, ou varier à l'intérieur d'une même époque. Le seul critère de reconnaissance fiable et robuste que nous ayons est donc d'ordre morphologique : les canaux d'irrigation anciens sont linéaires, parfois discontinus, la rectilinéarité caractérisant plutôt les canaux actuels ou récents, les sinuosités des canaux anciens ou des chenaux naturels.

Cette démarche implique la prise en considération, au départ, de l'ensemble des linéaments, c'est-à-dire des canaux anciens, mais aussi des canaux actuels et des voies de communication (routes, chemins, et voies ferrées), ainsi que les linéaments naturels, les accumulations sableuses de forme linéaire notamment. Ces réseaux n'ayant pas de signature spectrale spécifique et stable, ils ne peuvent être éliminés *a priori*. Comment différencier en effet, si l'on ne tient compte que de l'information spectrale, un canal du 19^{ème} siècle abandonné, révélé par des levées sableuses, d'un canal actuel à sec, comme cela arrive à certaines période de l'année, ou encore d'un chemin ? Comment différencier un canal très ancien, d'accumulations sableuses naturelles ? Nous avons préféré ne pas réduire l'information *a priori* et extraire l'ensemble des linéaments, indépendamment de leur orientation, de leur taille (largeur, longueur), de leur signature spectrale, de leur voisinage et de leur âge, indépendamment de tout élément suggérant une interprétation fonctionnelle. Celle-ci n'intervient qu'une fois mis en évidence les linéaments présents sur l'ensemble de l'image. Les voies de communication, les canaux d'irrigation actuels sont rapidement identifiés par une comparaison de l'image traitée aux cartes topographiques au 1/50000^{ème} datant des années 1950 - 1960. Des cartes topographiques anglaises plus anciennes, dites au quarter inch (1/253 000^{ème} environ) et au one inch (1/63 000^{ème} environ), sont parfois utilisées, pour identifier des réseaux d'irrigation aujourd'hui abandonnés, datant du début du 20^{ème} siècle, voire de la fin du 19^{ème} siècle. Nous espérons ainsi faire apparaître les traces de vestiges plus anciens de l'occupation du sol et les mettre ultérieurement en relation avec les observations de terrain. Dans une première phase d'identification de ces traces linéaires non reconnues, l'étude des formes fournit des informations particulièrement intéressantes et permet, avant le parcours sur le terrain et avant de pouvoir interpréter de façon parfaitement fiable la réponse spectrale des objets, d'établir une

typologie.

Par l'étude de la forme, nous entendons non seulement la caractérisation de la géométrie des objets étudiés, par exemple leur longueur, leur largeur, leur surface, mais aussi celle des structures, leur répétitivité, la distribution de la taille des éléments qui les composent ou leur plus ou moins grande dispersion. Cette étude comprend aussi l'analyse de l'environnement des objets et de leur voisinage, qui peut être défini par la présence ou l'absence d'autres objets, et par la mesure des distances les séparant.

Ainsi, l'étude de chacun des linéaments mis en évidence et celle de leur positionnement les uns par rapport aux autres ou par rapport à d'autres éléments constitutifs du paysage et de l'image, les canaux et les réservoirs d'eau actuels, les villages, les sites archéologiques, les lits - reliques, les dunes, par rapport à la topographie ou aux sols, conduisent à une première discrimination et parfois même à une interprétation fiable de ces objets. C'est en suivant cette approche, en étudiant les linéaments individuellement, mais aussi et surtout en tant qu'éléments constitutifs d'un système ayant une logique propre, et dont les composantes sont à envisager dans leur rapport de localisation et de fonctions réciproques, qu'il est possible de tirer des enseignements intégrables dans une explication générale du peuplement de la région.

Les données qui auront été extraites et vérifiées sur le terrain seront ensuite intégrées au corpus des connaissances géo-archéologiques. Il faudra en particulier ajouter une dimension temporelle précise aux informations obtenues à partir des images satellitaires, chaque élément du système ayant une chronologie et une dynamique propre. Cela reviendra à mettre en relation les sites ou groupes de sites datés et décrits avec les réseaux qui leur sont associés et à dater ces réseaux afin d'obtenir une restitution diachronique des aménagements régionaux successifs.

III. LE TRAITEMENT DES IMAGES

Nous avons envisagé la mise en évidence et une première discrimination de l'ensemble des linéaments présents sur l'image à partir de critères tels que la forme, la structure et le voisinage. Nous exploitons l'ensemble de ces informations en utilisant les outils et les concepts de l'analyse quantitative d'image, en particulier ceux de la Morphologie Mathématique (Serra, 1982). Cette méthode n'est pas fondée sur les valeurs prises par un pixel donné de l'image. Elle prend en compte les notions de structures spatiales de l'image : les objets sont considérés comme des ensembles de pixels et l'on peut ainsi étudier leur forme et les relations qui existent entre eux.

Les transformations morphologiques binaires et en teintes de gris permettent de rendre compte de la forme des objets par référence à un modèle géométrique simple, de forme parfaitement définie, appelé "élément structurant" et qui peut être, par exemple, selon le type d'information recherché, un segment, un hexagone, etc. Il est possible grâce à ces outils de mesurer les objets étudiés : mesure de longueur, de surface, évaluation du nombre de connexités ou de trous. Il est possible également d'en étudier la structure, de mesurer les distances qui les séparent et d'approcher ainsi, de façon quantifiée, leur voisinage. Il s'agit d'adapter l'ensemble de ces outils à la recherche des linéaments et de produire des séquences de traitement d'images en fonction de l'objectif thématique tel qu'il a été défini.

Les procédures de transformation de l'image que nous présentons ici ont pour but la mise en évidence des linéaments, leur rehaussement et leur extraction. Cette opération consiste à les isoler du reste de l'image de façon à ce qu'ils apparaissent sur un fond rendu homogène. Une analyse quantitative des paramètres caractérisant les linéaments (taille, connexité, structure, voisinage), ne peut être envisagée en effet que lorsque tous les autres composants de l'image ont été éliminés. La perte d'information qui en résulte est largement compensée par la possibilité de quantifier l'information.

Les procédures mises au point ont été testées sur des parties de l'image de 256×256 pixels¹, choisies pour leur richesse en linéaments artificiels (routes, chemins, canaux d'irrigation) et naturels (traces de paléo-écoulements) (fig.9). La validation des résultats a été effectuée à l'aide des cartes au 1/50 000° et des relevés de terrain.

III.1. Les transformations morphologiques de base

Nous présentons rapidement et de façon très schématique les effets des transformations de base que nous avons utilisées ; on trouvera dans les ouvrages concernant l'analyse d'image leurs définitions et leurs propriétés mathématiques (Serra, 1982).

Lorsque ces transformations morphologiques sont appliquées à des images binaires (images dont les pixels prennent la valeur 0 ou 1), les objets sont considérés comme des ensembles sur un fond.

La dilatation a pour effet d'augmenter la surface des ensembles, de connecter les parties disjointes et de lisser les contours (fig.2). L'érosion binaire, au contraire, entraîne la réduction de la surface des ensembles ; elle en lisse également les contours (fig.3).

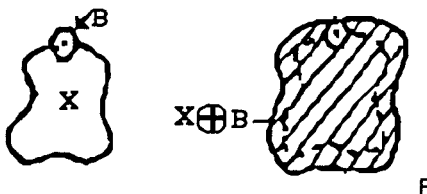


Figure 2- Dilatation binaire



Figure 3- Erosion binaire

Les transformations morphologiques sont aussi appliquées à la fonction en teintes de gris (FTG). Cette dernière peut être assimilée à un relief, chaque pixel étant caractérisé non par une altitude, mais par une teinte de gris.

On peut alors considérer que les valeurs maximales sont des "pics", et les valeurs minimales des "vallées". Ainsi, la dilatation de la fonction en teintes de gris a pour effet d'élargir les "pics" et de combler les "vallées" (les zones de valeurs maximales s'étendent et les zones de valeurs minimales diminuent) (fig.4).

¹ La trame originale (carrée) a été convertie en une trame hexagonale afin de pouvoir utiliser un élément structurant symétrique tel que l'hexagone.

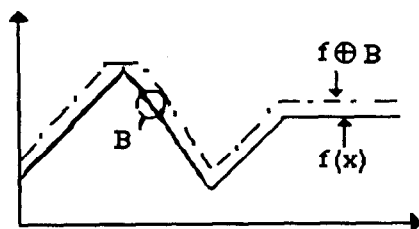


Figure 4 Dilatation de la FTG

L'érosion en revanche, élargit les "vallées" et abaisse les "pics" (les zones de valeurs minimales s'étendent et les zones de valeurs maximales diminuent) (fig.5).

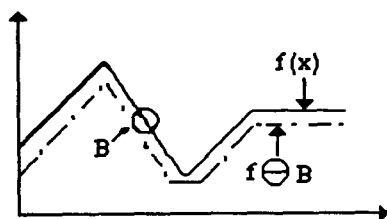


Figure 5 Érosion de la FTG

La fermeture est la combinaison de ces deux transformations : c'est une dilatation suivie d'une érosion. Elle n'a pas d'effet sur les "pics", mais comble les "vallées". Ainsi, les petites zones sombres disparaissent (fig.6).

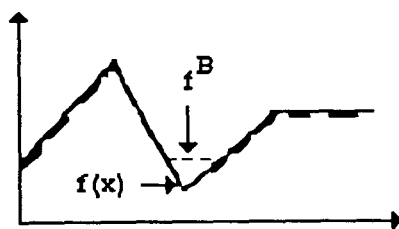


Figure 6 Fermeture de la FTG

Le chapeau-haut-de-forme enfin, est un filtre morphologique qui extrait les "vallées" de la fonction par soustraction de l'image originale à l'image fermée (fig.7).

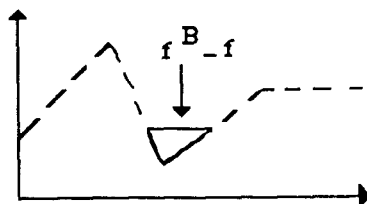


Figure 7 Chapeau-haut-de-forme

III.2. Séquence de mise en évidence de linéaments

Les transformations morphologiques sont ici appliquées à la première composante principale obtenue après transformation de Karhunen Loeve. Nous recherchons en effet une image qui maximise les contrastes radiométriques dans les trois bandes spectrales. Les deuxième et la troisième composante sont intéressantes car elles apportent une information supplémentaire en discriminant certains linéaments entre eux, routes et canaux d'irrigation par exemple (la deuxième composante) ou réseaux naturels et réseaux artificiels (la troisième composante). Mais l'information est cependant toujours partielle et certains linéaments disparaissent. Sur la première composante, l'ensemble des linéaments est plus nettement perceptible que sur les canaux bruts et puisque en un premier temps, nous ne voulons en ignorer aucun, nous l'avons choisie comme image de base des transformations morphologiques.

Sur cette image, (fig.8) l'ensemble des linéaments est caractérisé par les valeurs basses de la fonction en teintes de gris. Il était donc souhaitable d'effectuer une série de fermetures par des segments de droites, dont les orientations varient, puisque nous n'avons pas *d'a priori* sur l'orientation des linéaments que nous voulons mettre en évidence.



Figure. 8 Première composante principale

Nous avons donc pratiqué 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 ou sub-linéaire et de teinte sombre, dans chacune des orientations.

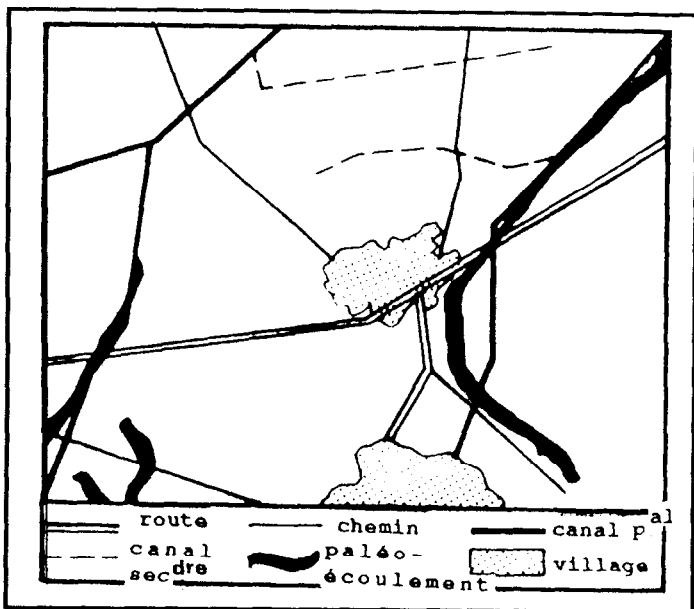


Figure 9 Différents types de linéaments

Ces ensembles ont ensuite été filtrés par soustraction de l'image originale aux six images fermées : nous effectuons une série de six chapeau-haut-de-forme. Selon l'orientation de l'élément structurant, seuls certains linéaments ou certaines parties de linéaments sont restitués (fig.10,11). Les plus épais ont été mis en évidence, mais le filtrage n'a pas permis d'éliminer les ensembles non linéaires.

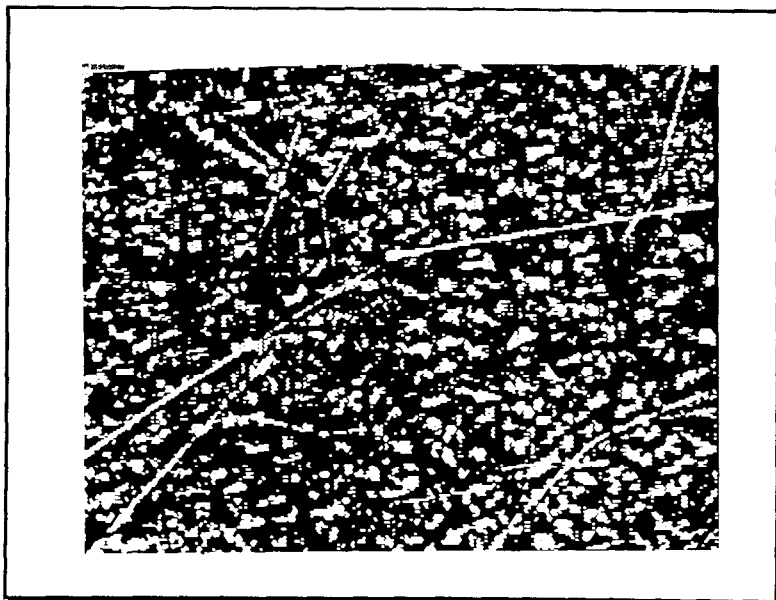


Figure 10 Chapeau -haut -de -forme (90°) sur Fig 8

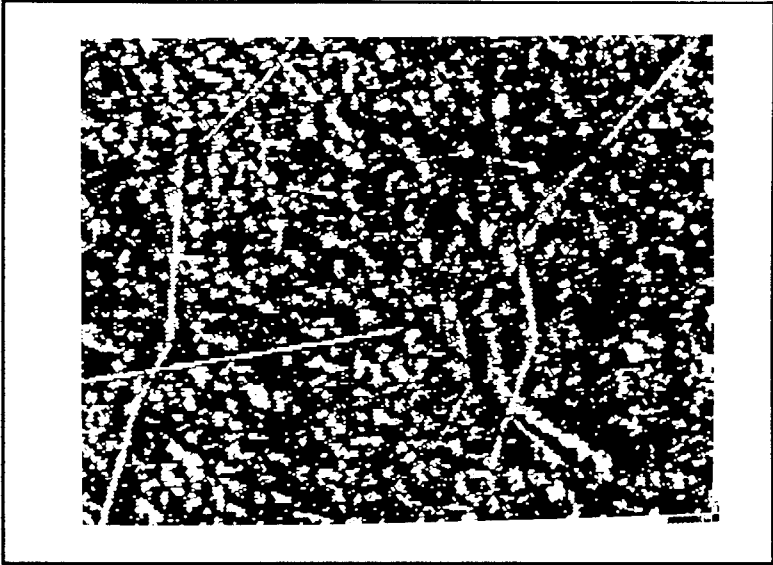


Figure 11 *Chapeau -haut -de-forme (30°) sur fig 8*

III.3. Séquence d'extraction des linéaments

Avec la méthode de reconstruction des composantes connexes, nous avons essayé d'obtenir une image contenant uniquement les linéaments sur un fond uniforme.

III.3.1. Seuillage

Les images transformées par le filtre chapeau-haut-de-forme sont d'abord binarisées. Nous avons tenté de résoudre le problème du seuillage de la manière suivante : nous recherchons le seuil qui délimite le plus grand nombre de linéaments proportionnellement à la surface totale de l'image binaire correspondante.

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

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

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

Pour chaque seuil possible, c'est-à-dire pour tous les niveaux de gris g , nous avons évalué le ratio R_L entre le nombre de configurations linéaires sur l'image et la surface totale. L'idée est de sélectionner le seuil qui maximise ce ratio. 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 :

$$\begin{array}{cccccc} 0 & 0 & & 0 & 0 & \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & & 1 & 1 & \end{array}$$

La figure 14 montre la variation du ratio sur une image en teintes de gris, le chapeau-haut-de-forme (90°). On voit qu'il y a un très petit nombre de seuils possibles, quatre dans ce cas.

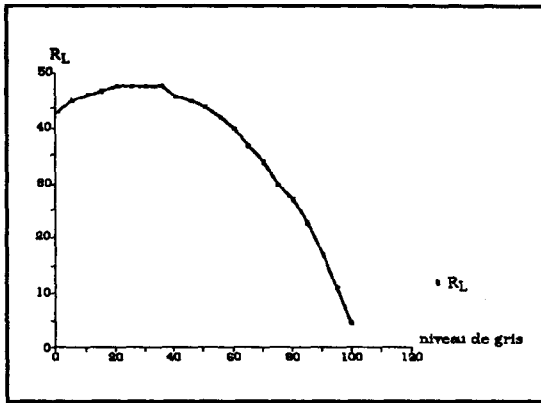


Figure 12 Variation du Ratio R_L

III.3.2. Extraction

L'extraction des linéaments sur les images ainsi binarisées s'effectue en plusieurs étapes. Il s'agit d'appliquer aux images l'algorithme de reconstitution qui se traduit par la séquence de transformations morphologiques suivantes:

$$X_1 = X_0 \ominus B$$

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

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

Les images binaires sont assimilées à un ensemble X_0 , B est un élément structurant hexagonal.

La première transformation X_1 est une érosion. Elle permet d'éliminer les ensembles isolés dont la taille est inférieure à celle de l'élément structurant, ici, un hexagone de taille 2 (Fig. 13).



Figure 13 Erosion sur Chapeau - haut - de - forme (150°)

Les composantes connexes qui n'ont pas été éliminées par l'érosion sont reconstruites par une séquence de dilations ayant pour effet d'augmenter la surface des ensembles et d'en connecter les parties disjointes. Les linéaments ne sont pas dilatés au-delà de leur taille initiale puisque l'on effectue l'intersection de l'ensemble dilaté $X_1 \oplus B$ et de l'ensemble initial X_0 . L'opération est itérée n fois jusqu'à ce que l'image ne soit plus modifiée.

Cette méthode permet de ne reconstruire que les composantes connexes de taille supérieure à celle de l'élément structurant.

L'algorithme est appliqué aux six images chapeau-haut-de-forme. Les linéaments sont ainsi extraits dans chacune des six directions.

Nous faisons ensuite la réunion des trois images reconstruites pour les trois directions de la trame et pour les trois directions conjuguées, le meilleur résultat étant obtenu avec ces dernières.

L'image obtenue restitue l'ensemble des linéaments, mais contient encore, en petit nombre, des ensembles isolés. On calcule alors le diamètre géodésique de chaque composante.

Soit deux points x_1 , x_2 d'un ensemble X , une ligne géodésique x_1, x_2 correspond au plus petit parcours entre x_1 et x_2 , complètement inclus dans X . Le diamètre géodésique correspond à la valeur maximale des distances géodésiques entre deux points quelconques de X .

On élimine, par seuillage les ensembles ayant des petits diamètres géodésiques. Sur l'image, ne demeurent que les ensembles ayant une longueur suffisante, pouvant être assimilés à des linéaments (fig. 14).

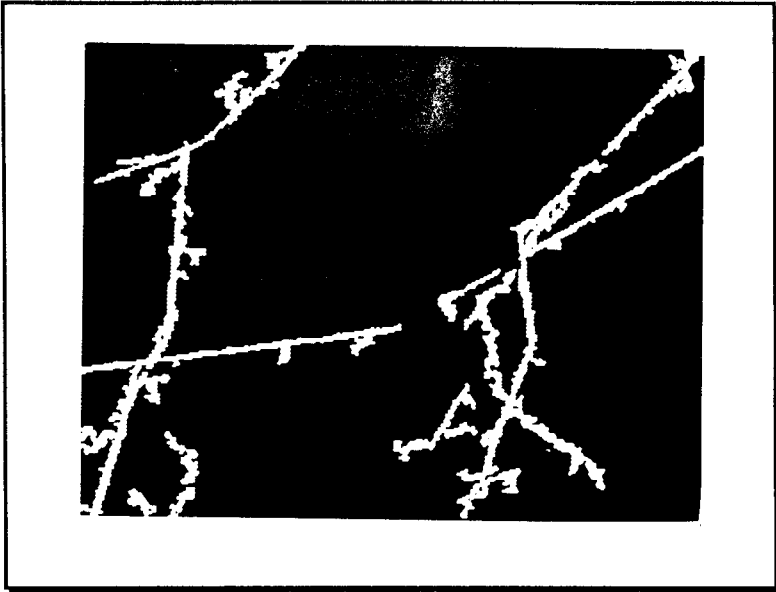


Figure 14 Reconstruction

IV. RESULTATS ET CONCLUSION

Les cinq linéaments principaux, c'est-à-dire les plus épais : des routes bitumées, et des canaux d'irrigation actuels, portés sur la carte topographique au 1/50 000°, ont été correctement extraits (fig.9,14). Lorsque les linéaments ne sont pas distincts de l'environnement (c'est généralement le cas lorsqu'ils traversent des villages), des trous apparaissent dans leur tracé.

Les réseaux linéaires très fins, correspondant sur le terrain à des routes ou à des canaux très étroits, de largeur inférieure à cinq mètres, ont été éliminés par l'érosion. Ils étaient perceptibles sur l'image de base, l'oeil parvenant à reconstituer la continuité de ces linéaments. Trois d'entre eux sur cinq ont pu être mis en évidence à la suite de la transformation chapeau-haut-de-forme, mais ils sont trop fins, trop discontinus ou trop peu contrastés par rapport à leur voisinage pour être extraits par la méthode de reconstruction des composantes connexes.

Ces séquences de transformations morphologiques ont permis en revanche la mise en évidence et l'extraction de linéaments peu perceptibles sur l'image de base et très difficilement repérables sur le terrain. Il s'agit de dépressions de faible profondeur (inférieure à 3 m), de 200 à 300 m de large, parfois révélées par des différences de couleurs du sol entre le fond, sombre (sols limono-sableux) et les bords, plus clairs (fortes proportions de carbonates, kankars). Les observations, coupes transversales et prélèvements d'échantillons, faites *in situ* permettent de penser qu'il s'agit de chenaux d'écoulement naturels aménagés par l'homme à des fins d'irrigation. Ils pourront être datés grâce à une étude pédologique et micromorphologique complémentaire. Une étude approfondie de ces chenaux est en cours ; ils seront notamment mis en relation avec la distribution des sites archéologiques de différentes époques.

La méthode que nous avons utilisée et testée sur plusieurs sous-zones de l'image Spot se révèle donc efficace compte tenu des objectifs que nous nous sommes fixés, à savoir, la mise en évidence et l'extraction, en vue d'une analyse quantitative, de linéaments artificiels et naturels.

Cette méthode sera appliquée à d'autres images, les données panchromatiques de Spot, qui avec une résolution spatiale de 10 x 10 mètres seront encore plus adaptées à la recherche de linéaments fins et à d'autres scènes. Nous étudierons en particulier une région plus aride (le nord-est pakistanais) qui n'a pas été bouleversée par des mises en culture récentes, ce qui rend la recherche de traces d'irrigation anciennes plus aisée. L'effort méthodologique enfin, portera notamment sur le traitement des linéaments fins.

BIBLIOGRAPHIE

- COSTER (M.), CHERMANT (J.-L.), 1985, Précis d'analyse d'images , Editions du CNRS, Paris.
- DEBAINE (F.), MERING (C.), PONCET (Y.), 1988, "La morphologie mathématique en teintes de gris appliquée à la mise en évidence de réseaux", Photo-interprétation, Images Aériennes et Spatiales, 5/2, Technip.
- DEBAINE (F.), MERING (C.), PONCET (Y.), 1988, "Traitements d'image spatiale appliqués à la recherche archéologique : mise en évidence de réseaux en Inde du Nord", Cahiers de l'ORSTOM, Sciences Humaines , 24 (3).
- MERING (C.), DEBAINE (F.), 1988, "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., ACRS, Bangkok, pp. B-2-1 - B-2-8.
- FRANCFORT (H.-P.) éd., 1985, Prospections archéologiques au nord-ouest de l'Inde. Rapport préliminaire 1983-1984 (travaux de la Mission Archéologique Française en Inde n°1), Editions Recherche sur les Civilisations, Paris, "Mémoire" n°62.
- FRANCFORT (H.-P.), 1988, "Le développement protohistorique du Bassin de la Ghagghar (Nord-Ouest de l'Inde), L'Asie centrale et ses rapports avec les civilisations orientales des origines à l'Age du Fer , Actes du colloque franco-soviétique, Paris, 16-17 novembre 1985, Mémoires de la mission archéologique française en Asie centrale, tome 1, Diffusion de Boccard, pp.109-117.
- SERRA (J.), 1982, Image Analysis and mathematical morphology, Academic Press, New-York.