

**Université de Paris I**

**U.E.R. de Géographie**

**APPORTS DE LA TELEDETECTION  
A LA MISE EN EVIDENCE DE RESEAUX  
DANS UN MILIEU ALLUVIAL SEMI-ARIDE**

**EXEMPLES PRIS DANS LE BASSIN DE LA GHAGGHAR. INDE DU NORD-OUEST**



**FRANÇOISE DEBAINE**

**Maîtrise de Geographi**

**Sous la Direction de M. Alain Godard**

**1985 - 1986**

Nous tenons à remercier vivement ici, pour leurs conseils et leur aide précieuse, Mesdames Yveline Poncet et Catherine Méring, ainsi que les membres de l'Atelier de Télédétection de l'ORSTOM qui nous ont ouvert l'accès aux moyens techniques nécessaires à la réalisation de notre travail.

Nous remercions également Messieurs Henri-Paul Francfort et Pierre Gentelle pour les données et documents qu'ils ont bien voulu nous communiquer.

Enfin, nous remercions Monsieur Alain Godard pour avoir assuré la direction et le suivi de cette maîtrise.

## INTRODUCTON

Cette étude a pour objectif la mise en évidence, sur des images spatiales du satellite Landsat, d'écoulements actuels et de paléo-écoulements, naturels ou artificiels.

Elle a pour cadre géographique le piémont himalayen et la plaine qui s'étend à l'Ouest de New - Delhi, entre la Yamuna et le Sutlej, dans la zone sub-aride de l'Inde du Nord, aux limites des états du Rajasthan, de l'Haryana et du Penjab.

Dans cette zone, l'URA 10 du CNRS a entrepris depuis février 1983, en collaboration avec l'Archeological Survey of India, des prospections archéologiques et des études d'environnement ayant pour but la découverte de nouvelles données sur le développement de la civilisation de l'Indus (3è - 2è millénaire) et de celles qui la précèdent et la suivent immédiatement, jusqu'à l'époque moderne. Il est apparu au cours de ces recherches que l'explication de la localisation des sites archéologiques datant de différentes époques, et donc le processus d'occupation humaine devaient être mis en relation avec la mise en valeur du milieu naturel par l'irrigation. La validité de cette démarche a pu être vérifiée, des traces de peuplements anciens sous forme de buttes d'accumulation et des indices ponctuels de l'existence de canaux appartenant à différentes époques (médiévaux et anté-historiques) ayant été retrouvés par l'équipe de l'URA 10.

En l'absence de photographies aériennes et ne possédant que peu d'informations sur les régions

sélectionnées en vue d'une exploration plus approfondie, le recours à la télédétection spatiale et aux techniques de traitement d'image s'est avéré intéressant pour tenter de localiser le tracé précis des canaux d'irrigation dans leur continuité ; approche qui ne pouvait être obtenue, ni par les sources d'information classiques les cartes topographiques par exemple, ni par un parcours sur le terrain. La question posée au géographe est donc ici de rechercher si ces traces constituent un réseau identifiable.

Les questions thématiques qui nous sont posées et le contexte précis dans lequel nous devons les résoudre, en particulier l'absence de "terrain" à l'amont, et pour le moment à l'aval du traitement d'image (notamment pour cause de troubles intérieurs indiens au Penjab) et par conséquent l'impossibilité de vérifier les résultats des transformations réalisées, nous ont amené à développer une recherche méthodologique. Celle-ci fut rendue possible par la mise à notre disposition des moyens techniques de l'Atelier de Télédétection de l'ORSTOM à Bondy (ATOB).

Ainsi, une technique déjà utilisée depuis longtemps dans d'autres disciplines, mais rarement testée sur les images complexes de télédétection spatiale : la Morphologie Mathématique, a paru tout à fait adaptée aux objectifs fixés et à une étude qui privilégie la structuration des objets sur l'image, plutôt que les signatures spectrales. Cette méthode, combinée avec des techniques de détection des contours classiques en analyse d'image, devait permettre de mettre en évidence, et si possible de différencier et d'extraire les réseaux linéaires présents sur l'image de la manière la plus fiable possible, de façon à préparer une éventuelle vérification terrain ultérieure.

Cette recherche méthodologique ne pouvait être entreprise sans connaissance préalable du milieu d'étude. Nous présenterons donc rapidement le cadre régional, en accordant une part importante à l'étude des paléo-environnements. Nous avons utilisé à cet effet les résultats des recherches entreprises dans cette région par la Mission Archéologique Franco-indienne (MAFI) (I.1.). La description et l'analyse des différentes sources d'information en notre possession : sources classiques comme les cartes topographiques à différentes échelles, et images spatiales (I.2.) nous ont permis ensuite de définir les apports respectifs de ces différents documents pour l'étude du milieu au niveau local (I.3.)

Nous aborderons ensuite la description théorique des techniques utilisées et du pas-à-pas des procédures de traitement, expérimentées à partir de deux sous-zones de la scène Landsat MSS (II).

Nous tenterons enfin de formaliser les résultats obtenus, en analysant chaque image en fonction de critères de satisfaction précisément définis. Nous essaierons de déterminer les meilleures procédures pour la mise en évidence, la différenciation et l'extraction des réseaux linéaires.

Nous préférons reporter en Annexe la description méthodologique et les résultats de travaux effectués antérieurement, sur une autre image (image RBV numérisée) afin de ne pas rompre l'unité cette étude.

## I - LE MILIEU D'ETUDE

### 1. Le cadre régional

Nous nous inspirons largement dans cette présentation du cadre régional de notre étude, des résultats des recherches archéologiques, géographiques et géoarchéologiques menées par la Mission Archéologique Franco-indienne, publiés dans un rapport préliminaire en 1985. Ce document nous est en effet apparu comme la source d'information la plus précise et la plus fiable, concernant le milieu étudié.

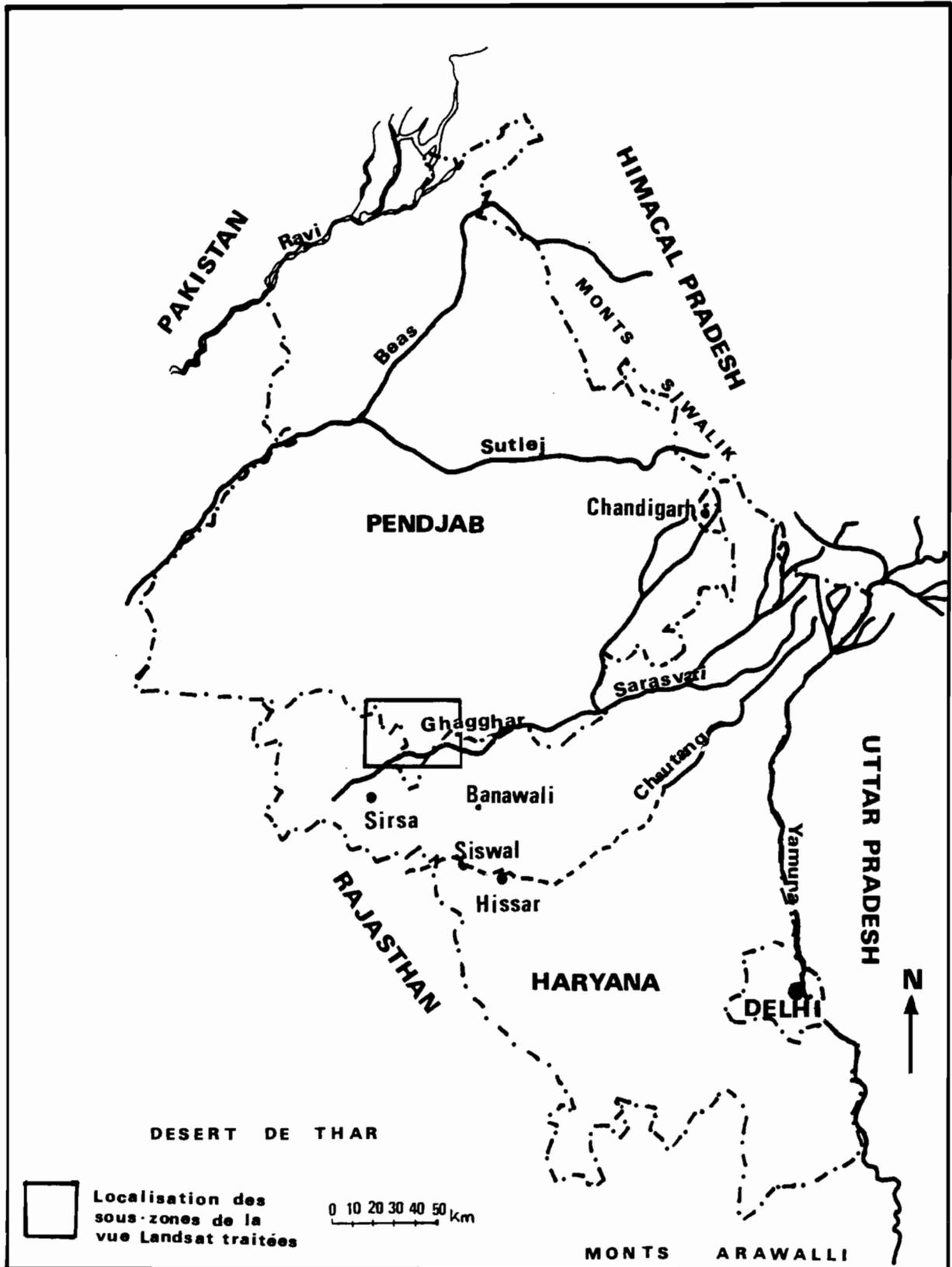
#### 1.1. L'environnement actuel

##### 1.1.1. Géomorphologie

La région considérée est une plaine doucement ondulée du Pléistocène-Holocène, bordée au Nord par les chaînes himalayennes et les Siwalik, au Sud-Ouest par l'extension septentrionale du désert de Thar et au Sud-Est par les monts Arawallis. (fig. 1.)

Cette plaine s'élève progressivement vers le Nord, de 200 à 360 m ; la pente engendrée par ces changements d'altitude, est presque imperceptible jusqu'au piémont de la montagne ; ce qui donne à l'échelle locale une topographie dominée par des formes arrondies et des pentes très faibles, "marquée par des alternances d'ensembles dunaires fossiles, d'altitude relative pouvant atteindre 15 m, et de dépressions dans lesquelles apparaissent les alluvions de la grande plaine du piémont indo-gangétique. Ces alluvions sont mélangées en surface aux sables soufflés par le vent durant l'Ho-

fig. 1. Situation de la zone étudiée dans le Nord-Ouest de l'Inde.

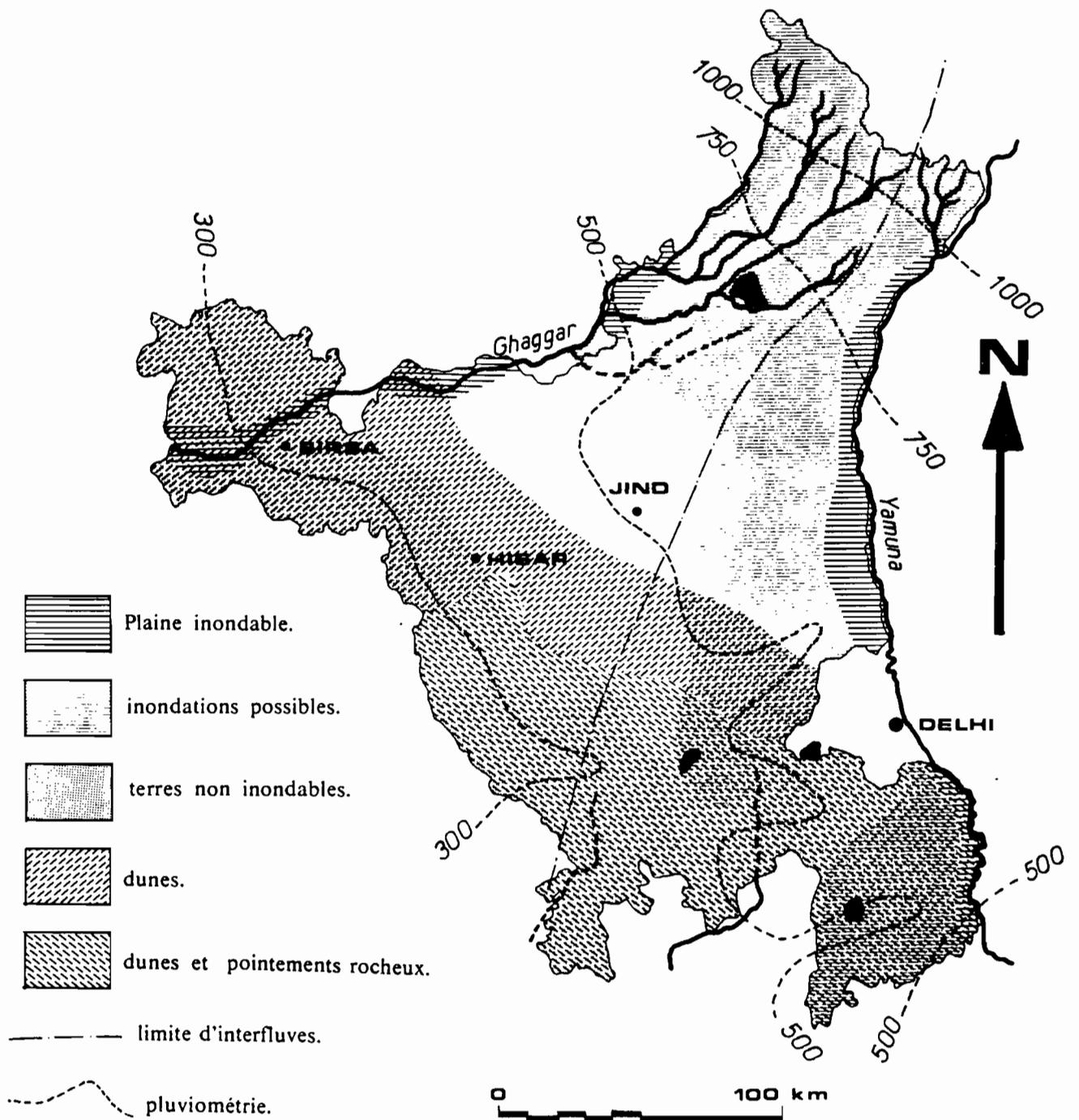


locène pendant la saison sèche et chaude d'été et partiellement reprises dans les ruissellements qui surviennent lors de la mousson de juillet-septembre." (Gentelle, 1985 ; p.33)

On peut distinguer deux grandes unités sédimentaires "dont la limite approximative se situe au Sud de Bhiwani et a une orientation Nord-Ouest - Sud-Est. Au Nord de cette limite, se situent des formations résultant essentiellement d'une sédimentation alluviale, tandis que la partie Sud correspond à l'extension septentrionale du désert de Thar et est constituée en majeure partie de dunes de sable disséquées localement par quelques cours d'eau issus des Arawallis, la Kantli et la Dohan pour les plus importants." (Courty, 1985 ; p.18) (fig. 2 )

A chacune de ces unités géomorphologiques correspond un type de sol. "Des sols à régime aride et très faible développement pédologique caractérisent les zones dunaires et les bordures le long des chenaux (levées). Les premiers ont une texture sableuse (Torripsamments), les seconds sont développés sur des matériaux alluviaux remaniés par le vent (Ustifluvents). Ces sols ont de faibles réserves en eau, une fertilité faible à moyenne et une stabilité structurale très faible. Les sols développés sur les plaines d'inondation anciennes (...) sont de texture plus fine et par conséquent, les réserves en eau plus importantes (calciorthids) , la fertilité plus élevée et la stabilité structurale meilleure. (...) Sur les bassins reliques, en particulier celui de la Ghagghar-Sarasvati, les sols (...) ont des problèmes de drainage et de salinisation. Dans les dépressions affectées par des inondations épisodiques, les sols, peu développés, sont caractérisés par un régime plus humide que sur les levées, et plus riches en éléments fins, et sont par conséquent plus fertiles." (Courty, 1985 ; p.13, 16) (fig.3.)

fig. 2. Province d'Haryana : pluviométrie et différentes formes du relief, d'après P.Gentelle, 1985.



La région étudiée souffre d'un manque de rivières pérennes. Les principales sont actuellement d'Ouest en Est, la Ravi, les Beas, le Sutlej et la Yamuna. Ces cours d'eau exceptés, l'hydrographie de la région est pratiquement inexistante. Toute l'eau qui tombe lors des pluies tend à être absorbée par les sols sableux. En été, les eaux de surface visibles sont celles des étangs creusés aux abords des villages ou des tanks pérennes, celles de cours d'eau semi-permanents, comme la Ghagghar ou encore, celles des flaques, mares ou dépressions toujours temporaires. "Il faut des pluies d'orage exceptionnelles pour que des ruissellements importants laissent la marque de leur passage sur le terrain." (Gentelle, 1985 ; P.33, 35)

#### 1.1.2. Le climat

La rareté des écoulements pérennes et le déficit en humidité sont la conséquence de conditions climatiques marquées par la sécheresse.

Aux latitudes 29°-30°, la région est en effet caractérisée par un climat subtropical, secondairement continental (la mer est à 1600 Km), semi-désertique et soumis à la mousson. Elle connaît neuf à dix mois de sécheresse, d'octobre à juin ; cette sécheresse n'est cependant pas totale, puisque un quart des précipitations tombe pendant cette période (fig.4. ). Les pluies sont rares et très inégalement réparties ; leur hauteur varie entre 200 et 500 mm ; les conditions de l'aridité augmentent d'Est en Ouest (fig. 2. ). La variabilité interannuelle de la pluviométrie est très importante (1 à 4) ; des fluctuations généralement dues à de fortes inondations pouvant atteindre plus de 200 mm. Ces pluies se répartissent essentiellement en juillet et août.

D'octobre à juin, la température est partout

fig. 3. Carte pédologique simplifiée du bassin de la Ghagghar-Sarasvati, d'après Ahuja and Khana (1982) ; cf. Courty, 1985.

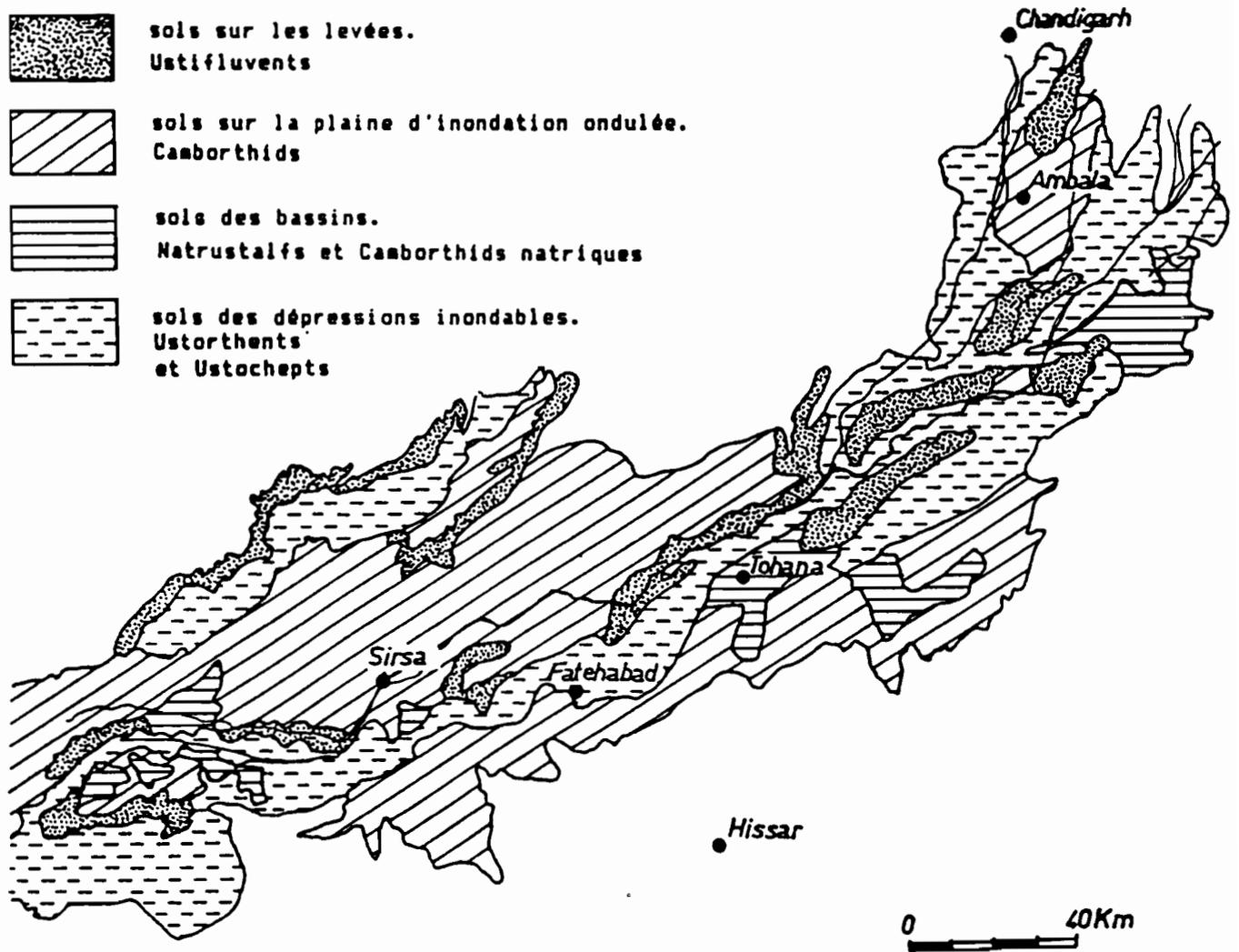
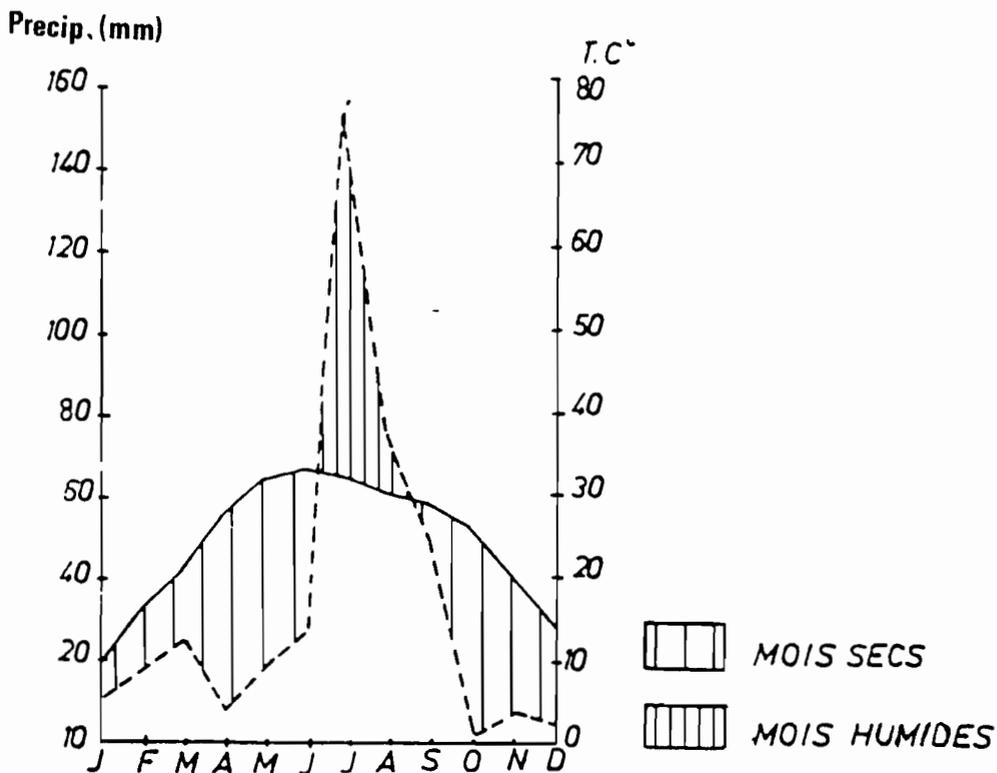


fig. 4. Courbe ombrothermique de la station climatique de Hissar (Ahuja and Mahenda, Singh, 1983), Courty, 1985.



supérieure à 20°C. La chaleur devient très forte dès le mois de mars pour atteindre son point culminant en juin avec en moyenne 35°C. A cette période de l'année sécheresse et abondance des radiations solaires entraînent une très forte évaporation. Décembre et janvier sont secs et froids avec une moyenne de 7°C en décembre. Ces deux mois connaissent des jours de gel (-2°C) succédant à des passages pluvieux dus à des dépressions cycloniques . (Gentelle, 1985 ; p.33)

"L'amplitude thermique à la surface du sol peut atteindre 50°, mais décroît fortement à 30 cm de profondeur. Le déficit hydrique est permanent," l'évapotranspiration potentielle est partout supérieure aux précipitations et ce, pour tous les mois de l'année. (Courty, 1985, p.13). "L'indice d'humidité (formule de Penman) est peu élevé (-80)" (Gentelle, 1985, p.33). "la vitesse moyenne des vents est de 4 à 10 Km/heure , mais peut atteindre 50 à 60 Km/heure en mai et juin, créant (...) des problèmes d'érosion des sols." (Courty, 1985 ; p.13). L'irrigation s'avère donc indispensable.

### 1.1.3. La végétation

La végétation reflète les conditions générales d'aridité. "Très clairsemée sur les dunes, elle pourrait constituer rapidement dans les dépressions une couverture typique de la steppe arborée semi-aride, avec un couvert végétal important, si elle n'était pas soumise à une sur-utilisation par l'homme et ses animaux." (Gentelle, 1985 ; p.35).

Les espèces les plus fréquentes, isolées sur les dunes ou groupées dans les dépressions, sont les suivantes : il s'agit pour les arbres de Prosopis specigera (Jand), Salvadora oleoides (Jal), Zyzyphus

nummularia (Beri), Acacia arabica (Kikar) qui est l'arbre le plus fréquent. On trouve comme arbustes, deux espèces principales : Zizyphus rotundifolia (Jhar beri) et Calotropis procera (Ak). Enfin, il existe une végétation herbacée, dans les haies : Cenchrus sp. (Dhaman) et dans les endroits plus humides : Cynodon dactylon (Dub).

Les plantes cultivées en sec les plus caractéristiques pour la mise en valeur sans irrigation sont en rabi (cultures d'avril à octobre), Vigna radiata (Gram) dans les zones recevant moins de 200 mm de pluie et Cicer arietinum dans les zones plus humides (plus de 200 mm). Les cultures kharif (cultures d'octobre à mars) sont dans toute la région le millet perlé (Bajra) ainsi qu'une plante fourragère : Cyanopsis tetragonoloba (Goar). (Gentelle, 1985 ; p.35)

L'eau affleurant rarement, les puits sont indispensables. Depuis une trentaine d'années en Haryana, depuis vingt ans dans le Rajasthan du Nord, le paysage est entièrement modifié par le fait que les canaux venus de la Yamuna et les puits à moteur permettent d'obtenir un taux de mise en culture atteignant 80 % dans les meilleurs districts de l'Haryana. "Les habitants de la région qui ne parviennent pas à relier leurs terres à des réseaux d'irrigation et dépendent de ce fait uniquement des pluies et des puits, portent une attention particulière à leur bétail (chèvres, moutons, boeufs à bosses, buffles, dromadaires)", qui leur permet de survivre lors des années de sécheresse. "Les divagations du bétail ont [toutefois] des résultats néfastes sur l'entretien de la végétation, surtout dans les zones les plus sèches." (Gentelle, 1985 ; P.35)

Le milieu présenté ci-dessus (hydrographie, climat, végétation), ainsi que les conditions de sa

mise en valeur par l'homme, ont semble-t-il évolué au cours des temps.

## 1.2. Les paléo-environnements

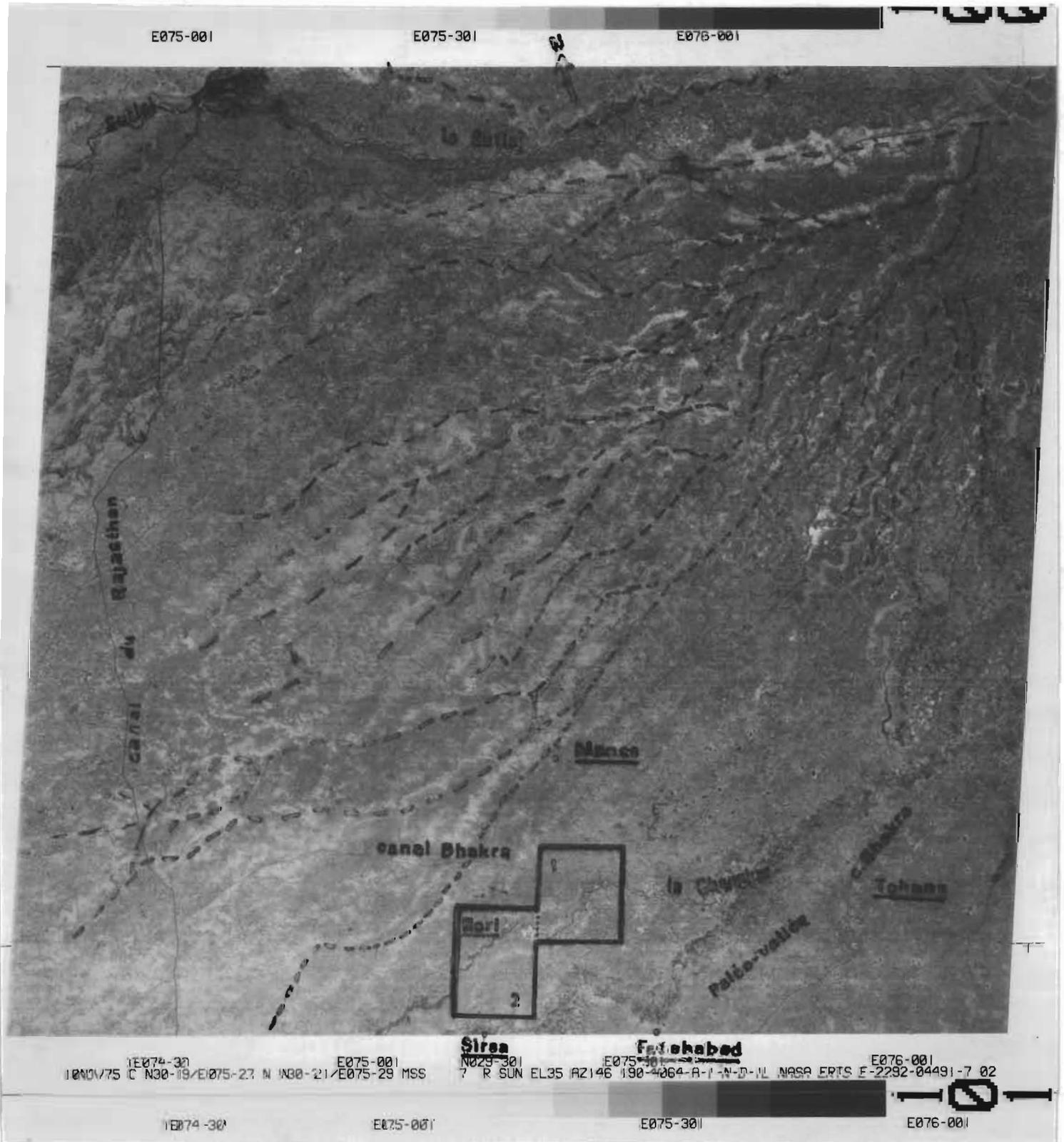
Récemment, l'étude d'images satellites, effectuée par des chercheurs indiens (Pal et al, 1980 ; Agrawal, 1984) a permis de repérer un lacs de chenaux d'orientation NE-SW, larges de 6 à 8 Km, prenant leur source au pied de l'Himalaya. Ces paléo-chenaux sont empruntés partiellement par des cours d'eau saisonniers : l'actuelle Ghagghar, l'actuelle Sarasvati, ainsi que le cours appelé Chautang. (ph. 1 et 2)

Par ailleurs, des prospections archéologiques, ont permis de découvrir sur ce vaste territoire, des dizaines de sites appartenant à différentes époques et dont la taille révèle l'existence d'importants moyens économiques.

La question posée est celle de la nature exacte de la relation existant entre le système hydrographique (actuel et ancien) et les vestiges archéologiques : problème géographique de la reconstitution de l'évolution des paysages, de l'environnement pédologique, climatique, hydrographique depuis la dernière glaciation; et de l'étude archéologique (et ethno-archéologique) de l'histoire de l'occupation humaine. Il s'agit de mettre en relation ces divers éléments et événements sur le plan chronologique.

Les perturbations du réseau hydrographique, fluctuations des cours d'eau, assèchements répétés et non coïncidence entre les axes d'écoulement actuels et anciens, sont fréquemment citées par de nombreux auteurs (Misra, 1977 ; Ghose et al, 1980) ...

1. Tirage photographique à 1/1 000 000 de la vue Landsat 159-040 du 10 novembre 1975



sous-zone de traitement Bhakra

Sirsa: ville

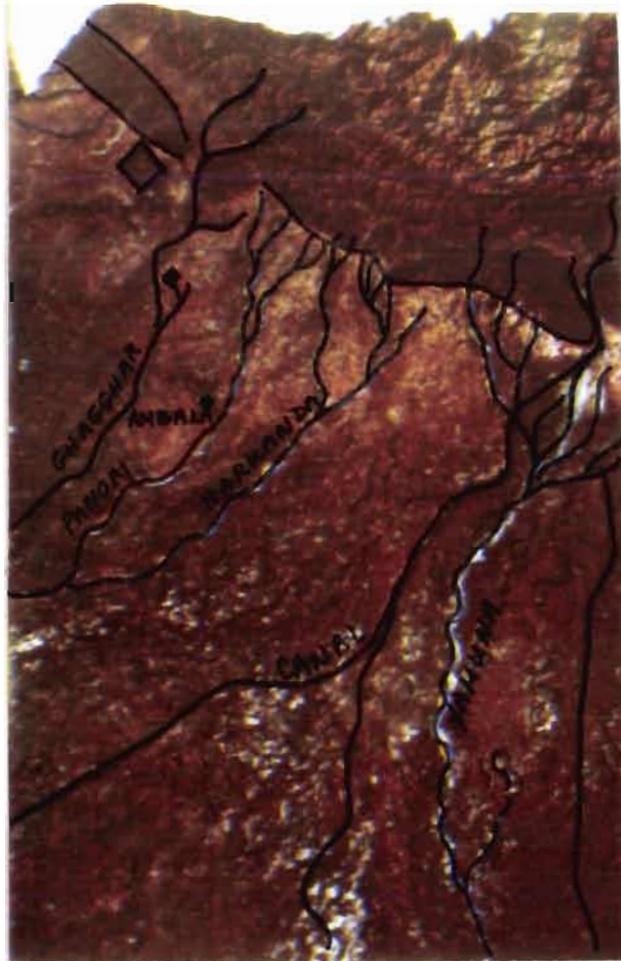


sous-zone de traitement Panihari

— — — — — point closés

Elles ont parfois été mises en rapport avec les changements climatiques : un régime humide à l'époque proto-historique, (3<sup>e</sup> millénaire), puis plus sec, et de nouveau plus humide aux premiers siècles de notre ère (ces données ont été extrapolées à partir de l'étude palinologique de trois carottes prélevées dans les dépôts lacustres du désert du Rajasthan) (Agrawal 1984). Une théorie ancienne que résume brièvement H.P. Francfort (1985 ; p.5) met par ailleurs en relation la mise en valeur et le peuplement protohistorique du bassin de la Ghagghar avec des périodes avec ou sans cours d'eau : A l'époque harappéenne et pré-harappéenne (entre 4500 et 3700 BP), la Ghagghar aurait coulé dans le district de Ganganagar au Rajasthan en direction de l'Indus puis diminué progressivement à l'époque PGW (Painted Grey Ware : 2800 à 2500 BP) pour finir par s'assécher. Plus tard, elle se serait remise à couler, permettant un nouveau peuplement à l'époque Kushane .

Les changements climatiques ne sont pas les seuls facteurs invoqués pour expliquer la disparition des cours d'eau importants. Ceux-ci auraient pu être affectés également par des bouleversements tectoniques . L'explication alors proposée (Agrawal, 1982) est "celle d'une capture des paléo-cours qui appartenaient au système Indus-paléo-Ghagghar, par le système Gange-Yamuna. Ces paléo-cours, selon cette interprétation, ne seraient autre que ceux d'une paléo-Yamuna dont le cours se serait infléchi vers l'Est à la suite de mouvements tectoniques produits dans le piémont de l'Himalaya et dans les Siwalik." (Francfort, 1985 p.6) Cette théorie, à vérifier de l'avis même de ses auteurs, ouvre la voie à une autre hypothèse interprétative concernant l'histoire du peuplement de la région : elle pourrait être expliquée par celle des paléo-cours du bassin de la Ghagghar. "De puissantes rivières au-



2. Piémont himalayen, Nord-Ouest de l'Inde.

raient coulé du Nord-Est vers le Sud-Ouest dans des lits de cinq kilomètres de largeur, sur les rives desquels , se seraient installés les hommes de l'époque protohistorique (3è millénaire). [Plus tard,] le soulèvement tectonique aurait produit un déplacement simultané des cours d'eau et du peuplement vers l'Est, vers l'actuelle Yamuna. Ce glissement se serait produit soit à l'époque Late Harappan, encore mal définie, soit à l'époque PGW (2800 à 2500 BP), soit progressivement au cours des deux, puisque l'on trouve des sites [appartenant à ces deux époques] dans l'état de Bahawalpur au Pakistan, sur l'un des paléo-cours appelé localement Hakra (...). Si l'on admet cette hypothèse, on doit cependant logiquement admettre aussi qu'un autre soulèvement tectonique aurait fait revenir les rivières à l'époque kushane (Rang Mahal) puisque l'on trouve de nouveaux sites à cette époque dans cette région." (Francfort, 1985 ; p.6)

Le problème de la datation de ces paléo-cours, est donc posé. Outre les données archéologiques, seule une étude géomorphologique approfondie, reposant sur des analyses chimiques et minéralogiques des matériaux sédimentaires comblant les paléo-chenaux, permet de préciser dans le temps et dans l'espace le vagabondage de ces rivières. Une telle étude a été entreprise dans le cadre des recherches menées par la Mission Archéologique Franco-indienne dans le bassin de la Ghagghar. Nous n'en présenterons ici brièvement que les résultats et conclusions.

La comparaison des sédiments observés dans des sondages profonds dans l'ancien cours de la Ghaggar-Sarasvati, avec des sables du Sutlej et de la Yamuna, ont permis d'affirmer que de puissantes rivières issues de l'Himalaya s'écoulaient à la fin de la période glaciaire dans l'actuel bassin de la Ghagghar. "Ces écoule-

ments se sont arrêtés bien avant la période protohistorique comme le prouve l'absence de tels sédiments dans les [couches] supérieures". (Courty, 1985 ; p.30). Par ailleurs, l'hypothèse d'un écoulement au cours de périodes récentes de la Yamuna et du Sutlej dans la zone étudiée est à exclure, comme le démontre l'étude géomorphologique des terrasses fluviales de la Yamuna (Gentelle, 1985). Il faut par conséquent "attribuer à des périodes beaucoup plus anciennes l'existence de traces de paléo-écoulements dans la région . Aux temps historiques et protohistoriques, pendant tout l'Holocène et probablement auparavant, la Yamuna coulait vers le Gange." (Gentelle, 1985 ; p.39)

Ainsi, "les civilisations protohistoriques s'installent sur une vaste plaine alluviale stabilisée, encore parcourue par de rares chenaux fonctionnant par intermittence" ces paléo-écoulements pléistocènes n'étant guère plus actifs il y a 5000 ans qu'ils ne le sont aujourd'hui. "De nombreux arguments fournis par l'étude des sols et des sédiments archéologiques, suggèrent [par ailleurs] que les conditions climatiques ont peu fluctué depuis la période protohistorique, restant de type semi-aride." (Courty, 1985 ; p.30 et 31)

Il faut donc se tourner vers d'autres causes possibles d'apport d'une eau régulière et abondante à la série de sites archéologiques que l'on trouve dans la plaine. La seule possibilité semble être l'existence d'une irrigation de grande importance sur le piémont indo-gangétique. (Gentelle, 1985 ; p.39). Les rivières gigantesques ayant coulé dans les paléo-cours NE-SO de l'ancien système Ghagghar, n'ayant pu être utilisées par les habitants protohistoriques pour la création de réseaux d'irrigation, "le réseau irrigué prenait nécessairement son eau dans la Yamuna, à environ

200 Km de la zone étudiée" (Francfort, 1985 ; p.59)  
En effet, la construction de tels canaux étant prouvée pour le XIV<sup>e</sup> siècle, sachant par ailleurs que les techniques de l'irrigation n'ont guère évolué entre le troisième millénaire avant notre ère, et le premier millénaire après, la possibilité de création de tels systèmes irrigués, est envisageable techniquement dans la civilisation harappéenne. (Gentelle, 1985)

Les prospections de la Mission Archéologique Franco-indienne se sont donc orientées vers la recherche de traces de canaux, dans les zones qui paraissaient les plus propices à leur maintien. Des vestiges de canaux de différentes époques (Moyen-Age (VIII<sup>e</sup>-XVIII<sup>e</sup> siècles) - période Moghole) ou plus anciens ont été retrouvés au sol. De longues bandes de sable, vestiges des sédiments évacués d'année en année lors des curages, inaccessibles aux cultures irriguées, parfois hautes de 3 à 5 m et larges d'une cinquantaine de mètres, sont un bon indicateur de la présence de canaux anciens actuellement non fonctionnels dans un paysage irrigué de nos jours (ph. 23 à 26) ; ces traces de canaux figurent d'ailleurs parfois sur les cartes topographiques sous la forme de buttes de sable allongées. La recherche de ces traces, combinée à une étude détaillée du paysage dans toutes ses composantes, devrait apporter des éléments de solution à la question, étudiée depuis longtemps, des paléo-écoulements.

Nous admettrons donc l'existence de réseaux irrigués protohistoriques et historiques ; il s'agit maintenant de préciser leur tracé et leur extension. C'est pour mettre en évidence ces anciens réseaux, que nous avons entrepris l'étude de l'image Landsat.

## 2. Les sources d'information

### 2.1. Les cartes topographiques

Les seules sources d'information objectives représentant l'espace étudié, que nous ayons à notre disposition, hormis bien-sûr les images spatiales, sont des cartes topographiques anglaises de différentes époques, et à différentes échelles : carte au 1:250 000 de 1977, au 1:253 000 (quarter inch) de 1902, au 1:50 000 de 1977 et au 1:63 000 (one inch) de 1915. Ces cartes couvrent une partie de l'Haryana à l'Est, du Penjab au Nord et du Rajasthan au Sud-Ouest, entre les latitudes 29°-30° Nord et les longitudes 75°-76° Est (tabl.I.).

Des quatre cartes, celle au 1:253 000 datant de 1902 est la plus sommaire. Elle ne comporte pas de légende, et offre une représentation du milieu étudié très insuffisante : aucune indication sur les paysages, la végétation ; seules des dunes et ce qui semble correspondre à des dépressions marécageuses, sont figurées ; dénivellations et altitudes, ne sont pas indiquées. On y distingue trois types de réseaux linéaires, non hiérarchisés : grandes routes (pas de chemins), voies ferrées, rivières, lits anciens et canaux d'irrigation. Notons à propos de la représentation des rivières, qu'elles sont par endroit dédoublées, le cartographe ayant certainement voulu souligner leur largeur ou la largeur de la vallée, sans que l'on sache s'il s'agit de lits majeurs ou mineurs. Bien qu'elle soit peu détaillée, cette carte, la plus ancienne, est utile pour l'étude de l'évolution des réseaux d'irrigation. Elle permet notamment de localiser le tracé d'un canal ancien allant de Sirsa (au Sud) à Rori (au Nord). C'est ce tracé qui est figuré sur la carte de 1915 (1:63 000) en pointillé sous le nom de "disused canal", mais qui n'apparaît pas sur les cartes de 1977, que nous avons

tabl. 1 . Apports des différentes cartes topographiques ; comparaison des légendes.

TITRE	HARYANA, PUNJAB, RAJASTHAN	INDIAN ATLAS	HARYANA, PUNJAB	PUNJAB
ECHELLE	1/250 000	Quarter inch 1/253 000	1/50 000	One inch 1/63 360
N <sup>o</sup>	44 <sup>0</sup> HISAR	quarter sheet 31-SE	44/ $\frac{0}{2}$ (w) 44/ $\frac{0}{6}$ (E)	44/ $\frac{0}{2}$ (W) 44/ $\frac{0}{6}$ (E)
ANNEE	1977	1902	1977	1915
EDITION - IMPRESSION	2è édition, couleur	photocopie noir & blanc	2è édition, couleur	photocopie noir & blanc
ETATS ET et DISTRICTS concernés	HARYANA : Biwani Hisar Jind Sirsa  PUNJAB : Bhatinda Patiala Sangrur  RAJASTHAN: Ganganagar	Parts of districts Hisar and Ferozepore and states of Patiala and Birkaner	44/ $\frac{0}{2}$ :Sirsa Batinda districts 44/ $\frac{0}{6}$ :Hisar Sirsa districts	Hisar district and Patiala state
COORDONNEES	30°N,29°S / 75°W,76°E	30°22'N,29°3'S  74°15'W,75°60'E	29°45'N,29°30'S 75°W,75°30E	29°45'N,29°30'S/ 75°W,75°30'E
VOIES de COMMUNI CATION	-Roads, metalled : according to importance - Roads unmetalled : "  -Cart-track, Pack-track and pass. Foot-path.  -Bridges - Railways, broad gauge , other gauges Light railway or tramway	(1) - Routes prin cipales -Voies ferrées	Même légende que le 1/250 000	-Railway:. Broad. Gauge/ . Other Gauges  -Mineral Line and tramway.  -Main roads: me- talled unme- talled -Cart-track. camel track -Mule-path Foot-path

(1) - Cette carte ne comporte pas de légende

<p>HYDROGRAPHIE</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Streams: with track in bed</li> <li>- Canal</li> <li>- Dams</li> <li>- River banks: shelving, steep.</li> <li>- River dry with water channel with island &amp; rocks</li> <li>- Submerged rocks. Shoal. Swamp Reeds</li> <li>- Wells: unlined, lined. Tube-well. Tanks</li> </ul> <p>(water features are shown in blue where they generally contain water.)</p>	<p>Canaux</p> <p>Rivières</p>	<p>"</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Canaux</li> <li>- Rivières</li> </ul> <p>(those portions of rivers streams, canals lakes etc. which generally contain water are shown in blue.</p>
<p>TOPOGRAPHIE</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contours with sub-features.</li> <li>- Rocky slopes.</li> <li>- Cliffs.</li> <li>- Sand features: flat, sand-hills and dunes surveyed, shifting dunes</li> </ul> <p>(Contours are approximate. A relative height x represents the approximate height in metres, between the top and bottom of a steep slope)</p>	<p>Dunes</p>	<p>Courbes de de niveau: équadistance: 20 m</p>	<p>Dunes</p> <p>A relative height...</p>
<p>VEGETATION</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Palms, palmyra, other.</li> <li>- Plantain. Conifer. Bamboo.</li> <li>- Other trees.</li> </ul> <p>(Wooded areas are coloured green.)</p>	<p>Marais</p>	<p>Même légende que le 1/250 000</p>	<p>Wooded areas and high grass are coloured in green.</p>
<p>OCCUPATION HUMAINE</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Towns or Villages : inhabited . deserted.</li> <li>- Fort.</li> <li>- Huts : permanent temporary.</li> <li>- Tower.</li> <li>- Lighthouse.</li> <li>- Mine. Vine on trellis.</li> <li>- Post-office. Police station...</li> <li>- Church. Temple. Mosque.</li> </ul>	<p>Villes</p> <p>Villages</p>	<p>"</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mine. Fort.</li> <li>- Deserted village</li> <li>- Post-office</li> <li>- Church. Temple. Mosque</li> </ul>

cherché à mettre en évidence lors du traitement de l'image Landsat (II et III).

Les cartes au 1:50 000 (1977), 1:63 000 (1915) et 1:250 000 (1977) sont d'un apport presque similaire. Le 1:50 000 datant de 1977 est bien-sûr plus détaillé que les 1:250 000 de la même année ; les légendes sont cependant identiques et les informations fournies aux utilisateurs, sensiblement les mêmes. Le 1:50 000 est pour nous un outil de travail plus intéressant dans la mesure où il révèle la présence d'alignements de végétation parallèles aux canaux et à certaines routes. L'existence d'une telle corrélation entre végétation et réseaux linéaires, sera exploitée pour le traitement numérique des images spatiales.

La photocopie de la carte de 1915 (1:63 000), initialement en couleurs, obtenue à l'Indian Office Library à Londres, étant assez mauvaise, nous n'avons pu en extraire toutes les informations qu'elle contient réellement ou que nous aurions souhaité y trouver, notamment sur la végétation, les zones cultivées, les chenaux ou zones en eau.

La topographie est figurée sur les trois cartes par des courbes de niveau, équidistantes de cent mètres sur la carte au 1:250 000, vingt mètres sur le 1:50 000 ; sur le 1:63 000, cette information n'est pas légendée. Est également représentée sur les trois cartes, la hauteur précise de certaines dénivellations (buttes, dunes).

Les réseaux linéaires sont hiérarchisés : les voies de communication selon leur revêtement et leur largeur : routes bitumées ou non, plus ou moins larges, chemins, sentiers ; les chenaux en eau, selon leur largeur ou leur nature : canaux artificiels, riviè-

re ; sur ce point, la carte de 1915 est moins précise et détaillée que les deux cartes de 1977.

Ainsi, les informations, souvent élémentaires, fournies par les cartes topographiques ne permettent pas une étude détaillée du milieu au niveau local. L'absence de cartes thématiques aux mêmes échelles, cartes géologiques, cartes de la végétation ou de l'occupation du sol (inexistantes) est d'autant plus regrettable. La figuration des réseaux linéaires est en revanche abondante et détaillée, suffisante pour identifier les linéaments mis en évidence sur les images spatiales traitées. Par ailleurs, la comparaison entre cartes anciennes et cartes récentes permet d'aborder l'évolution des systèmes d'irrigation depuis 1902. Nous envisagions de mener une telle étude à partir des cartes et de documents d'archive : census et gazetteers qui pour chaque année fournissent nombre de renseignements sur le réseau irrigué. Cependant, au moment où nous rédigeons, ces documents, commandés par l'URA 10 du CNRS, n'ont pas encore été reçus . Nous avons donc dû renoncer à intégrer cette recherche à notre mémoire, renoncer également de ce fait à une étude basée uniquement sur les cartes topographiques, qui se serait limitée à la simple description.

## 2.2. Le terrain - les photos aériennes

Le terrain, source d'information sinon suffisante, du moins indispensable au géographe, nous a fait absolument défaut pour notre étude. Du moins avons nous tenté de le remplacer par des entretiens avec des chercheurs, archéologue (H.P. Francfort) et géographe (P. Gentelle), familiers du territoire étudié. Toutefois, bien que précieuses, les informations recueillies concernaient d'une part des caractéristiques géné-

rales, communes à de vastes étendues, d'autre part des points de détail très localisés, aussi ne nous ont-elles pas permis d'appréhender véritablement les environnements aux différentes échelles de saisie visuelle. Le parcours sur le terrain aurait pu apporter des informations partielles concernant les tracés d'irrigation ancienne ; en revanche, il ne permettait pas d'aborder les systèmes, l'organisation même des réseaux les uns par rapport aux autres, de repérer le tracé exact et continu des canaux sur de vastes étendues, ce que nous recherchions plus particulièrement.

Les photos aériennes auraient pu fournir cette information. Ces documents sont de plus particulièrement bien adaptés à notre recherche, puisque leur résolution aurait sans doute permis de repérer facilement canaux d'irrigations et traces anciennes. Cependant, pour des raisons de politique intérieure relatives à la zone frontière Penjab-Rajasthan, les photos aériennes ne sont pas disponibles sur cette région ou en tout cas pas diffusables auprès des étrangers.

Le problème était donc le suivant : comment utiliser les images spatiales pour remplacer l'étude au sol et les photographies aériennes dans l'identification des réseaux linéaires, notamment des traces d'irrigation ancienne ? Comment contourner le paradoxe qui consiste à utiliser une image spatiale comme substitut d'informations thématiques manquantes, alors que l'information thématique est réputée indispensable à l'exploitation des données spatiales. Nous avons tenté de résoudre ce problème en fondant notre étude sur la morphologie des objets plutôt que sur leur signature spectrale (cf. II)

Parallèlement à l'étude thématique, ces

questions ont ainsi ouvert la voie à une recherche méthodologique, que nous allons développer. Au préalable, nous rappelons ici brièvement les principales caractéristiques des images spatiales.

### 2.3. Les images spatiales

Il s'agit du traitement des données fournies par le satellite Landsat 2, données MSS (Multi Spectral Scanner) et RBV (Return Beam Vidicon), le Thematic Mapper de Landsat 4 et 5, dont la résolution spatiale est supérieure aux systèmes MSS et RBV, n'étant pas disponible actuellement pour l'Inde, de même<sup>que</sup> les images fournies par les simulations SPOT.

On trouvera en annexe les travaux réalisés sur les images RBV en juin et novembre à l'Atelier de Télédétection de l'ORSTOM à Bondy. Ces travaux n'ont pas été intégrés à la présente étude en raison de la médiocrité des résultats obtenus, du fait de la mauvaise qualité des images que nous avons dû numériser en l'absence de la bande magnétique correspondante. Cette étude a cependant permis l'apprentissage des logiciels utilisés, du matériel de traitement d'image : ordinateur Mini 6, système de visualisation Péricolor etc., ainsi que l'expérimentation de quelques procédures.

L'information contenue dans les données Landsat (sous forme photographique ou numérique) est fondamentalement différente de celle qui est contenue dans les photos aériennes : ce ne sont pas des objets reconnaissables du paysage que restituent les images, mais l'ensemble des objets groupés dans la même unité d'enregistrement ou pixel ; la valeur du pixel (valeur numérique sur bande magnétique ou densité de gris sur négatif photo.) est une résultante dont on maîtrise

mal les composants. Le pixel est une vaste surface de territoire : 79 m sur 59 m dans le cas de Landsat MSS. Les objets du paysage ne sont donc pas discernables en tant que tels sur une image Landsat : ils participent à un ensemble dans lequel leur radiométrie entre en proportion variable, non seulement dans l'espace, mais aussi dans le temps.

La résolution spatiale du système Landsat RBV, mais surtout MSS, n'est pas vraiment adaptée à notre problème. En effet, les réseaux très fins, de largeur inférieure à un pixel, ont peu de chance d'être visibles directement. Par contre, la dimension de l'espace restitué en une seule image ou "scène" : 185 Km sur 185 Km pour les systèmes MSS et RBV, permet d'aborder des systèmes géographiques dans leur continuité spatiale, d'établir des comparaisons entre systèmes voisins, de traiter un thème ou un sujet de façon homogène.

D'autre part, les enregistrements Landsat MSS livrent une information multi-spectrale en décomposant en quatre groupes (ou bandes spectrales) les longueurs d'onde de la lumière :

canal 4 : 0,5 à 0,6 micromètres (vert)	canal 5 : 0,6 à 0,7 micromètres (rouge)
canal 6 : 0,7 à 0,8 micromètres (Infra rouge proche)	canal 7 : 0,8 à 1,1 micromètres (Infra rouge)

Ils fournissent l'image d'un objet dans chaque longueur d'onde, la variation du signal d'une bande spectrale à l'autre, donnant la signature spectrale spécifique de cet objet. Cette propriété est exploitée pour l'interprétation thématique des images.

L'exploitation des données sous forme numérique a l'avantage de restituer l'information au pixel

près, c'est à dire à l'unité d'image près en définition géographique et à l'unité de valeur près en définition radiométrique. Les valeurs radiométriques numériques sont réparties en 256 niveaux possibles codés de 0 à 255. Elle permettent des traitements statistiques, des comparaisons, des améliorations d'image, le réhaussement des transitions etc. L'utilisation des données numériques implique cependant la disponibilité d'un équipement en matériel informatique et l'accès à des logiciels de traitement et de visualisation.

L'exploitation des données Landsat est donc plus délicate que celle des photos aériennes ; l'ordre d'interprétation est tout à fait différent. Une bonne connaissance de l'outil, donc une formation préalable d'une part, ainsi qu'une bonne connaissance des objets recherchés, donc du milieu d'autre part, sont nécessaires si l'on veut extraire des informations systématiquement fiables.

Nous n'avons pas, on l'a vu, une connaissance du milieu suffisante pour permettre l'interprétation assurée, en termes de signatures spectrales. C'est pourquoi nous avons tenté de résoudre notre problème en traitant l'image, sans en donner une interprétation détaillée. Néanmoins, on trouvera plus loin (I.3) des hypothèses thématiques concernant les deux sous-zones de la scène Landsat traitées, formulées à partir des repères donnés par les cartes ("vallées", "dunes") et des comportements spectraux définis et connus sur d'autres territoires.

### 3. Les informations apportées par la télédétection spatiale au niveau local

Les données Landsat doivent faire l'objet

d'une interprétation, c'est-à-dire d'une lecture transposant les éléments de l'image à ceux du paysage, traduisant la valeur radiométrique et la disposition des pixels en objets constitutifs du paysage. Or, travaillant en terrain mal connu, nous n'avons que fort peu de "signatures spectrales" sur lesquelles nous appuyer. La question posée est donc de déterminer dans quelle mesure et à quel niveau de fiabilité : certitudes, hypothèses, interrogations totales, les données traitées du satellite peuvent fournir des informations sur un territoire comme le nôtre, si l'on ne dispose d'autres sources que les cartes topographiques précédemment décrites (2.1).

### 3.1. Les données

L'approche des paysages a été réalisée sur une sous-zone de la scène Landsat : la sous-zone Panihari, sur laquelle nous avons effectué divers traitements multispectraux : compositions colorées, indices de végétation, composantes principales ; ces traitements, à des degrés divers fournissent un accès plus aisé aux différentes unités du paysage, que les bandes spectrales MSS brutes.

La composition colorée permet l'examen simultané des variations de nuances de gris sur les trois canaux du radiomètre. Le canal 4 est ici reproduit en bleu, le canal 5 en vert, le canal 7 en rouge ; les nuances de couleurs de la composition colorée expriment la synthèse des informations contenues dans ces trois canaux bruts. Ce traitement a également été réalisé à partir de la première, deuxième et quatrième composante principale.

L'analyse en composantes principales (cf.II.

3.2.1.) substitue aux images brutes des diverses bandes spectrales, des images transformées en concentrant le contraste dans un nombre faible d'images (Verger, 1985) : les deux premières composantes, qui à elles seules concentrent 95 % environ de la variance totale du contraste des quatres images brutes. C'est cette notion de décomposition et de hiérarchisation de l'information, que nous avons exploitée et non celle d'interprétation des valeurs radiométriques, lesquelles sont, en ce qui concerne l'analyse en composantes principales, sans signification.

Nous avons également calculé des indices de végétation ; ces traitements ne portent pas sur la totalité de la signature spectrale, mais sur certaines de ses composantes seulement : elles définissent des indices de phénomènes tels que la végétation jaune et la végétation verte (cf.II.3.2.1.)

### 3.2. Délimitation d'unités homogènes - essai d'interprétation

Il est possible d'isoler sur ces diverses images des unités homogènes par leur couleur, leur texture ou encore par la netteté de leur contraste avec les unités voisines. Il est par contre beaucoup plus difficile d'identifier la correspondance paysagique de ces différentes unités. La signification de certaines d'entre elles est évidente ; pour d'autres, nous ne pouvons qu'émettre des hypothèses, qui sont parfois validées par les cartes topographiques ; certaines unités enfin, ne sont pas interprétables et on doit se borner à un simple repérage.

#### a. Les réseaux linéaires

Sur ces images, il est relativement aisé

d'interpréter les réseaux linéaires : leur forme, leur orientation, leur largeur, leur localisation et extension, plus ou moins bien observables, permettent de les reconnaître sur les cartes. Certains linéaments cependant, très peu visibles, discontinus, très fins ou faiblement contrastés par rapport à l'environnement sont plus délicats à interpréter. D'autres, n'ont pas de correspondance sur les cartes ; s'agit-il d'artéfacts ou d'alignements perceptibles sur le terrain, mais non mentionnés sur les cartes ? Nous ne pouvons qu'émettre des hypothèses.

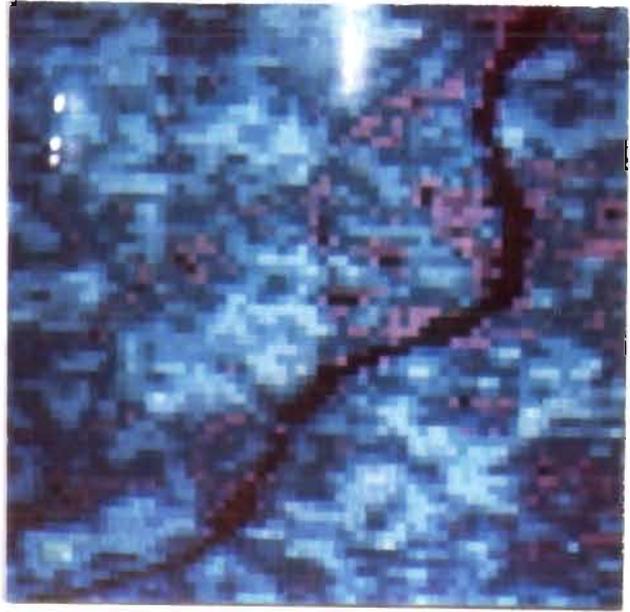
A titre d'exemple, nous avons étudié le comportement radiométrique et morphologique de quatre réseaux linéaires : le canal Bhakra, très large, orienté NE-SW, la rivière Ghagghar, la route allant à Sirsa, diagonale également orientée NE-SW, et un canal de largeur moyenne, le Suckchain canal, sur trois bandes spectrales : 4, 5 et 7 (tabl. II ; ph. 3 à 5). Il apparaît nettement une différenciation de la valeur radiométrique selon les bandes spectrales ; on constate par ailleurs, que toutes les bandes MSS ne permettent pas la visualisation de tous les réseaux linéaires, même les plus importants.

Sur la bande spectrale 6 (ph. 6), ces quatre réseaux sont assez bien repérables. Si l'on se réfère à cette image, la composition colorée des quatre bandes spectrales brutes n'apporte rien quant au repérage et à l'interprétation des linéaments ; le canal Bhakra, la rivière, la route et le canal secondaire sont assez bien restitués (ph. 7). Les composantes principales en revanche, la première et la deuxième (ph. 11 et 12), mettent en évidence un plus grand nombre de réseaux, grâce à l'accentuation des contrastes. Elles font apparaître de façon discontinue le tracé d'un canal ancien (cf. 2.1.) ; ce linéament est également repérable sur l'indice de végétation jaune de façon

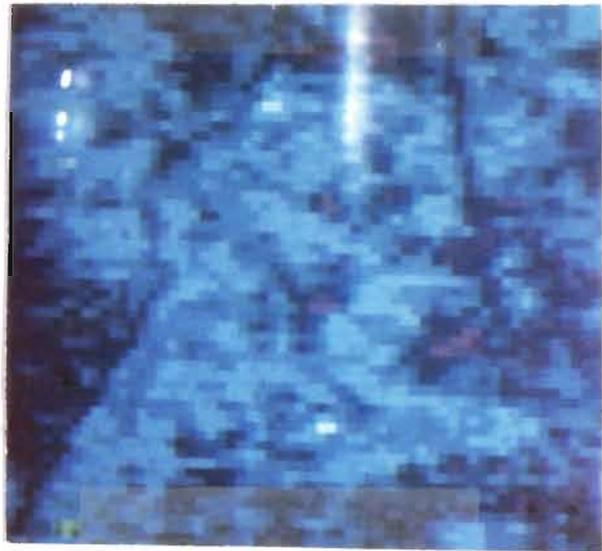
tabl. II. Comportement radiométrique et morphologique de quatre réseaux linéaires sur trois bandes spectrales.

	BANDE SPECTRALE 4	BANDE SPECTRALE 5	BANDE SPECTRALE 7
CANAL BHAKRA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- continu</li> <li>- largeur : 3-4 pixels</li> <li>- valeurs : 15-16-18</li> <li>- voisinage immédiat, valeurs : 20 à 25</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- continu</li> <li>- largeur : 1 à 4 pixels</li> <li>- valeurs : 15 à 19 (forte absorption) eau + végétation active)</li> <li>- voisinage immédiat, valeurs : 21-25</li> </ul> <p style="text-align: center;">cf. photo 3</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- continu</li> <li>- largeur : 2 à 4 pixels</li> <li>- valeurs : 10 à 14</li> <li>- voisinage : 16 à 21</li> </ul>
RIVIERE GHAGGHAR	n'apparaît pas	A peine visible, ne se différencie pas du voisinage, quelle que soit la dynamique.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zones continues et zones de transition.</li> <li>- valeurs (zones continues) : 4 à 11</li> <li>- largeur : 1 à 2 pixels.</li> <li>- voisinage immédiat: deux types : <ul style="list-style-type: none"> <li>. fond : 15 à 22</li> <li>. transition : 12 à 24.</li> </ul> </li> </ul> <p style="text-align: center;">cf. photo 5</p>
SUCKCHAIN DISTY (canal secondaire)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- continu</li> <li>- contraste avec le voisinage faible, valeurs : 19 à 25</li> <li>- largeur : 1 pixel</li> </ul> <p style="text-align: center;">cf. photo 4</p>	n'apparaît pas	apparaît par connexité des pixels, mais pas de distinction avec le voisinage, en termes de valeurs.
GRANDE ROUTE (N° 25)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- apparaît par connexité des pixels</li> <li>- largeur : 0-1 pixel</li> <li>- valeurs : 10 à 25</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- tronçons continus, mais hétérogénéité des valeurs.</li> <li>- largeur : 0-1 pixel</li> <li>- contrastes avec le voisinage faible</li> <li>.valeurs : 27 à 27</li> <li>.valeurs vois.: 30 à 40</li> </ul>	n'apparaît pas

3. Bande spectrale 5. Canal Bhakra. Zoom. (Photo d'écran Péricolor.)



4. Bande spectrale 4 . Deux canaux d'irrigation. Zoom. (Photo d'écran Péricolor)



5. Bande spectrale 7. La Chagghar (rivière). Zoom. (Photo d'écran Péricolor).



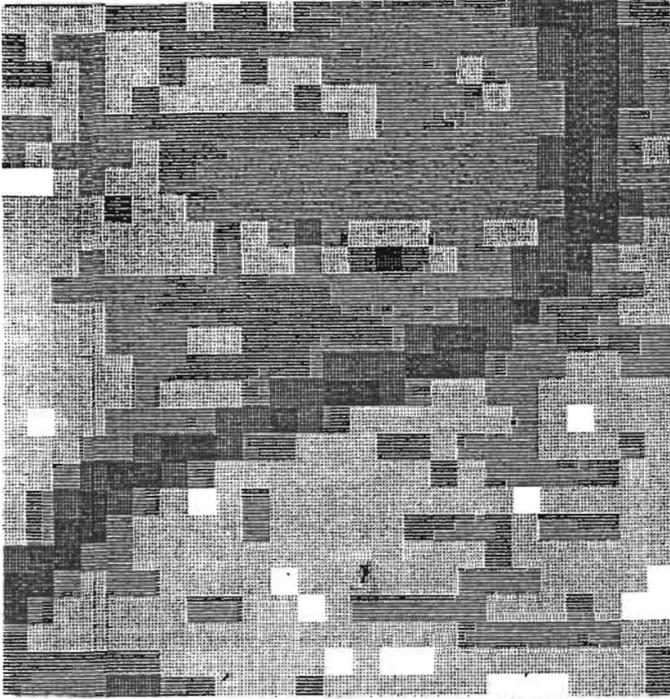


fig.5. Bande spectrale 6. Canal Bhakra. Zoom.  
(sortie imprimante).

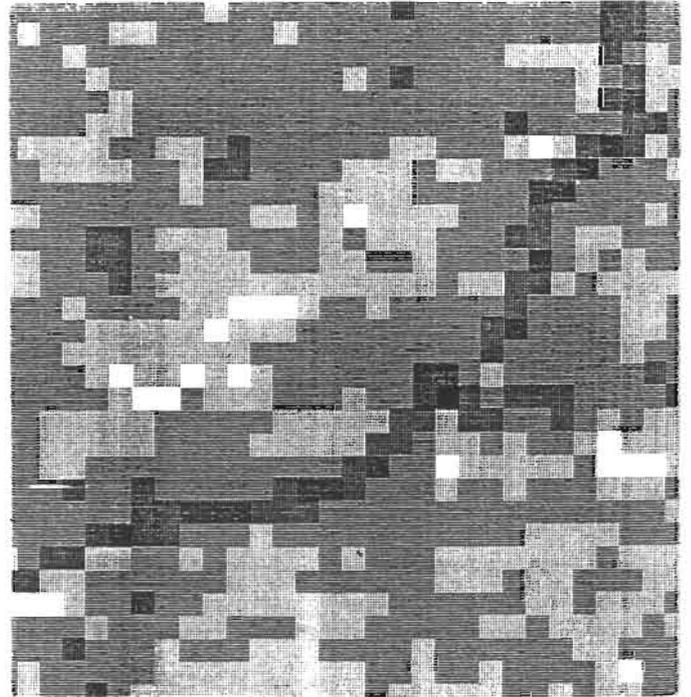


fig.6. Bande spectrale 6. La Ghagghar (rivière)  
Zoom. (Sortie imprimante).

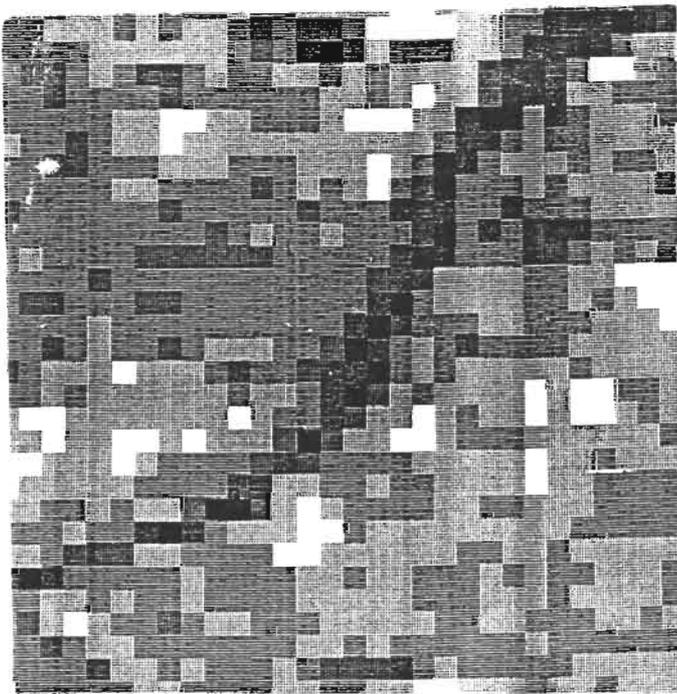


fig. 7. Deuxième composante principale. Canal  
Bhakra. Zoom. (Sortie imprimante).

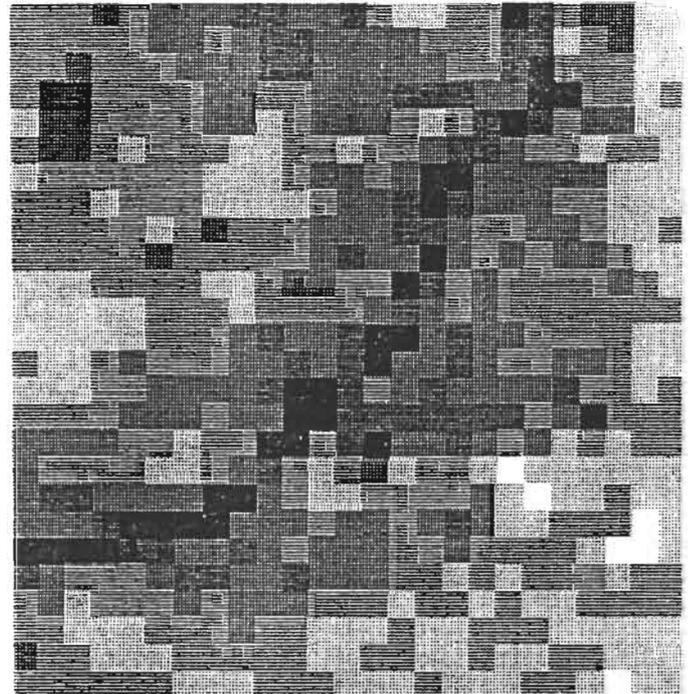


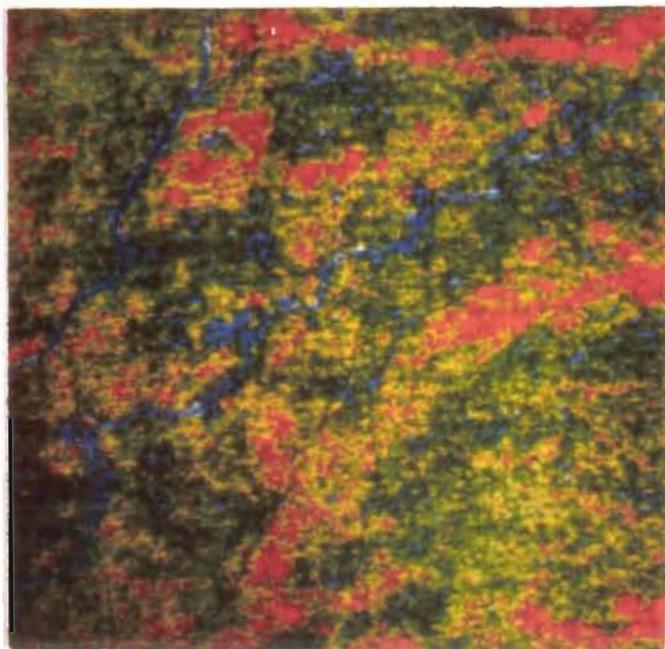
fig.8. Deuxième composante principale. La Ghagghar  
(rivière). Zoom. (Sortie imprimante).

peu nette. L'image restitue par ailleurs un grand nombre de linéarités (ph. 9 ; fig. 10 ).

b. Sols clairs ? sableux ? dunes ?

En dehors des linéaments, les images permettent le repérage d'autres unités. Il s'agit de plages de même couleur (présentant toutefois chacune, des variations d'intensité), visibles sur toutes les images : en rouge sur la composition colorée des trois composantes principales (ph. 8 ; fig. ), en rouge également sur le canal 6 brut (ph. 6 ; fig. 9 ), en blanc sur la composition colorée des trois canaux MSS (ph. 7 fig. ) et sur l'indice de végétation jaune (ph. 9 fig. 10 ), en noir enfin, sur l'indice de végétation verte (ph. 10 ; fig. 11). Ces unités d'images sont localisées dans la partie Nord, d'Est en Ouest, et constituent une sorte de diagonale S-SW - E-NE presque continue et assez large. D'autres taches homogènes de même couleur, sont visibles au NW et au Sud. Sur toutes les images, elles ont la même extension, les variations de limites étant dues à des dynamiques différentes.

Ces taches correspondent à des unités de paysage ayant une haute réflectance dans les quatre bandes spectrales, comme le traduit leur couleur blanche sur la composition colorée; nous en déduisons qu'il s'agit de sols clairs et de surfaces nues, probablement de sables, peut-être sous la forme de dunes. Ces unités correspondent à des valeurs basses sur l'indice de végétation verte (en noir), ce qui semble confirmer l'hypothèse de sols nus. Par contre, elle apparaissent en blanc sur l'indice de végétation jaune (indice élevé); on peut donc émettre l'hypothèse de la présence au sol d'étendues sableuses recouvertes, de façon plus ou moins continue, par une végétation sèche (jaune) également claire. La présence de dunes est confirmée



6. Sous-zone panihari. Bande spectrale 6 brute. (Photo d'écran Péricolor.)

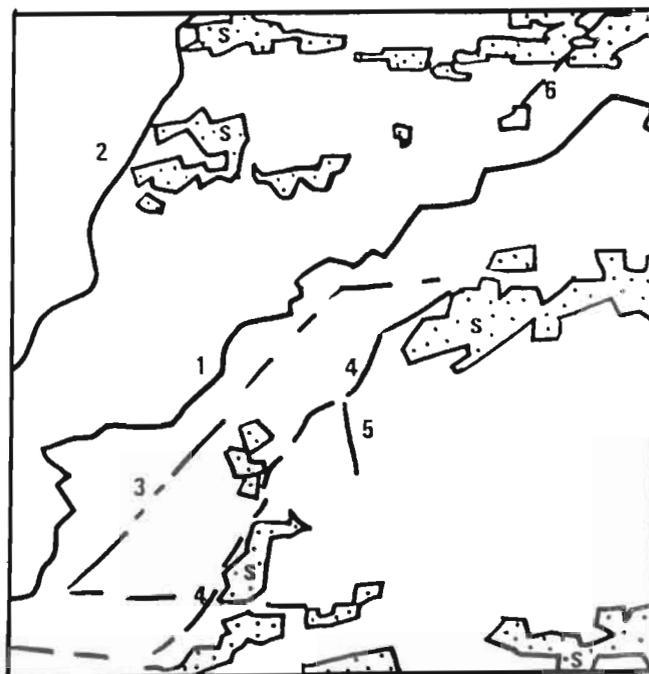
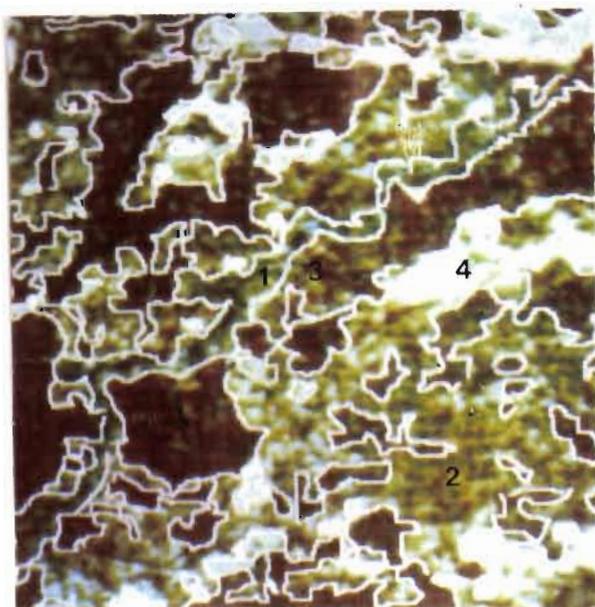
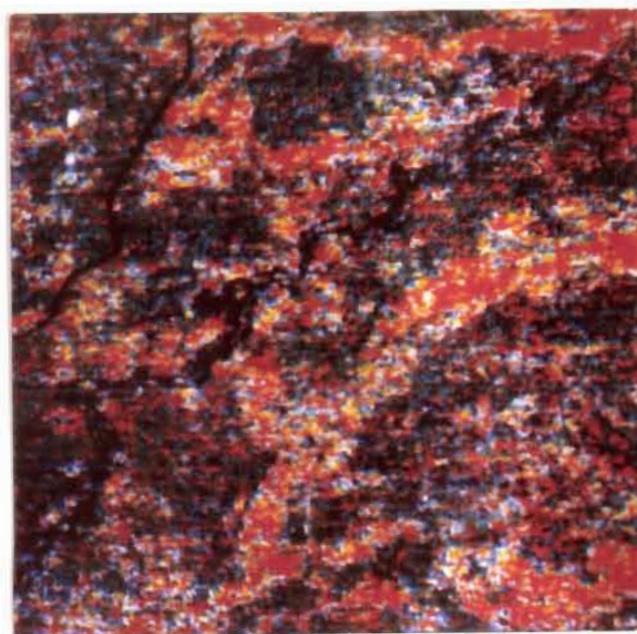


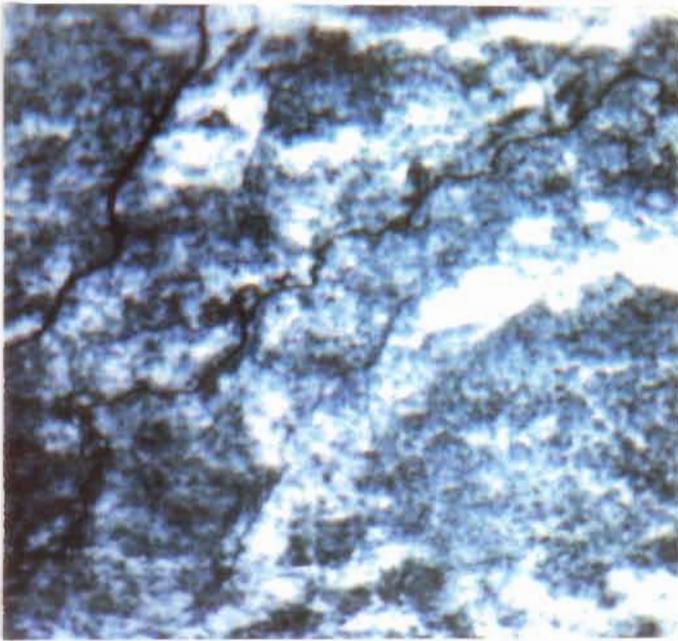
fig. 9. Zonage sur ph.6. 1/ Rivière (Ghagghar). 2/ Canal (Bhakra). 3/ Route. 4/ Canal (Suckchain disty). 5/ Canal (Suckchain disty, branch 2). 6/ Route. S/ Sols nus, sableux, dunes ?



7. Sous-zone Panihari. Zonage sur composition colorée lissée des trois bandes spectrales : 4 (en bleu), 5 (en vert), 7 (en rouge). 1. Vallée. 2. Végétation (type 1)? 3/ Végétation (type 2)? 4/ Sols nus? (Photo d'écran Péricolor).



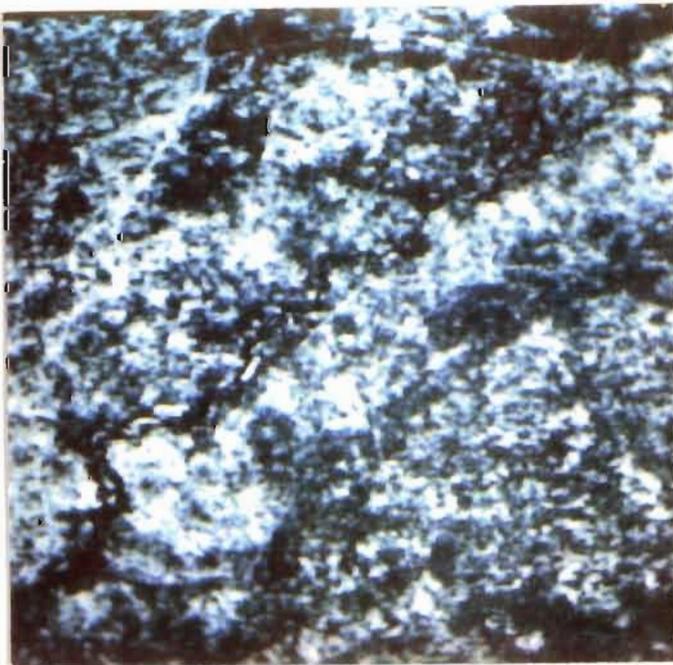
8. Sous-zone Panihari. Composition colorée des 1ère, 2ème et 4ème composantes principales. Les limites des zones homogènes sont identiques à celles de la photo 7 (Photo d'écran Péricolor)



9 . Sous-zone Panihari. Indice de végétation jaune. (Photo d'écran Péricolor)



fig10.Zonage sur indice de végétation jaune.  
 1/ Rivière (Ghagghar). 2/ Canal (Bhakra). 3/  
 Route. 4-5/ Canal (Suckchain disty). 6-7/  
 Routes. 8-9/ Chemins. 10/ "Disused canal".  
 11/ Canal (Ranga disty).  
 [Hatched box] Zones d'indice de végétation jaune élevé (en blanc sur photo 9).



10. Sous-zone Panihari. Indice de végétation verte. (Photo d'écran Péricolor)

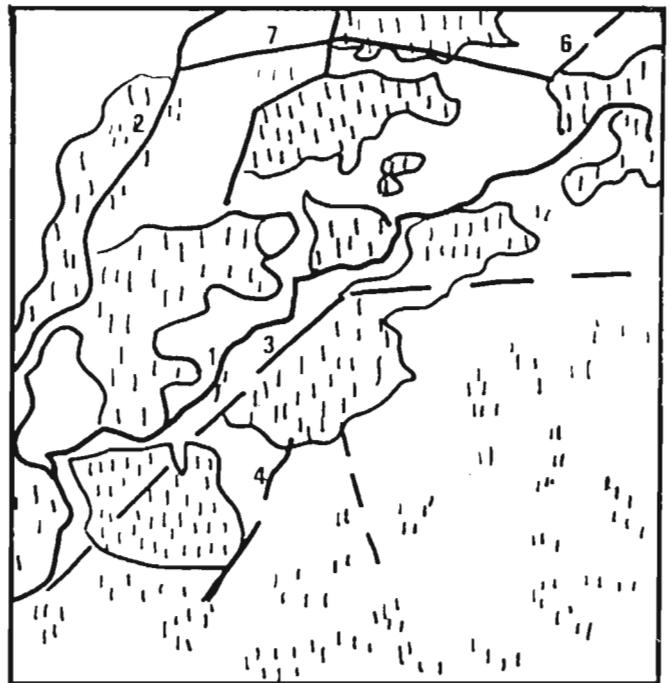
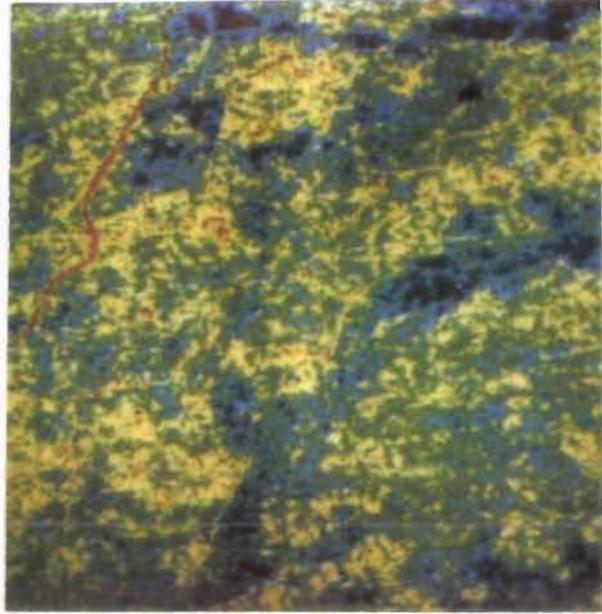
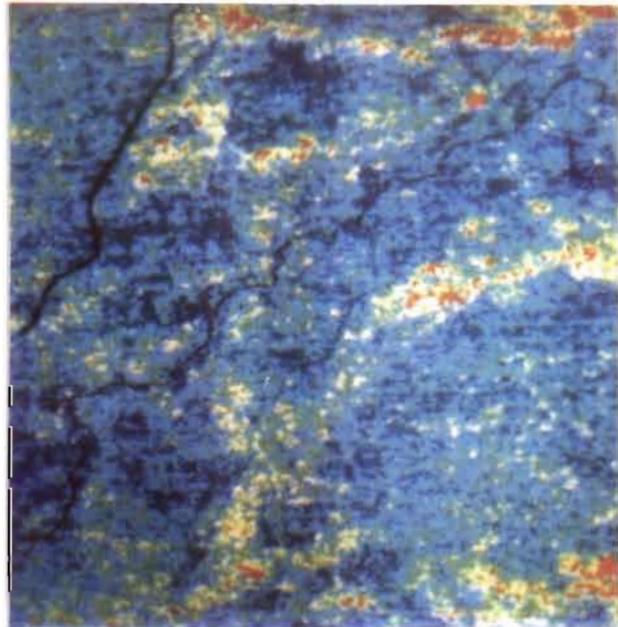


fig.11.Zonage sur indice de végétation verte.  
 1/2/3/4/5/6/7/ : cf. fig. 10  
 [Hatched box] Zones d'indice de végétation verte élevé (en blanc sur photo10).

11. Sous-zone Panihari. Première composante principale. Décomposition de l'information ; en rouge et en jaune : les contrastes les plus importants (réseaux zones "de végétation verte". (Photo d'écran Péricolor). cf. photo en noir et blanc (47) sur laquelle les réseaux linéaires sont plus nettement visibles.



12. Sous-zone Panihari. Deuxième composante principale. Autres contrastes : en rouge, jaune et vert clair (zones de sols nus.) (Photo d'écran péricolor.)



par les cartes topographiques où elles apparaissent cependant à une échelle beaucoup plus réduite que sur les images; ceci est probablement dû au fait que celles-ci font apparaître non seulement les dunes, mais aussi les étendues nues, sableuses ou non, des champs sans végétation par exemple. Si cette information était confirmée au sol, nous pourrions dire que l'image spatiale est plus précise, plus détaillée que la carte.

c. Présence de végétation ?

D'autres unités d'images peuvent être isolées ; on distingue notamment sur la composition colorée des bandes MSS deux types de taches homogènes, qui comme précédemment, doivent leur unité essentiellement à leur couleur : prédominance du vert pointillé de rouge pour l'une, prédominance du rouge pour l'autre; ce qui signale dans le premier cas, des objets très absorbants dans les bandes spectrales 7 (codée en rouge) et 5 (codée en vert) et dans le second cas, des objets très absorbants dans la bande spectrale 7. Nous en inférons qu'il s'agit de zones caractérisées par deux formes de végétation différentes : différences de cultures, de couverture du sol ? On ne peut aller plus avant dans l'interprétation de ces unités d'images et les cartes topographiques ne fournissent aucune information sur ce thème. Peut-être pouvons-nous cependant confirmer notre hypothèse par l'observation des indices de végétation. Les unités en rouge compact sur la composition colorée (canaux 4,5,7) apparaissent en valeurs hautes (en blanc) sur l'indice de végétation verte (indice élevé) et en valeurs plutôt basses sur l'indice de végétation jaune (indice faible) (ph.9 et 10; fig.10 et 11). A l'inverse, les unités d'image en vert clair taché de rouge sur la composition colorée, constituent sur les indices de végétation des zones de valeurs hétérogènes, en particulier sur l'indice de végétation verte,

Serions-nous donc ici en présence d'une végétation verte ? de zones cultivées ? et là d'une végétation plus sèche, plus jaune, de type herbacé ou arbustif sec ? Il est difficile de le dire en raison de la saison concernée : novembre, début de saison sèche, période de transition. La seule information incontestable est l'existence de zones aux limites bien marquées, dont la couverture au sol est différente, information que ne fournissent pas les cartes topographiques.

### 3.3. Conclusion

Parmi les images qui ont servi de base à l'analyse qui précède, il serait difficile d'élire celle qui, d'un point de vue thématique, apporte le plus d'information. Cette analyse tendrait plutôt à mettre en évidence leur complémentarité : information brute (canaux MSS bruts), synthèses (compositions colorées), étude d'un thème particulier (indices de végétation), décomposition et hiérarchisation de l'information (composantes principales). Chacune fournit selon sa définition des données sur le milieu local, qui sont tantôt similaires : elles permettent une délimitation fiable des unités homogènes, tantôt complémentaires : elles introduisent à un essai d'interprétation.

Dans tous les cas, ces images apparaissent beaucoup plus riches, plus complètes, parfois plus précises que les cartes topographiques. Cependant, en l'absence de données exactes sur cet espace, telles que pourraient en fournir des cartes thématiques détaillées, des photos aériennes ou encore une investigation de terrain, nous ne pouvons tirer parti de cette richesse, ni traduire cette information supplémentaire sous forme de légendes.

Il apparaît que les seules informations fiables, sont les informations morphologiques ; les seuls objets du paysage interprétables sans erreur sont les linéaments, du fait de l'existence de cartes détaillées sur ce thème, mais aussi en raison de leur forme, déterminée, stable dans le temps et dans l'espace et directement reconnaissable dans de nombreux cas. Mais la forme n'est pas toujours significative de la nature de ces objets : s'il est facile de différencier la route de la rivière, on ne peut en revanche différencier une route d'un canal.

La recherche d'écoulements hydrographiques actuels et anciens paraît tout à fait envisageable puisqu'elle peut ne pas s'appuyer sur l'interprétation des seules signatures spectrales, mais intégrer forme, texture, homogénéité des unités à rechercher. Il est cependant nécessaire, d'une part que les réseaux soient nettement visibles et continus pour être interprétés et d'autre part, que sans le recours aux signatures spectrales, les linéaments puissent être différenciés les uns des autres ; ce que ne permet pas la seule observation des images.

Nous avons ainsi été amenés à développer une recherche de méthodes et de procédures, c'est-à-dire d'enchaînements de traitements d'image, répondant à ces exigences.

## II - METHODES D'ETUDE, PROCEDURES DE TRAITEMENT

### 1. Les questions posées, la problématique

En l'absence de photos aériennes, dans des lieux où la réalité terrain est pour l'instant difficile, voire impossible, il était hasardeux d'entreprendre une étude mettant en jeu uniquement les réponses spectrales. En effet, s'il était possible d'identifier certaines correspondances entre la représentation des objets sur l'image et les mêmes objets sur le terrain (cf.I.3.), nous ne pouvions nous assurer de la validité de nos résultats. Le problème était donc le suivant : comment extrapoler à la fois sur le plan thématique, passer de l'objet "canal" au thème "réseau linéaire", et sur le plan spatial : identifier ailleurs la présence et les limites du thème ?

Nous avons recherché par conséquent des procédures simples et reproductibles apportant des résultats fiables, même sans terrain (au sens large du terme). Il nous est de ce fait apparu nécessaire de préférer les notions de texture et de forme pour l'identification des objets. Cette démarche est assez peu courante en traitement numérique d'images spatiales la plupart des études mettant en jeu les signatures spectrales de manière exclusive ou privilégiée.

Ainsi, nous ne considérons pas la nature physique des objets étudiés, mais leurs caractéristiques morphologiques ; la forme étant par ailleurs l'approche la plus simple, celle en tout cas qui s'offre en premier, au regard des images brutes. Avant de rechercher des canaux d'irrigation anciens et modernes, des routes

bitumées ou des chemins de terre, nous avons cherché à mettre en évidence des réseaux de linéaments, c'est-à-dire des pixels organisés, ordonnés, alignés, constituant des traits topographiques rectilignes ou peu courbes observables à l'échelle locale ou régionale. Ainsi, structure ou élément, ensemble ou partie, nous avons considéré le réseau avant tout comme une forme.

Les linéaments sont souvent peu lisibles sur l'image brute, peu continus, indistincts les uns des autres, et indistincts de leur environnement. Aussi, notre stratégie a-t-elle été de mettre d'abord en évidence tous ces objets présents sur l'image, puis de les classer, de les différencier les uns des autres, enfin d'extraire les éléments de réseau qui nous intéressent plus particulièrement. L'ensemble n'est envisageable qu'après amélioration de l'image, lorsque le contraste est suffisant entre les objets à extraire et le fond.

## 2. La stratégie

Nous présentons ici deux exemples, c'est-à-dire deux sous-zones de la scène Landsat MSS. Chacune de ces zones couvre une superficie d'environ 18 Km sur 18 Km, 300 pixels sur 300. (ph.1)

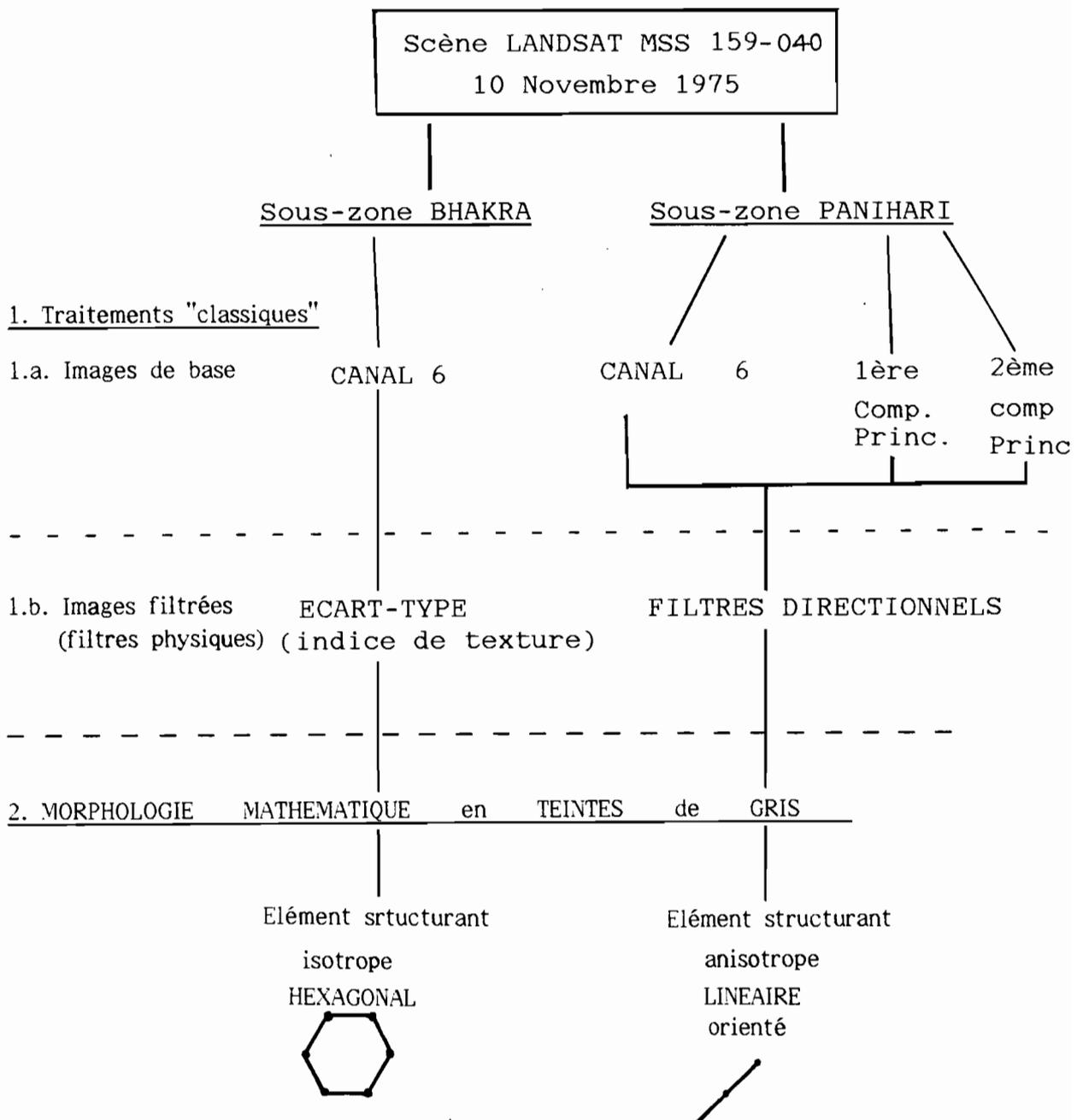
La sous-zone Bhakra (du nom du grand canal qui la traverse d'Est en Ouest) contient peu de réseaux ; elle a ,pour cette raison, servi de support à l'expérimentation des procédures. Nous avons décidé de la localisation de la seconde zone en accord avec archéologues et géo-archéologues concernés. Elle se situe dans la région du village Panihari, qui a fait l'objet de prospections archéologiques et où nous souhaitons mettre en évidence les tracés de canaux d'irrigation anciens

dont des indices étaient connus (identifiés sur les cartes anciennes).

Ces deux exemples ont fait l'objet d'une démarche générale commune ; les procédures expérimentées, comportent des méthodes statistiques et des filtres physiques ainsi que les principes de la Morphologie mathématique en teintes de gris.

L'algorithme suivant résume la succession des différentes étapes de traitement.

tabl.III. Les étapes du traitement des sous-zones Bhakra et Panihari



## 2.1 Méthodes d'analyse statistique et filtres physiques

Nous avons utilisé des méthodes d'analyse statistique et des filtres physiques pour l'amélioration des contrastes et la mise en évidence des linéaments. Nous avons procédé en deux temps : recherche d'une "image de base" puis réhaussement des contrastes sur l'"image de base".

### a. Recherche d'une "image de base"

Dans un premier temps, il fallait choisir une ou plusieurs images sur lesquelles réaliser les diverses transformations. Après expérimentation, nous avons retenu le canal 6, la première et la deuxième composante principale (appelées "images de base").

Parmi les quatre bandes radiométriques du système MSS, le canal 6, est effet celui qui discrimine le mieux les textures de végétation, notion intéressante, puisqu'on l'a vu, de nombreux réseaux sont bordés de façon plus ou moins continue par des arbres. C'est sur le canal 6 d'autre part, que l'on pouvait lire le plus grand nombre de linéarités (cf. I.3.). La rivière Ghagghar, n'apparaît pas, en effet, sur le canal 4 et est à peine perceptible sur le canal 5 ; la grande route de Rori, et le Suckchain canal (carte p. 70) ne sont pas restitués par le canal 7, par ailleurs très ligné.

Nous tenions également à tirer parti des avantages du multi-spectral en utilisant une méthode d'analyse statistique très courante dans d'autres disciplines : l'analyse en composantes principales ; comme les autres traitements multi-spectraux, elle permet de créer une nouvelle image, laquelle est une bonne synthèse des différentes bandes spectrales et donc

une restitution significative des paysages étudiés. Nous avons retenu comme images de base des traitements ultérieurs, la première et la deuxième Composantes; ce sont les plus intéressantes car les plus contrastées et les plus riches en réseaux linéaires (tabl.III).

b. Réhaussement des contrastes sur l'image de base

Deuxième étape : chaque procédure commence par le calcul, sur l'image de base, de filtres physiques (gradients orientés ou indice de texture). Il s'agit de traitements numériques tout à fait classiques, utilisés couramment pour l'analyse d'images. Ils procèdent par transformations linéaires, comme la convolution, pour modifier l'échelle des valeurs (dite "échelle des gris"), et produire une image dont les changements d'intensité, c'est-à-dire les transitions et donc les contours, sont réhaussés. Dans le cas des filtres directionnels, les gradients radiométriques sont spatialement accentués..

Ces filtrages permettent d'améliorer sensiblement nos images. Les linéaments, zones de contrastes par rapport à l'environnement, apparaissent en grand nombre ; ils sont identifiés par les valeurs extrêmes, minimales ou maximales de la nouvelle échelle des gris, ce qui est la condition d'exploitation des images par la morphologie mathématique.

Cependant, ces filtres linéaires sont des traitements locaux, ponctuels, ce qui présente de gros inconvénients lorsqu'on est à la recherche de formes et que l'on désire traiter des portions d'images de façon globale. Nous avons donc appliqué aux images préalablement filtrées des traitements de morphologie mathématique. Cette méthode, assez rarement utilisée en

analyse d'images de télédétection, images particulièrement complexes, permet en effet une approche intéressante des formes.

Nous exposons brièvement ci-dessous les principes et les transformations élémentaires de la morphologie mathématique.

## 2.2. La morphologie mathématique

### a. Principes

L'idée de base de la morphologie mathématique, développée dans les années soixante à l'Ecole des Mines de Paris par G. Matheron et J. Serra, est de comparer les objets que l'on veut analyser à un autre objet de forme connue appelé élément structurant. Si l'on cherche à décrire une forme, on se réfère en effet généralement à un autre forme, géométrique, parfaitement définie. Chaque élément structurant fait ainsi apparaître l'objet sous un jour nouveau ; la Morphologie Mathématique est en cela "une manière de voir" : on ne voit que ce que l'on décide de regarder et c'est ce qui est perçu qui est transformé. Ainsi, on ne se place pas du côté de l'objet, mais du côté de l'observateur ; c'est cet observateur que l'on code.

Pour traiter nos images en morphologie mathématique, nous avons utilisé le logiciel Morpholog, dont le programme original a été développé en Fortran à l'Ecole des Mines de Fontainebleau et adapté depuis septembre 1985 à l'Atelier de Télédétection de l'ORSTOM à Bondy. C'est grâce à la disponibilité de ce logiciel que nous avons pu utiliser les principes de la morphologie mathématique, particulièrement bien adaptés à notre étude.

Cette méthode, utilisée depuis longtemps dans d'autres disciplines (sciences des matériaux, robotique, médecine, biologie, botanique etc.) est encore très peu développée en analyse d'images spatiales. Contrairement aux techniques, désormais classiques, qui procèdent par transformations linéaires, comme la convolution, pour filtrer, souligner les frontières en dégradés de valeurs, traitements locaux et ponctuels, la morphologie mathématique apporte, par ses méthodes ensemblistes et géométriques une nouvelle approche, dans la mesure où elle ne s'appuie pas seulement sur les radiométries, mais extrait les formes en fonction de leur voisinage.

La notion de voisinage signifie qu'après une opération, la valeur d'un pixel dépendra non seulement de sa propre valeur initiale, mais aussi de celle de ses voisins. Afin d'éviter les ambiguïtés qui existent en trame carrée : faut-il prendre quatre voisins ou huit voisins, on passe en trame hexagonale :

c	c	c	c	h	h	h	h
c	c	c	c	h	h	h	h
c	c	c	c	h	h	h	h

Les opérations de morphologie mathématique nécessitent donc une transformation préalable de l'image (initialement en trame carrée), qui s'effectue par le programme DISHEX (cf. p. 125)

La morphologie mathématique s'applique à des images binaires (cf. travaux effectués sur image RBV ; Annexe ) et à des images en teintes de gris. Il était difficile de binariser les sous-zones choisies, qui même après réhaussement des contrastes, n'étaient pas seuillables. Or, cette opération, qui consiste à supprimer une partie de l'information à un niveau donné, n'est intéressante que s'il est possible de déterminer

un ou des seuils nets. Dans notre cas, l'éclaircissement des objets n'était pas uniforme, les objets eux-mêmes, non suffisamment contrastés par rapport au fond.

Les images en teintes de gris sur lesquelles nous avons par conséquent travaillé, sont définies par une fonction  $f(x)$  où  $f(x)$  représente l'amplitude du signal radiométrique au point  $x$ . Dans ce cas, ce n'est pas l'image qui est transformée (morphologie mathématique binaire), mais la fonction en teintes de gris, qui seule est affectée par l'élément structurant.

#### b. Les transformations morphologiques

La Dilatation, l'Erosion, l'Ouverture, et la Fermeture ne sont pas les seules transformations morphologiques, mais elles en constituent l'ossature.

La Dilatation et l'Erosion modifient les niveaux de gris en de nombreux points de l'image. Elles sont itératives ; il est donc possible d'effectuer à la suite, plusieurs transformations de ce type avec le même élément structurant.

L'Ouverture et la Fermeture par contre, ne modifient la fonction en niveaux de gris qu'en certains points. Elles ont la propriété d'être idempotentes ; ainsi, si l'on itère l'opération avec un élément structurant de taille constante, l'image ne bouge plus. Notons qu'il est plus sévère d'éroder avant de dilater (Ouverture) que de faire le processus inverse (Fermeture). Cette propriété sera mise à profit lorsque l'on cherchera à "nettoyer" les images.

Dans le premier exemple (sous-zone Bhakra),

nous avons utilisé un élément structurant hexagonal ; l'hexagone est la forme la plus proche du cercle et donc la plus isotrope : il ne privilégie aucune direction puisqu'il opère sur six points. Dans le second exemple, nous avons intégré la notion de direction et d'orientation dans la recherche des procédures. Nous avons adopté à cet effet un élément structurant directionnel (ou anisotrope) linéaire opérant sur trois pixels dans une seule direction que nous avons choisie parallèle à la structure d'ensemble de l'image, c'est-à-dire Nord-Est / Sud-Ouest.(tabl.III)

Ainsi, dans un premier temps, au risque d'obtenir trop d'informations, nous avons amélioré l'image en réhaussant les contrastes de façon à mettre en évidence un grand nombre de réseaux. Cette opération n'a pas atteint uniquement les linéaments, qui apparaissent souvent de façon discontinue, en tout cas peu nette et peu précise, dans un environnement de valeurs très hétérogènes. Dans un deuxième temps, nous attendions des techniques de la morphologie mathématique la bonne restitution et si possible l'extraction, la différenciation et la hiérarchisation des réseaux linéaires. Il s'agissait de concentrer notre intérêt sur un seul aspect de l'image : les linéaments, de la "nettoyer", c'est-à-dire d'éliminer les pixels isolés correspondant à d'autres unités de paysage, qui gênent la visualisation des réseaux linéaires. Nous perdions ainsi beaucoup d'informations sur l'environnement des réseaux, mais aussi, inévitablement, sur les réseaux eux-mêmes.

La combinaison de ces deux démarches très différentes que sont l'utilisation de traitements classiques (méthodes d'analyse statistique, filtres physiques) et celle de la morphologie mathématique est donc

basée sur l'acquisition et la perte d'information. Le problème est de savoir gérer ces acquisitions et ces pertes.

A travers deux exemples, sous-zone Bhakra et sous-zone Panihari, sont présentées ci-dessous des procédures définies par des séquences d'opérations de transformation des images.

### 3. Les images - les procédures de traitement

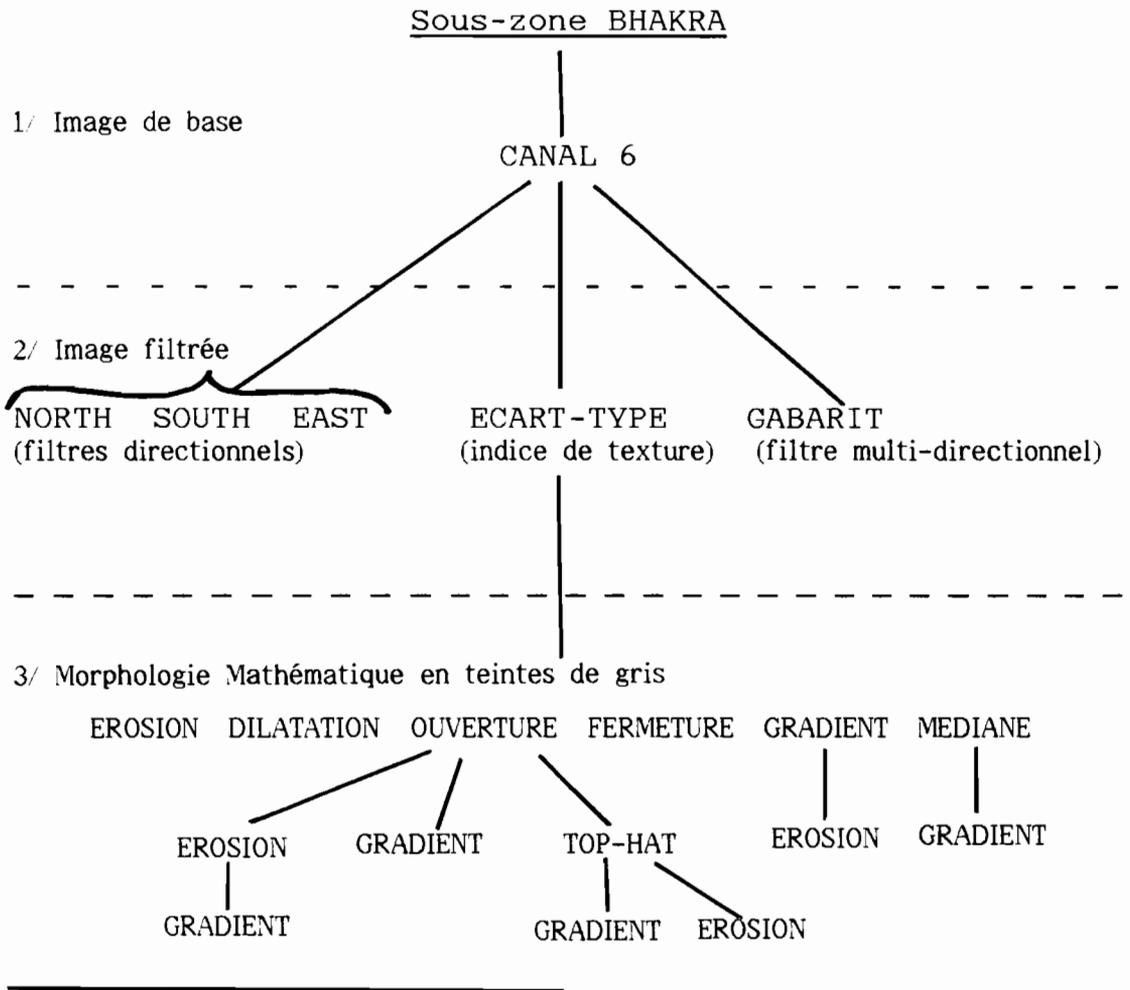
#### 3.1. La sous-zone Bhakra

La sous-zone Bhakra porte dans la vue Landsat les coordonnées 1666 à 2177 en lignes, 1525 à 2036 en colonnes.

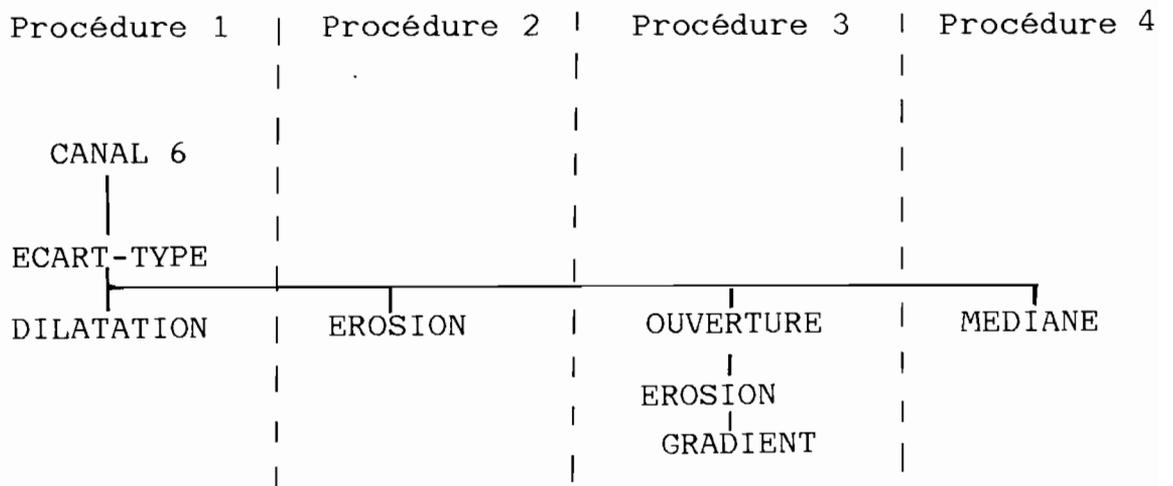
Nous cherchions à extraire deux réseaux hydrographiques différents : un canal d'irrigation du X<sup>e</sup> siècle, le canal Bhakra, espace en eau régulièrement bordé d'arbres sur les deux côtés et la Ghagghar, rivière semi-permanente, en eau au moment de la prise de vue, irrégulièrement encadrée de bosquets d'arbres. Par "extraction", nous entendons non seulement la visualisation des linéarités, mais aussi la séparation complète entre les objets recherchés et un fond homogène. Seules les images bien contrastées, avec des phases de niveaux de gris uniformes peuvent être analysées automatiquement. Ici, l'image ne permet pas d'extraction directe des objets : les valeurs radiométriques, plutôt basses pour les deux réseaux, ne les discriminent pas de certains autres objets présents sur l'image (cultures irriguées, villages à bosquets etc.)

Compte tenu de l'objectif fixé, nous avons utilisé les méthodes statistiques puis les transforma-

IV. Sous-zone Bhakra : ensemble des procédures expérimentées



V. Sous-zone Bhakra : les procédures les plus plus satisfaisantes



tions de base de la morphologie mathématique. Nous avons expérimenté beaucoup de procédures (tabl. IV.); nous ne présentons que les plus satisfaisantes (tabl. V.)

Les quatre procédures décrites ci-dessous commencent toutes par le calcul de l'indice de texture: écart-type, sur l'image de base : le canal 6. Cette opération consiste à remplacer le pixel central d'une maille carrée 3x3 par la valeur de l'écart-type calculé à l'intérieur de cette maille ; ce qui a pour effet de réhausser les valeurs des pixels appartenant à des taxons dont la texture est hétérogène.

Cette opération qui, comme nous l'avons vu plus haut, vise à améliorer les contrastes de l'image, tout en affectant les réseaux linéaires des valeurs extrêmes de l'échelle des gris, ne permet pas de différencier l'un de l'autre le canal et la rivière, non plus que les objets géographiques de même nature ayant des signatures spectrales voisines et des formes différentes. C'est cependant une bonne image sur laquelle effectuer les transformations élémentaires de morphologie mathématique en teintes de gris. En effet, les deux réseaux apparaissent dans des valeurs hautes (ou "pics") et sont bien contrastés par rapport à l'environnement dont les valeurs ont été lissées par l'application de l'indice.

a. Procédure 1 (tabl. V.)

Canal 6  
↓  
Ecart-type  
↓  
Dilatation

La Dilatation d'une fonction  $f$  par l'élément structurant  $B$  est la fonction notée  $f \oplus B$  dont la valeur au point  $x$  est la plus haute valeur atteinte

par  $f$  à l'intérieur de l'élément structurant  $B$  centré sur le point  $(x ; f(x))$  (fig.12).

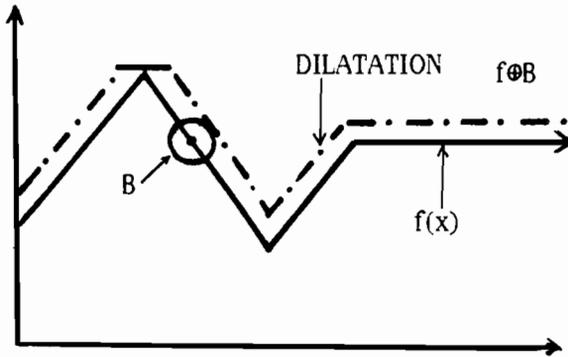


fig.12. Dilatation de la fonction en teintes de gris

Autrement dit, chaque valeur des pixels est remplacée par la plus forte valeur du voisinage ; rappelons qu'en trame hexagonale, chaque point a sept voisins, lui-même compris. Ainsi, la Dilatation comble les vallées (valeurs minimales) et épaissit

les pics (valeurs maximales) de la fonction en teintes de gris. En conséquence, les zones de valeurs élevées s'étendent ; nous cherchons par là à accentuer la largeur des deux réseaux, de façon à améliorer leur lisibilité et à rendre le fond plus homogène.

b. Procédure 2 (tabl. V.)

Canal 6  
↓  
Ecart-type  
↓  
Erosion

L'Erosion d'une fonction  $f$  par l'élément structurant  $B$  est la fonction notée  $f \ominus B$ , dont la valeur au point  $x$  est la plus petite valeur atteinte par  $f$

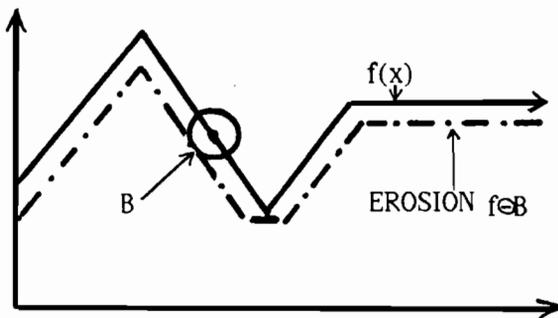


Fig.13. Erosion de la fonction en teintes de gris.

à l'intérieur de l'élément structurant  $B$  centré sur le point  $(x ; f(x))$ , (fig.13.).

Chaque pixel est donc remplacé par la plus faible valeur du voisinage (sept voisins). L'Erosion élargit

les vallées et amincit les pics de la fonction en teintes de gris. Ainsi, les zones de valeurs basses s'étendent ; les réseaux seront amincis.

c. Procédure 3 (tabl. V)

canal 6  
↓  
Ecart-type  
↓  
Ouverture  
↓  
Erosion  
↓  
Gradient

L'Ouverture est une Erosion suivie d'une Dilatation. La combinaison de ces deux transformations a pour effet de raser les pics isolés et par conséquent de diminuer les contrastes dans les valeurs hautes.

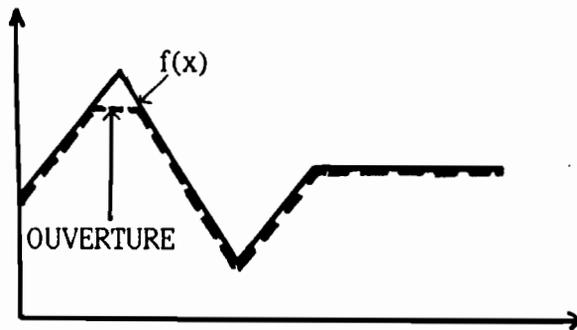


fig.14. Ouverture de la fonction en teintes de gris

Les parties de l'image correspondant à de très faibles variations de gradient, ne sont pas modifiées. L'Ouverture n'a pas d'effet sur les valeurs radiométriques basses. (fig. 14.)

L'Erosion sur Ouverture amincit les zones de valeurs hautes.

Le Gradient morphologique, au sein d'un élément structurant hexagonal, calcule la plus grande différence dans l'hexagone. C'est la soustraction : Dilatation - Erosion, la Dilatation donnant le maximum, l'Erosion le minimum. On obtient ainsi un réhaussement des contrastes locaux.

L'efficacité consistait pour cette procédure en

un lissage par l'Ouverture suivi d'un amincissement des réseaux linéaires puis du réhaussement des contrastes par le Gradient. (fig. 15)

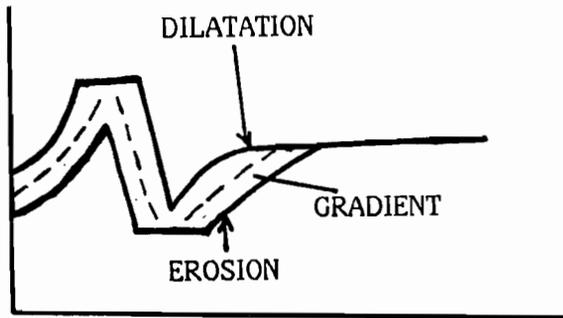


fig. 15 Gradient morphologique

#### d. Procédure 4 (tabl. V)

Canal 6  
↓  
Ecart-type  
↓  
Médiane

La Médiane produit un lissage de l'image, chaque point étant remplacé par la médiane des sept valeurs du voisinage.

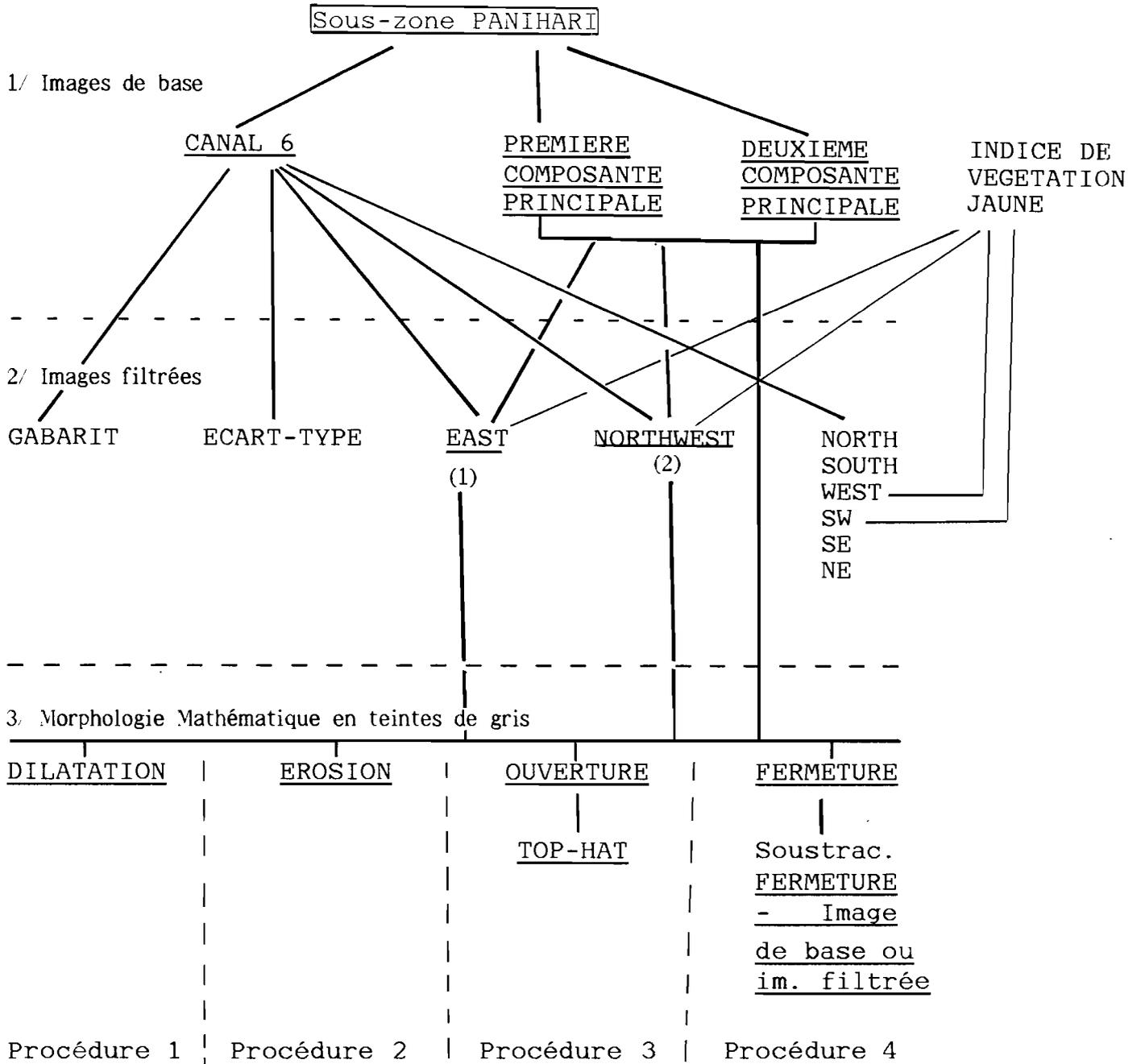
Ces procédures visaient la mise en évidence des formes et le nettoyage du fond. Ces deux opérations conjuguées devaient permettre l'extraction des deux réseaux. Le deuxième exemple reprend certaines de ces procédures pour répondre à des objectifs quelque peu différents.

### 3.2. La sous-zone Panihari

La sous-zone Panihari est placée dans la vue Landsat aux coordonnées suivantes : lignes 1994 à 2249, colonnes 1401 à 1700.

Ce secteur a plus précisément fait l'objet

tabl.VI . Sous-zone Panihari : ensemble des procédures expérimentées (seules les opérations dont les noms sont soulignés ont été retenues)



- (1). Pour les transformations morphologiques réalisées à partir du canal 6 filtré par le gradient East, nous avons utilisé un élément structurant hexagonal.
- (2). Les transformations morphologiques réalisées sur le canal 6 filtré par gradient Northwest, ont été effectuées avec un élément structurant hexagonal et avec un segment.

d'une recherche sur la classification des différents types de réseaux présents sur l'image :

- réseaux hydrographiques : la rivière Ghagghar et les canaux d'irrigation qui se différencient selon leur largeur et leur bordure (rangées d'arbres régulières, canaux dédoublés, complexe route-canal etc.) ; plus, non identifiables en tant que telles sur les images d'origine, des traces d'irrigation ancienne matérialisées au sol par les talus ensablés sur lesquels ils ont été édifiés.

- réseaux de communication qui se hiérarchisent en fonction de leur largeur, de leur revêtement, de leurs bordures.

### 3.2.1. Recherche des images de base

En premier lieu, nous avons recherché, comme dans l'exemple précédent (3.1.), une image de base satisfaisante, retenant, pour les mêmes raisons, après expérimentation, le canal 6 ainsi que des images multispectrales : la première et la deuxième composante principale et les indices de végétation verte et de végétation jaune (tabl. VI).

Le principe de l'analyse en composantes principales, connue sous le nom de transformée de Karhunen-Loeve en traitement d'image, est que l'énergie réfléchie par le sol, enregistrée par Landsat dans les quatre bandes spectrales, est hautement corrélée (les coefficients de corrélation de Pearson vont, pour notre image, de 0,60 (canaux 5 et 7) à 0,96 (canaux 4 et 5)). Il existe donc une abondance considérable d'informations, que le traitement en composantes principales a pour but de résumer. Il substitue en effet à un repère multidimensionnel d'un ensemble de  $p$  variables décrivant  $n$  individus, un nouveau système d'axes

orthogonaux, donc non corrélés entre eux et hiérarchisés. Ils sont obtenus par rotation des valeurs de pixels pour chaque bande spectrale jusqu'à la création de cette nouvelle répartition selon un espace à quatre dimensions.

Le premier axe est celui qui porte la plus grande part de variance : 93,4 % du total ; la variance expliquée par les axes suivants est bien moindre : 6,3 % pour le deuxième, 1,08 % pour le troisième, 0,8 % pour le quatrième. Il est impossible de faire un raisonnement physique sur les composantes principales, les valeurs des pixels étant sans signification après cette transformation. Notons également que les résultats de l'analyse ne peuvent être extrapolés, celle-ci ayant été réalisée sur un échantillon et non sur l'image entière (opération qui eut été beaucoup trop longue). Le fichier de données a été créé à partir de points tirés de façon systématique sur toute la sous-zone. Nous avons cependant obtenu deux images bien contrastées (davantage que le canal 6) et riches en réseau linéaires, donc à priori deux images de base satisfaisantes.

Nous avons également tiré parti de l'existence de données multispectrales en calculant sur cette sous-zone l'indice de végétation verte et l'indice de végétation jaune dont les principes sont précisément fondés sur l'existence de différences de réflectance pour un même objet entre les bandes radiométriques. Les opérations arithmétiques effectuées entre les canaux, permettent de mettre en évidence certains aspects de l'image. Ainsi, le rapport, canal 7 - canal 5 / canal 7 + canal 5, fait ressortir en valeurs hautes (indice élevé) les zones de végétation verte ; le rapport (ou ratio) canal 6 - canal 5 / canal 6 + canal 5 a le même effet sur les zones de végétation jaune.

La végétation étant, nous l'avons vu, lorsqu'elle se présente sous la forme de linéaments, un bon révélateur de la présence des réseaux de canaux d'irrigation, des rivières et des routes, les images obtenues sont, à priori, satisfaisantes, surtout très riches en linéarités et apparemment bien contrastées. L'indice de végétation a d'autre part l'avantage d'introduire une différenciation entre les réseaux bordés d'arbres et les autres. A cet égard, l'indice de végétation jaune est le plus satisfaisant.

### 3.2.2. Réhaussement des contrastes

Dans un deuxième temps, afin de réhausser les contrastes, nous avons appliqué aux quatre images de base choisies (le canal 6, la première et la deuxième composante principale, l'indice de végétation jaune) des filtres physiques locaux : gradients directionnels principalement. Ce type de filtre linéaire permet d'extraire un gradient dans une seule direction, la direction perpendiculaire à l'axe de symétrie de la matrice associée (perpendiculaire à la direction qu'indique le nom du filtre).

Après expérimentation, nous avons retenu les filtres East et Northwest (nomenclature Pratt, 1978) réhaussant les contrastes dans la direction Nord-Est/Sud-Ouest, c'est-à-dire selon l'orientation régionale mise en évidence par les réseaux principaux et la structure dunaire.

On obtient de tels filtrages en effectuant un produit de convolution de l'image par une matrice de coefficient 3x3 (1). Le contenu de chaque pixel

---

(1) . La maille 3x3 est la maille élémentaire en traitement numérique d'image : elle limite le nombre de voisins à prendre en compte et nécessite donc moins d'opérations.

et des huit pixels qui l'entourent est pondéré par neuf coefficients positifs et négatifs. La somme des produits partiels donne le nouveau contenu du pixel central, ce qui peut être exprimé sous la forme suivante :

soit A B C  
D E F  
G H I les neuf coefficients de la matrice.

soit Na, Nb... Ni les contenus des pixels qui forment un carré de 3x3. La nouvelle valeur du pixel central sera :

$$N'e = (A.Na) + (B.Nb) + \dots (I.Ni)$$

ou

$$N'e = \sum (Kn.Nn)$$

Le filtre East a pour coefficients :  
-1 1 1  
-1-2 1  
-1 1 1

et le filtre Northwest :  
1 1 -1  
1-2 -1  
1 1 -1

Le produit de convolution étant une somme, il attribue à la transformation des valeurs beaucoup plus élevées, hors du domaine 1/255 de l'échelle d'origine. On normalise le résultat par une interpolation linéaire, qui fait correspondre aux valeurs 0 et 255 les valeurs minimales et maximales de la nouvelle échelle.

Ces filtres appliqués au canal 6, à la première et à la deuxième composante principale, ont amélioré sensiblement la lisibilité des réseaux principaux en leur conférant des valeurs élevées qui permettent de les individualiser. Il se sont révélés par contre, totalement inefficaces sur l'indice de végétation jaune, brouillant l'image, noyant les réseaux dans un environnement très hétérogène. Cette image de base, très satisfaisante selon des critères purement

visuels, n'était sans doute pas suffisamment contrastée par ses valeurs numériques, ni les directions suffisamment identifiées ; aussi le filtre ne les a-t-il pas mis en valeur.

Ces filtres ont, par définition, l'inconvénient de ne restituer que certaines directions ; les réseaux non parfaitement rectilignes ou dont l'orientation diffère de celle du gradient, apparaissent de façon discontinue ou disparaissent. Ces opérations filtrent les teintes de gris sans filtrer les formes. Il s'agit de traitements ponctuels et locaux ; or, nous recherchons des objets linéaires que nous désirons traiter de façon globale, afin que leur continuité soit restituée. Nous avons donc eu recours aux méthodes de la morphologie mathématique.

### 3.2.3. L'utilisation de la morphologie mathématique

Nous avons mis à profit l'implantation récente à l'Atelier de Télédétection de l'ORSTOM d'un programme permettant d'effectuer sur l'image les mêmes transformations que précédemment (3.1), mais avec un élément structurant linéaire, anisotrope. Les structures à analyser étant elles-mêmes anisotrope, c'est-à-dire qu'elle possèdent des propriétés morphologiques différentes selon leur orientation, l'emploi d'un tel élément structurant, était parfaitement approprié. Il a pour effet de renforcer les linéarités de "boucher les trous" sans empâter, épaissir les traits. Le segment pouvait être orienté dans une des huit directions de la rose des vents. Constatant que la structure régionale était orientée Nord-Est/Sud-Ouest, nous avons choisi un segment parallèle à cette direction (tabl.III.) donc de même orientation que les filtres (3.2.2).

Le raisonnement morphologique s'appuie, rappelons-le, sur les valeurs extrêmes (minima ou maxima) de l'échelle des gris. Au regard des images de base, nous avons constaté que les petits réseaux qui apparaissent par tronçons ou les réseaux faiblement perceptibles, sont identifiés par des valeurs radiométriques basses, alors que les réseaux les plus importants, apparaissent en valeurs hautes. Sachant que les linéaments importants résisteraient (pour des raisons de nature physique) à toutes les transformations, même celles qui affectent les valeurs hautes, nous avons préféré utiliser des traitements opérant sur les vallées radiométriques, souhaitant d'une part les élargir, d'autre part nettoyer le reste de l'image : pics isolés, vallées isolées non significatives, et même, les réseaux importants, connus, identifiés, et donc "inintéressants".

#### 3.2.4. Les procédures de traitement

Les transformations morphologiques présentées ci-dessous, ont été effectuées sur huit images : images de base brutes ou images de base filtrées. Il s'agit: - du canal 6 filtré par le gradient Northwest et par le gradient Est,

- de la première et de la deuxième composante principale,

- de la première composante principale filtrée par les gradients Northwest et East

- de la deuxième composante principale filtrée par les gradients Northwest et East.

##### a. Procédure 1 (tabl. VI)

Image de base  
↓  
Image filtrée (?)  
↓  
Dilatation

Le programme informatique utilisant l'élément structurant linéaire, ne permet pas de réaliser directement les opérations d'Ouverture et de Fermeture. Il était donc obligatoire d'effectuer une Dilatation précédée pour l'Ouverture, suivie pour la Fermeture, d'une Erosion. La Dilatation, qui élargit les réseaux en pics et comble les vallées radiométriques, est trop sévère à l'égard des réseaux fins ; nous avons cependant conservé ces images afin de juger ultérieurement de leur qualité. Nous pourrions ainsi apprécier les effets d'une telle transformation et par là, valider le bien-fondé de notre à priori : un travail sur les valeurs basses.

b. Procédure 2 (tabl. VI)

Image de base  
↓  
Image filtrée (?)  
↓  
Erosion

L'Erosion amincit les pics de la fonction en teintes de gris, par conséquent, les réseaux principaux. Par ailleurs, elle élargit les zones de valeurs basses. Nous attendions de l'Erosion, qu'elle élimine les pics et les vallées isolées, donc qu'elle nettoie le fond et élargisse les réseaux fins en valeurs basses (réseaux sombres).

c. Procédure 3 (tabl. VI)

Image de base  
↓  
Image filtrée  
↓  
Ouverture  
↓  
Top-hat

A la suite d'une Erosion, la Dilatation

permet un nettoyage plus important, plus sévère de l'image. Sans toucher aux basses valeurs (et donc aux réseaux fins en vallée mis en évidence par l'Erosion), l'Ouverture supprime les pics étroits ou la partie étroite des pics. On attend donc d'elle un nettoyage du fond, et la conservation des réseaux étroits sombres.

A la suite de l'Ouverture, et à titre expérimental, nous avons essayé d'appliquer à l'image de base ce qu'il a été convenu d'appeler : "Top-hat" (ou transformation en chapeau haut de forme). Le Top-hat est la différence entre la fonction et son Ouverture, c'est à dire entre l'image de base (ou l'image filtrée) et son Ouverture. Cette opération ne conserve que les pics étroits, les sommets, en fonction de leur hauteur, puisque l'Ouverture élimine les pics. Elle met en valeurs hautes certains linéaments, mais les plus ténus (vallées profondes) disparaissent.

#### d. Procédure 4

Image de base  
↓  
Image filtrée (?)  
↓  
Fermeture  
↓  
Soustraction : Fermeture - image de base (ou image filtrée)

La Fermeture est une Dilatation suivie d'une Erosion. Cette transformation a pour effet de combler les vallées de la fonction en teintes de gris ; elle entraîne donc la disparition des petites zones de valeurs basses et nettoie ainsi l'image (de façon moins sévère que l'Ouverture) en supprimant les pixels isolés sombres. Cette opération peut paraître dangereuse pour les réseaux fins ; en fait, elle n'affecte que les vallées étroites. Elle constitue une étape intéres-

sante, mais intermédiaire puisqu'il existe un moyen

pour n'extraire que les vallées : nous avons appliqué aux images le symétrique du Top-hat, c'est-à-dire la différence entre la Fermeture et l'image filtrée.

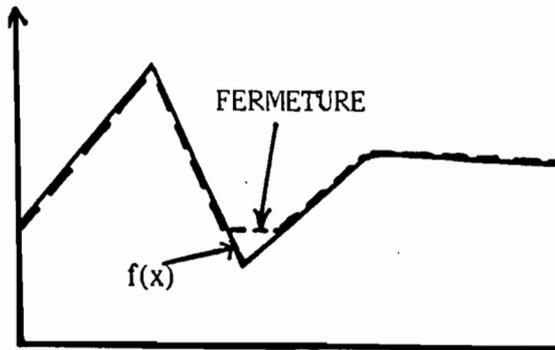


fig16 Fermeture de la fonction en teintes de gris

Cette opération doit réhausser les linéarités sombres sur l'image de départ, c'est-à-dire les réseaux fins, peu visibles.

A la fin de cet exposé théorique des méthodes adoptées, il convient de souligner que la morphologie mathématique étant un outil nouveau en traitement d'images spatiales, nous n'avons pu nous appuyer que sur ses concepts, choisissant telles opérations en fonction de leurs effets théoriques. En effet, le traitement d'image par morphologie mathématique est plus couramment réalisé sur des images (métallographie, robotique, médecine) moins complexes et beaucoup plus contrastées que des images spatiales de la Terre et à fortiori que la nôtre. Il était donc assez difficile de prévoir les résultats concrets de telle ou telle opération sur les zones étudiées. C'est en tirant parti de l'expérimentation sur l'image simple (sous-zone Bhakra), ne présentant qu'un petit nombre de réseaux que nous avons extrapolé sur la sous-zone plus complexe (Panihari). Notons un des avantages de la morphologie mathématique : la rapidité opératoire des transformations (quelques minutes) et de leur visualisation, qui permet ici, dans cette recherche expérimentale, un certain empirisme.

Il s'agit maintenant d'analyser, de façon systématique, les résultats de tous ces traitements afin de les confronter avec la théorie, de comparer les résultats des mêmes transformations sur des zones différentes, d'étudier s'il est possible ou non d'élaborer un modèle de traitement permettant la mise en évidence et la différenciation des réseaux linéaires.

### III - LES RESULTATS

La phase expérimentale de cette étude (cf. II) a fourni une quantité importante de données sous la forme de photographies d'écran Péricolor. Nous disposons d'une diapositive de chaque image (image brute ou image traitée) prise avec la meilleure dynamique de visualisation, la meilleure lisibilité des réseaux linéaires.

Nous pouvons dire, sur simple projection de ces diapositives, quels sont les "bons" traitements et quels sont les "moins bons". C'est de cette façon qu'en cours d'expérimentation, nous avons fait des choix de traitements et de procédures, laissant à chaque fois de côté les résultats peu intéressants, tentant au contraire, d'approfondir les résultats plus probants. Cependant, sur une centaine de photographies, de tels jugements s'appuyant sur une vision globale de l'image, ne peuvent être que relatifs, subjectifs et rapides. Ils ne se réfèrent pas en tout cas à des critères de satisfaction précisément définis. Il est donc nécessaire d'analyser maintenant, de façon systématique, les données en notre possession, de répondre pour chaque image, donc pour chaque traitement, à un ensemble de questions précises, définies en fonction de critères à la fois méthodologiques et thématiques.

#### 1. Les critères de satisfaction

##### 1.1. Méthode d'analyse des données

En premier lieu, la question posée est celle de la présence ou non d'un ou de plusieurs réseaux linéaires sur l'image. La réponse fait appel à deux

notions : la perception et la lecture. La première est simple, physiologique et subjective ; il s'agit de repérer un linéament, c'est-à-dire un alignement de pixels suffisamment proches et contrastés par rapport au voisinage, pour que la linéarité soit perceptible par l'oeil. La notion de lecture est plus précise, elle implique celle d'identification ; les termes "réseau linéaire", ne doivent s'appliquer qu'à des alignements de pixels thématiquement interprétables.

Les cartes topographiques sont utilisées en comparaison avec les images pour différencier les réseaux des artefacts et les réseaux entre eux (canaux, rivière, routes, chemins). Les cartes topographiques plus anciennes (1902 et 1915) permettent par ailleurs, d'identifier les réseaux d'irrigation non fonctionnels datant du début du XX<sup>e</sup> siècle, voire de la fin du XIX<sup>e</sup>, et de faire apparaître des traces de vestiges plus anciens de l'occupation du sol. Au niveau d'une étude qui est avant tout expérimentale, le recours aux cartes topographiques répond donc à plusieurs nécessités : juger de l'efficacité des procédures, définir les limites des résultats obtenus, déterminer leur degré de fiabilité.

Afin d'obtenir un document objectif et stable, qui soit la synthèse de toutes les informations en notre possession sur le tracé des réseaux linéaires, les quatre cartes (1:250 000, 1977 ; 1:253 000, 1902 ; 1:50 000, 1977 ; 1:63 000, 1915) ont été mises à la même échelle ; elles sont ainsi superposables aux diapositives des images traitées, agrandies par la visionneuse. Données satellitaires (images brutes et traitées) et cartes topographiques sont donc directement comparables, les alignements de pixels identifiables ou non ; les apports respectifs de ces deux types de document, peuvent être définis (fig.17 et 18)

fig.17. Sous-zone Panihari : les réseaux : canaux -actuels et anciens-, routes, chemins ; synthèse des cartes topographiques.

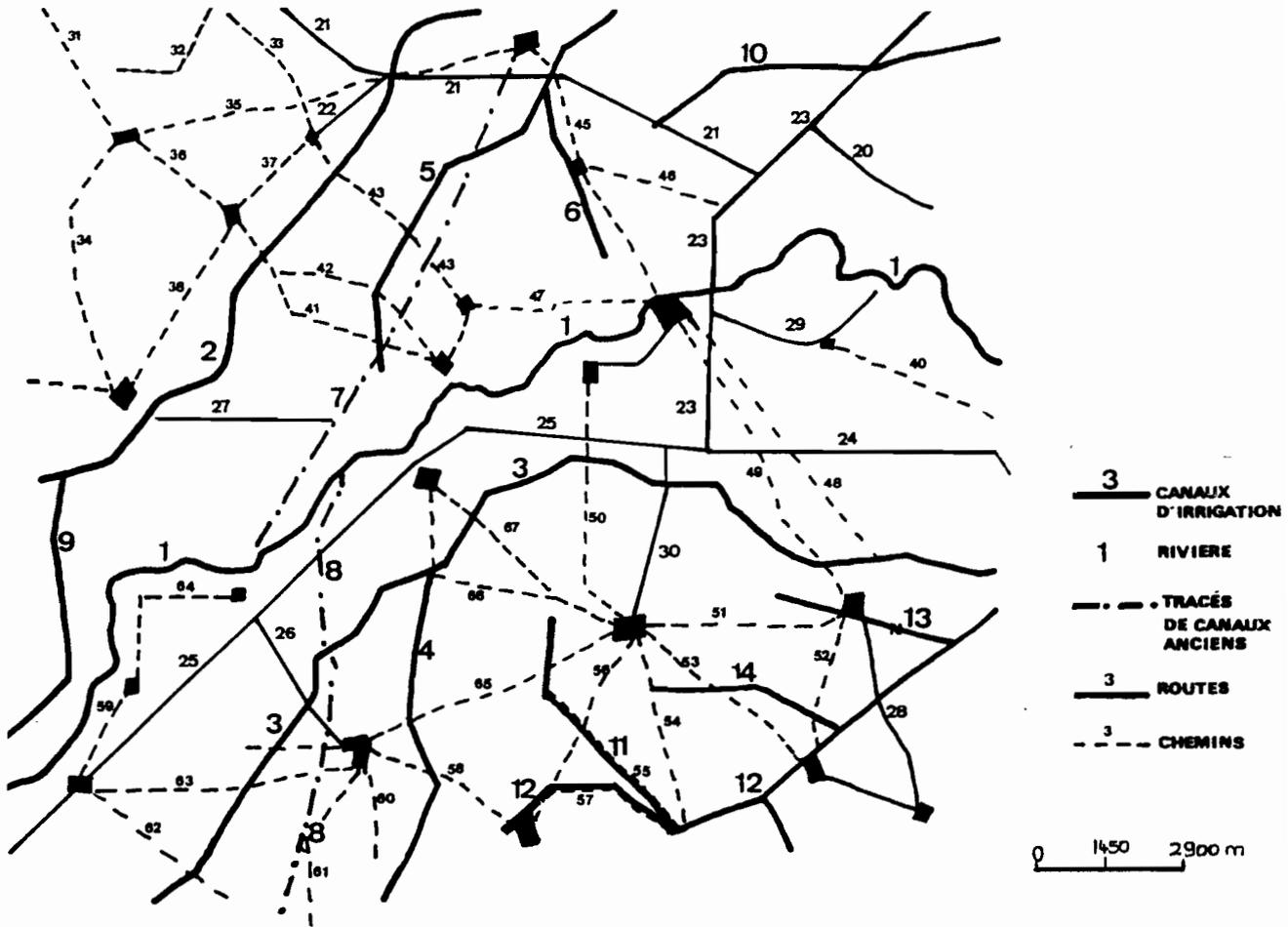
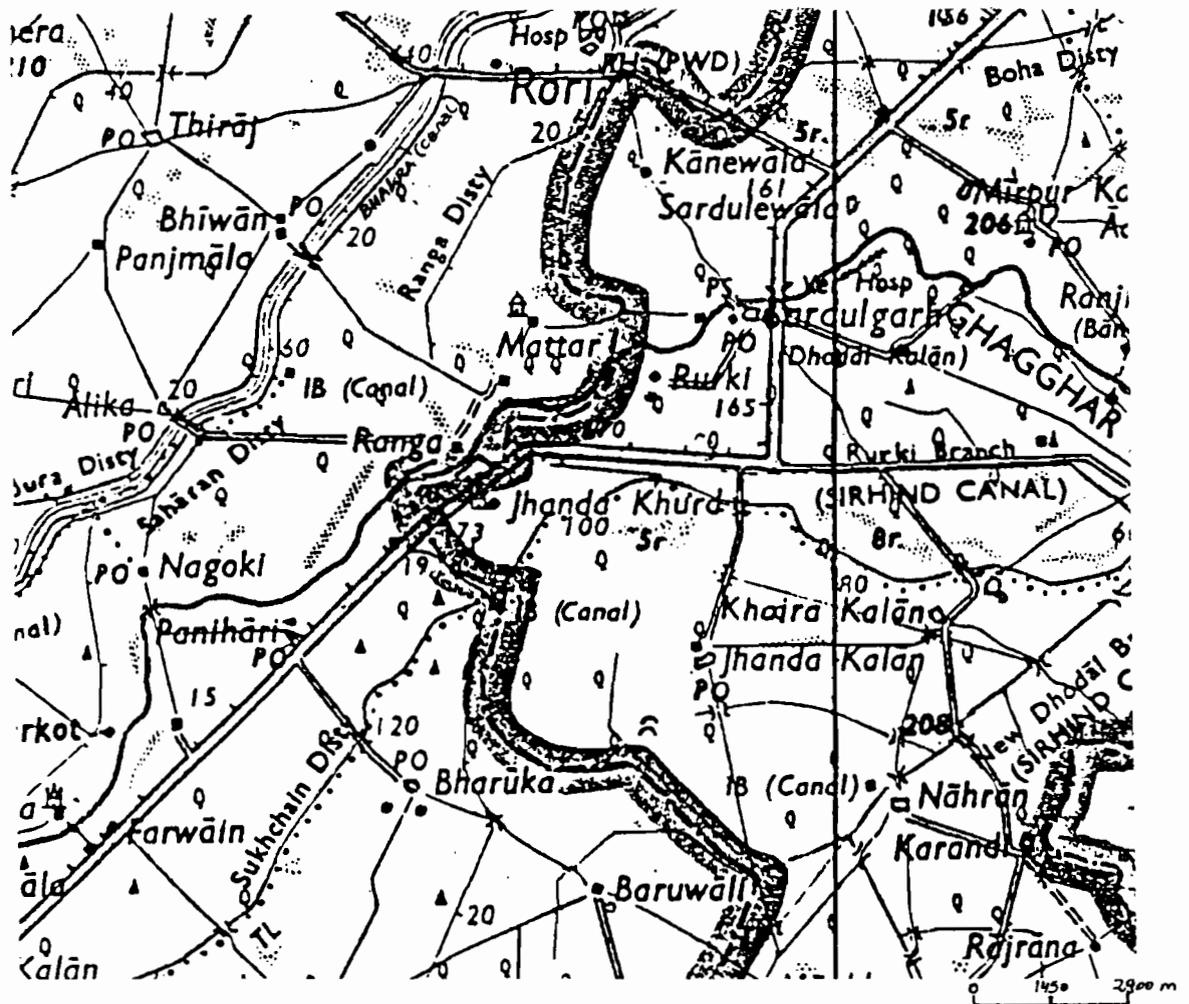


fig.18. Extrait de la carte au 1/250 000, 1977 : agrandissement.



Nous avons identifié chaque réseau par un nombre, même quand il l'était déjà sur les cartes par un nom, afin de simplifier l'étude ultérieure. La rivière Ghagghar a été codée 1 et rattachée au type "écoulement" (actuels et anciens) ; les canaux d'irrigation sont numérotés de 2 à 14, chaque numéro correspondant à un canal tel qu'il est identifié par ailleurs sur les cartes, c'est-à-dire par un nom. Parmi les réseaux "voies de communication", nous avons distingué routes bitumées et chemins. Les routes sont numérotées de 20 à 30 ; elles ont pour limites les grands carrefours. Les chemins sont identifiés par les nombres 31 à 67 et sont limités par les villages qu'ils relient.

## 1.2. Lisibilité des réseaux linéaires

Selon que l'on considère l'image ou la carte, on cherche dans le premier cas à savoir si les linéaments visibles correspondent à une réalité interprétable, dans le second, si les réseaux inscrits sur la carte sont restitués sur l'image traitée. Les réponses, positives ou négatives, sont dans les deux cas intéressantes ; elles révèlent des constantes qu'il est possible d'expliquer soit par la nature du réseau, soit par celle des traitements effectués sur les images.

Les comparaisons, quel que soit leur sens (carte - image ou image - carte), font apparaître trois cas de figure :

- a. Dans le premier cas, le réseau inscrit sur la carte n'est pas visible sur l'image.
- b. Dans le deuxième cas, le linéament est identifié, il est "lisible" d'une extrémité à l'autre ; nous disons que le réseau est "entier".
- c. Troisième cas de figure : le réseau n'est visible que par tronçons ; nous parlons alors de réseau "partiel".

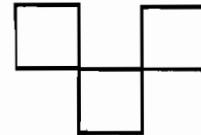
### 1.3. La continuité du trait

La mise en évidence, de façon "satisfaisante", des réseaux linéaires, dépend aussi de la continuité du trait. Cette notion s'applique aux tracés entiers comme aux tracés partiels. Il est difficile de rendre compte de la continuité d'un trait de façon objective, l'oeil ayant tendance à prolonger les linéaments, à reconstituer les continuités. Afin de faciliter le jugement, nous avons limité à trois, le nombre de cas de figure :

a. Le trait est dit continu (c.0) lorsqu'il ne comporte aucune rupture : les pixels sont connexes. La connexité peut être de deux types:



connexité de classe 1  
(pixels connexes sur  
un côté)



connexité de classe 2  
(pixels connexes par  
un angle)

b. Il y a discontinuité faible (c. 1) lorsque les segments de continuité sont plus longs et plus nombreux que les ruptures (moments où le réseau se confond avec l'environnement)

c. On parle de discontinuité forte, dans le cas où les segments de rupture sont plus importants que les segments continus. (c.2)

### 1.4. Différenciation des réseaux entre eux

La mise en évidence correcte des réseaux n'est pas notre unique objectif ; nous avons essayé, on l'a vu (cf.II), de différencier les réseaux les uns des autres. La question posée est la suivante : les réseaux sont-ils hiérarchisés sur l'image traitée ? est-il possible de les classer ? autrement dit, est-

il possible de reconnaître sur une image traitée, une rivière, un canal, un route, un chemin, donc d'interpréter les formes linéaires mises en évidence par les traitements ; selon quels critères ? : la largeur ? la valeur radiométrique (différences de niveau de gris et non signification) ? la forme (plus ou moins rectiligne) ?. Le problème est de connaître suffisamment les effets des traitements sur les différents types de réseaux, pour établir une correspondance fiable et stable entre tel type de traitement et la façon dont le réseau est mis en évidence par ce traitement.

### 1.5. L'extraction des réseaux

Le réseau est extrait lorsque la forme apparaît sur un fond homogène, c'est-à-dire quand tous les autres objets du paysage ont été éliminés. Ceci n'est possible que si les valeurs identifiant les réseaux, diffèrent de celles qui caractérisent ces autres objets. Cet objectif est d'autant plus difficile à atteindre que les réseaux sont nombreux.

Les résultats obtenus doivent être analysés selon les quatre critères de satisfaction ainsi définis: lisibilité des réseaux linéaires, continuité du trait, différenciation des réseaux les uns par rapport aux autres, extraction. L'étude est d'abord entreprise du point de vue des réseaux, puis, de celui des traitements et des procédures.

## 2. Analyse des résultats selon les quatre critères de satisfaction

### 2.1. Les réseaux

Les résultats des traitements effectués sur la sous-zone Panihari sont ici étudiés de façon systématique, image par image, réseau par réseau. Nous constatons en premier lieu que les réseaux recensés sur les cartes (fig. 17), au total soixante-et-un, ne sont pas tous restitués sur les images, brutes ou traitées ; seuls la rivière, sept canaux d'irrigation, cinq routes et dix-sept chemins ont été repérés au moins une fois. On retrouve donc sur les images environ 49 % de l'information contenue sur les cartes topographiques. Etant donné la médiocre résolution de Landsat MSS, de tels résultats sont satisfaisants.

Les canaux d'irrigation sont plus fréquemment restitués que les routes et surtout, que les chemins. Alors que les canaux apparaissent en nombre important (cinq à sept) sur 68 % des images, les chemins, sur 12 % seulement et les routes (trois à cinq) sur 56 % (fig. 19 à 21). De même, on trouve moins de trois chemins sur 67 % des images, moins de trois canaux sur seulement 7 %, et aucune route sur 22 % des images.

Dans chaque catégorie, chaque type de réseau, certains éléments ont une fréquence d'apparition très supérieure aux autres. Il en va ainsi pour le canal Bhakra (N° 2), (ph. 16), que l'on repère sur toutes les images sans exception, toujours entier et continu. La Ghagghar (N° 1), (ph. 14), est également mise en évidence sur la majorité des images, presque toujours entièrement, mais parfois de façon discontinue (c. 1 et c. 2). D'autres canaux, comme le Ranga disty (N° 5) ou le Suckchain disty (N° 3), souvent partiels et discontinus, apparaissent cependant plus fréquemment que les canaux N° 4 ou 7 ou encore que le N° 8 ("disused canal"). La même remarque peut être faite au sujet des routes : il est bien visible sur le tableau des résultats (tabl. VII) que les routes N° 23, 21 et 25, sont identifiées sur

fig. 19

Nombre de canaux identifiés sur chaque image (brute ou traitée)

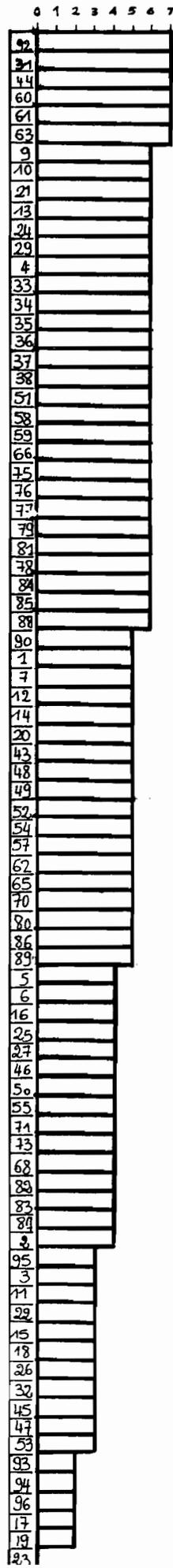


fig. 20

Nombre de routes identifiées sur chaque image (brute ou traitée)

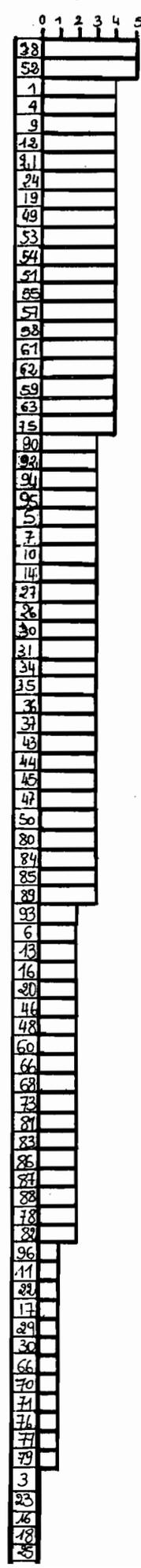
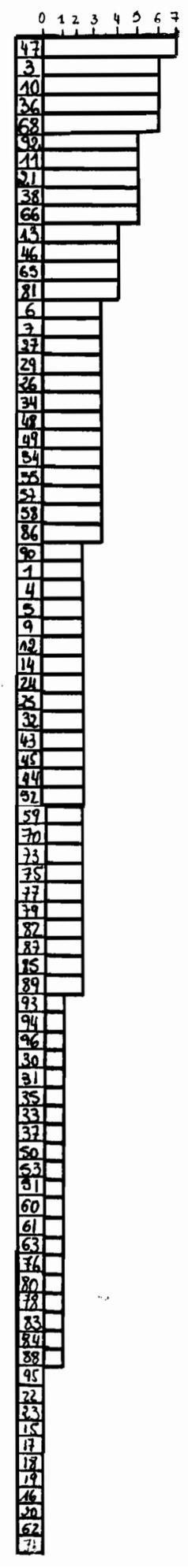


fig. 21

Nombre de chemins identifiés sur chaque image (brute ou traitée)



- 1.Canal 6 brut
- 3.NORTH sur can. 6
- 4.WEST sur can. 6
- 5.EAST sur can. 6
6. NORTHEAST sur c.6
- 7.SOUTHEAST sur c.6
- 9-8.NORTHWEST sur c.6
- 10.SOUTHWEST sur c
- 11.Gagarit sur can. 6
- 12.Gabarit : directions
- 13.Ecart-type sur c.6
- 14.EAST sur C.6 Morph(O)
- 15.Dilatation sur 14
- 16.Fermeture sur 14
- 17.Erosion sur 14
- 18.Ouverture sur 14
- 19."Top-hat" sur 14
- 20.Fermeture- 14
- 21.Laplacien sur c.6
- 22.Fermeture (rayon 2 sur directions du gabarit. (12)
- 23.Fermeture-12
- 24.NW sur 6. Morph. (O)
- 25.Dilatation sur 24
- 26.Fermeture sur 24
- 27.Erosion sur 24 sur
- 29.Ouverture sur 24
- 30."Top-hat" sur 24
- 31.Fermeture- 24

- 32.Dilatation anisotro pique sur 24 /
- 33.Fermeture ani sur 24
- 34.Erosion ani. sur 24
- 35.Ouvert. ani. sur 24
- 36.Top-hat ani. sur 24
- 37.Fermeture ani.-24
- 38.1ère compos. princ
- 39.2è compos. princ.
- 40.3è compos. princ.
- 41.4è compos. princ.
- 42.1ère C.P. Morph.
- 43.Dilatation sur 42(O)
- 44.Fermeture-sur 42
- 45.Erosion sur 42
- 46.Ouverture sur 42
- 47."Top-hat" sur 42
- 48.Fermeture-42
- 49.EAST sur 1ère C.P
- 50.Dilatation sur 49
- 51.Fermeture sur 49
- 52.Erosion sur 49
- 53.Ouverture sur 49
- 54."Top-hat" sur 49
- 55.Fermeture-49
- 56.NW sur 1ère C.P.
- 58.Dilatation sur 56
- 59.Fermeture sur 56
- 60.Erosion sur 56
- 61.Ouverture sur 56
- 62."Top-hat" sur 56
- 63.Fermeture - 56
- 65.2è comp. pr. Morph
- 66.Dilatation sur 65
- 68.Fermeture sur 65
- 69.Erosion sur 65
- 71.Ouverture sur 65
- 72.73."Top-hat" sur 65
- 74.75.Fermeture-65
- 76.East sur 2è cp
- 77.Dilatation sur 76
- 78.Fermeture sur 76
- 79.Erosion sur 76
- 80.Ouverture sur 76
- 81."Top-hat" sur 76
- 82.Fermeture-76
- 83.NW sur 2è c. p.
- 84.Dilatation sur 83
- 85.Fermeture sur 83
- 86.Erosion sur 83
- 87.Ouverture sur 83
- 88."Top-hat" sur 83
- 89.Fermeture-83
- 90.Indice de végétation verte
- 91.Indice de végétation jaune
92. "
- 93.East sur 91
- 94.West sur 91
- 95.NW sur 91
- 96.SW sur 91

un plus grand nombre d'images que les routes N° 22 et 24. Ceci est également observable, et de façon beaucoup plus marquée pour les chemins : seulement trois d'entre eux, le N° 51, le 53 et surtout, le N° 63, peuvent être repérés sur la majorité des traitements.

De tels phénomènes, sont liés à la fois à la nature spécifique de chaque réseau, et aux conséquences des transformations effectuées sur l'image. Le canal Bhakra par exemple, doit sa grande fréquence d'apparition à sa largeur ; il est en effet constitué de trois canaux et de deux petites routes parallèles, ces différentes lignes étant séparées par de minces bandes de terre plantées d'arbres alignés. L'étude des réseaux plus ou moins systématiquement mis en évidence, et celle des réseaux rarement visibles, montre cependant qu'il n'existe pas, en général, une seule condition à une bonne restitution. Celle-ci semble plutôt être le fait d'une combinaison complexe de facteurs favorables. Elle dépend notamment de la présence ou non de végétation le long du réseau, également de son orientation, de sa forme, rectiligne ou plutôt courbe.

Alignée ou groupée en bosquet, la présence de végétation le long d'un canal ou d'une route, favorise particulièrement sa mise en évidence, principalement parce qu'elle augmente sa largeur (ph.17-21,28). C'est le cas par exemple des routes N° 21, 23 et 25 et des canaux N° 3 et 4. Plus que tout autre facteur, la notion de largeur est en effet primordiale. Rappelons qu'un réseau ne peut être que mis en évidence par un traitement. Celui-ci joue le rôle d'un révélateur de phénomènes non directement perceptibles visuellement, mais néanmoins enregistrés sur les images brutes (sous forme numérique). Un réseau très fin, d'un ou deux mètres

de large sur le terrain (ph. 22), repéré sur les cartes au 1:50 000, mais non sur celles au 1:250 000, a peu de chance d'être enregistré sur l'image Landsat MSS brute, et donc d'apparaître sur l'image traitée ; preuve en est la non restitution en règle générale, des chemins ou des canaux très fins (tabl.VII.). Ainsi, les chemins N° 51, 53 et 63, ne sont pas visibles en tant que tels, ils sont révélés par d'autres objets qui augmentent leur largeur (la végétation par exemple) ou leur réflectance. L'objet vu, n'est donc pas le chemin, mais un autre objet de même forme, qui lui est parallèle et qui souligne son tracé. Ainsi, le chemin N° 53, très réfléchant, borde une dune (selon la carte au 1:50 000) ; ce doit être aussi le cas du chemin N° 63, qui apparaît fréquemment en valeurs radiométriques hautes, mais nous ne pouvons vérifier cette hypothèse sur les cartes. L'addition fréquente d'un canal et d'une route ou d'un chemin (ph. 18 ), permet parfois une meilleure restitution des réseaux. C'est le cas par exemple du canal Bhakra (N° 2), du Ranga disty (N° 5), du Suckchain disty (N° 3).

La largeur d'un réseau, qu'elle soit réelle ou due à la présence de végétation ou d'un autre phénomène sur le terrain, n'est pas la seule condition de la bonne visibilité des réseaux, car sinon, il serait impossible d'expliquer les différences dans la restitution de linéaments présentant les mêmes caractéristiques, la route N° 23 et la N° 25 ou la 21 par exemple. L'orientation du réseau, ainsi que sa forme, plus ou moins rectiligne, peuvent peut-être expliquer ces phénomènes. Plus les changements de direction sont nombreux, plus il y a d'angles dans le tracé d'un réseau, et moins il est restitué de façon continue ou entière ; la nature des traitements effectués : filtres privilégiant certaines orientations en est peut-être également responsable.



13. Un tank, village de Dhanana. Ce type de réservoir existe dans chaque village ; ces points d'eau sont repérables sur l'image spatiale.  
(Décembre 1985, H.-P.F.)

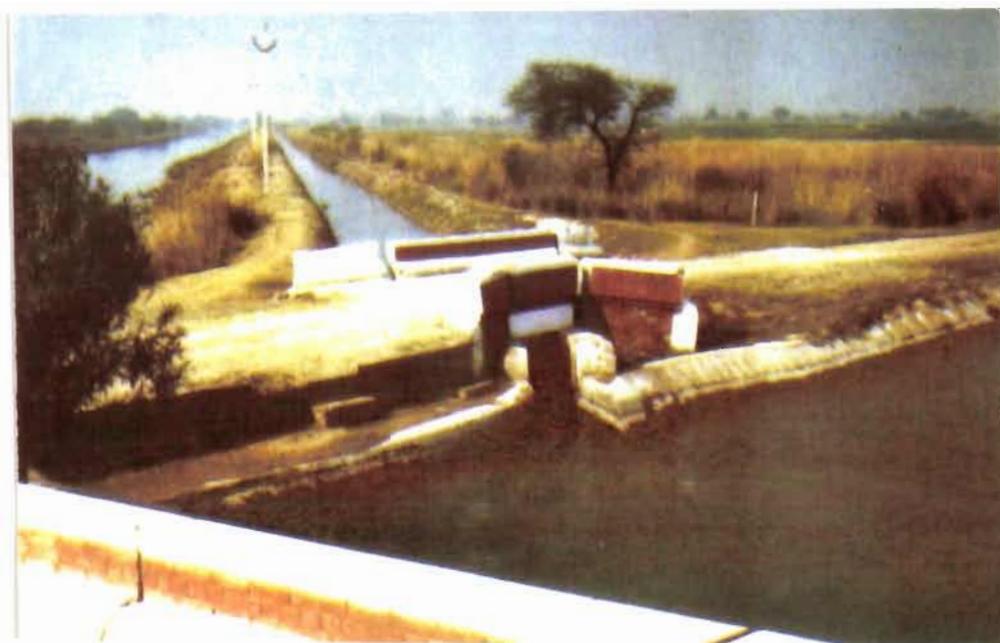


14. La Ghagghar à Madh (vue vers le Nord-Est) ; janvier 1985 ; le niveau de l'eau peut monter de quelques mètres pendant la mousson.  
Végétation groupée en bosquets. (P.G.)

LES CANAUX D'IRRIGATION : DIFFERENTS TYPES



15. Canal du Rajasthan, au Nord de Rawatsar ; visible sur la vue Landsat MSS, ph.1 (Ouest). (Février 1983, P.G.)



16. Canal Bhakra : plusieurs canaux parallèles séparés et bordés par des chemins. (Février 1983, P.G.)



17. Arbres alignés / canal (environ 10 m de large) / arbres alignés.  
(Janvier 1985, H.-P.F.)



18. Végétation / canal (Missika minor, SE de Hissar) / route /  
végétation. (Janvier 1985, H.-P.F.)

19. Canal double  
(Dang minor, environ  
8 m de large) bordé  
d'arbres alignés.(Jan-  
vier 1985, H.-P.F.)



20. Alignement d'ar-  
bres signalant la  
présence d'un canal:  
Dang minor. (Jan-  
vier 1985, H.-  
P.F.)



21. Arrière plan:  
arbres alignés  
signalant la présen-  
ce d'un canal  
(Talu minor). (Jan-  
vier 1985, H.-P.F.)





22. Canal très étroit (1 ou 2 m de large), non restitué sur les images Landsat MSS. (Janvier 1985, H.-P.F.)

Traces de canaux d'irrigation anciens



23. Canal situé entre Shapur et Matarsham ; XIX<sup>e</sup> siècle, fonctionnel jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle. Type du canal recherché, N<sup>o</sup> 7-8 (sous zone Panihari) ?

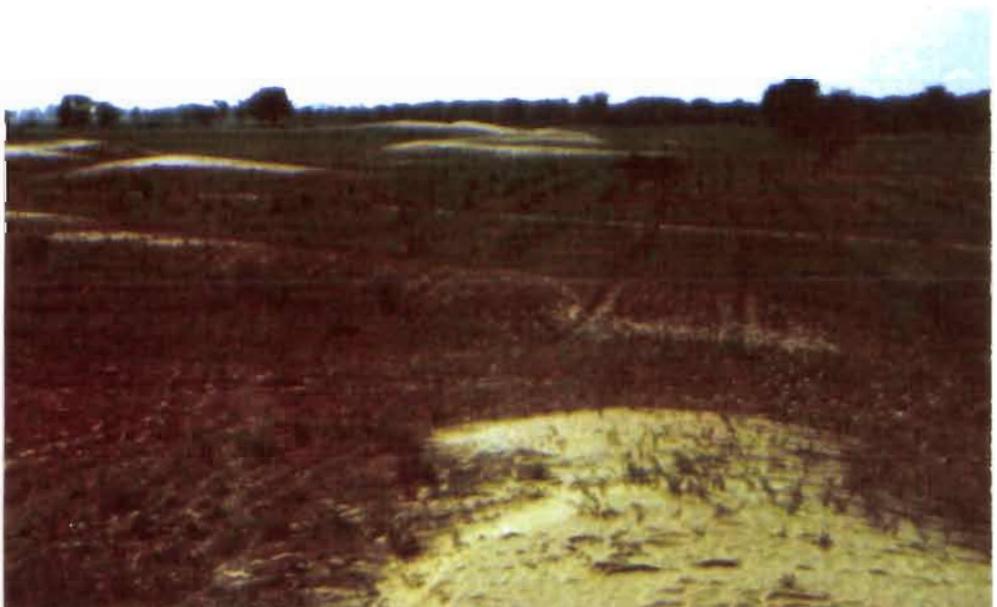
24. Au second plan: butte (environ 2 m de haut) matérialisant le tracé d'un canal médiéval bien conservé parce que terrassé à l'origine et réhaussé par accumulation des sédiments évacués lors des curages.



25. Derrière les arbres : des bandes de sable, vestiges d'un canal médiéval (Modakhara). (Mars 1984)



26. Traces ( sous forme de buttes de quelques mètres de haut) très mal conservées d'un canal médiéval (tracé non rectiligne)



LES ROUTES

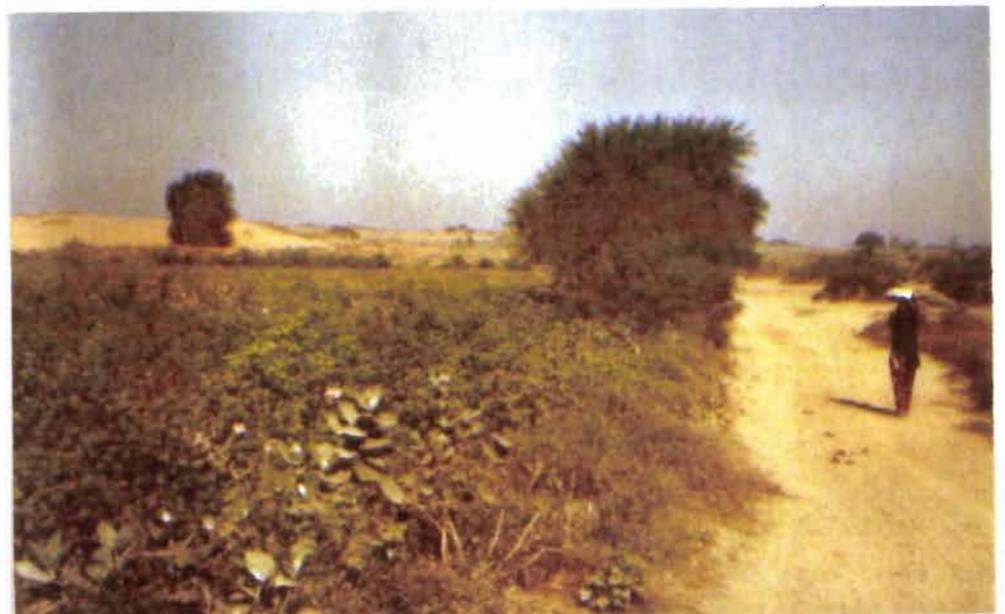
27. Route bitumée importante. A gauche, un réservoir. Village de Ghari, E. d'Hansi. (janvier 1985, H.-P.F.).



28. Route bitumée de moyenne importance (route Mundaya - Dhanana) bordée d'arbres. (janvier 1985, H.-P.F.)



29. A droite : chemin ; arrière plan : grande dune (altitude : environ 15 m).



On remarque également que les réseaux de faible longueur sont moins bien restitués que les autres; les routes N° 22, 27, 28, 29 et 30 par exemple, n'apparaissent presque jamais. Les linéaments peu étendus, s'ils ne sont pas très contrastés par rapport au voisinage, disparaissent facilement ; ils sont plus difficiles à interpréter, à reconnaître et tendent à être confondus avec l'environnement.(tabl. VII)

Les réseaux que nous cherchions plus particulièrement à mettre en évidence, réseaux non fonctionnels de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, repérés sur les cartes de 1902 et de 1915, et portant les numéros 7 et 8 sont, on le voit, assez fréquemment visibles, mais le plus souvent partiellement et de façon discontinue (c. 1 et c. 2). Le réseau N° 7 ou partie Nord du "disused canal", est moins souvent restitué, peut-être parce que ce réseau ténu est situé dans la partie Nord de l'image, dans un environnement thématique et radiométrique très hétérogène (vallée de la Ghagghar, cultures, zones inondées) ; la dune qui matérialise sa présence sur le terrain est difficilement perceptible sur les images. En revanche, la partie Sud du canal (réseau N° 8) est assez nettement visible ; elle apparaît comme une ligne constituée de valeurs radiométriques hautes, certainement à cause de la nudité du sol à cet endroit (sable sans végétation ni culture). (ph.23 à 26)

Alors que la lisibilité d'un réseau dépend en premier lieu de sa propre nature, la notion de continuité, donc la qualité de la restitution, paraît beaucoup plus liée aux transformations des valeurs et de l'agencement des pixels, donc aux traitements et aux procédures.

## 2.2. Les procédures

### 2.2.1. Remarques générales

Le classement des images en fonction du nombre de réseaux qu'elles mettent en évidence, permet une première approche des résultats, approche rapide et globale ; il ne s'agit pas de juger ainsi de la qualité des traitements. Un tel classement n'a en fait qu'une signification limitée, dans la mesure où nous testons l'efficacité des procédures autant que celle des opérations, dans la mesure aussi où le critère: "quantité de réseaux visibles", n'est pas le seul que nous prenions en compte. Les différences notées sur ce point entre les images, sont d'ailleurs en général, trop faibles pour être significatives (fig.19 à 21)

Il est cependant intéressant de relever les traitements situés en position extrême sur l'histogramme. Les images les plus riches en linéarités identifiables, sont les deux premières composantes principales, l'indice de végétation jaune (traitements multi-spectraux), certains filtres directionnels (SW sur canal 6, E sur première composante principale, NW sur canal 6...) et certaines images transformées par la Morphologie Mathématique. A l'inverse, les plus pauvres sont l'image "Directions" du filtre Gabarit traitée par la Morphologie Mathématique, quelques transformations morphologiques comme, par exemple le "Top-hat" réalisé sur le canal 6 filtré par le gradient East, et enfin, l'indice de végétation filtré.

Ces observations confirment si besoin était, la plus grande richesse en réseaux des images multi-spectrales et des images filtrées, par rapport aux images traitées par la morphologie mathématique, cette méthode étant utilisée pour sélectionner.

Ces observations nous amènent par ailleurs à faire quelques remarques sur la relation existant entre une image de base et les traitements de morphologie mathématique qui lui sont appliqués. Nous l'avons déjà définie dans la partie théorique de cette étude (cf.2), nous tentons ici de la saisir à travers des exemples.

Il est bien évident qu'une même transformation morphologique, appliquée à plusieurs images de base, donne des résultats différents, tant au point de vue quantitatif (nombre de réseaux identifiés), que qualitatif (réseau entier ou partiel, trait continu ou discontinu). Considérons un traitement morphologique, adapté en théorie à l'objectif que l'on s'est fixé. La qualité de l'image traitée ne dépend pas du traitement lui-même puisque, quelle que soit l'image sur laquelle elles sont réalisées, les transformations portent, par définition, toujours sur le même type de valeurs (pics ou vallées). Le problème est qu'il y ait conformité entre l'objet (au sens d'ensemble de pixels) que l'on souhaite mettre en évidence, et l'objet que va effectivement mettre en évidence le traitement. L'Ouverture par exemple, rase les pics de la fonction en teintes de gris ; le résultat ne peut être satisfaisant que si les pics identifient les objets auxquels on s'intéresse, plus précisément, les objet que l'on souhaite éliminer. Les résultats obtenus sur les sous-zones Panihari et Bhakra sont significatifs de la difficulté qu'il y a parfois à obtenir une telle adéquation. Cette difficulté tient avant tout à la complexité des images de la Terre fournies par les satellites ; c'est pourquoi les résultats sont parfois décevants ou peu spectaculaires, ne paraissant pas à première vue apporter de meilleurs résultats que l'image brute.

Ainsi, plus une image est simple, c'est-à-dire plus les différents objets qui la constituent sont bien identifiés numériquement, et plus on maîtrise ces données, plus le résultat d'une transformation a de chance d'être conforme à ce que nous en attendions, c'est-à-dire à la théorie.

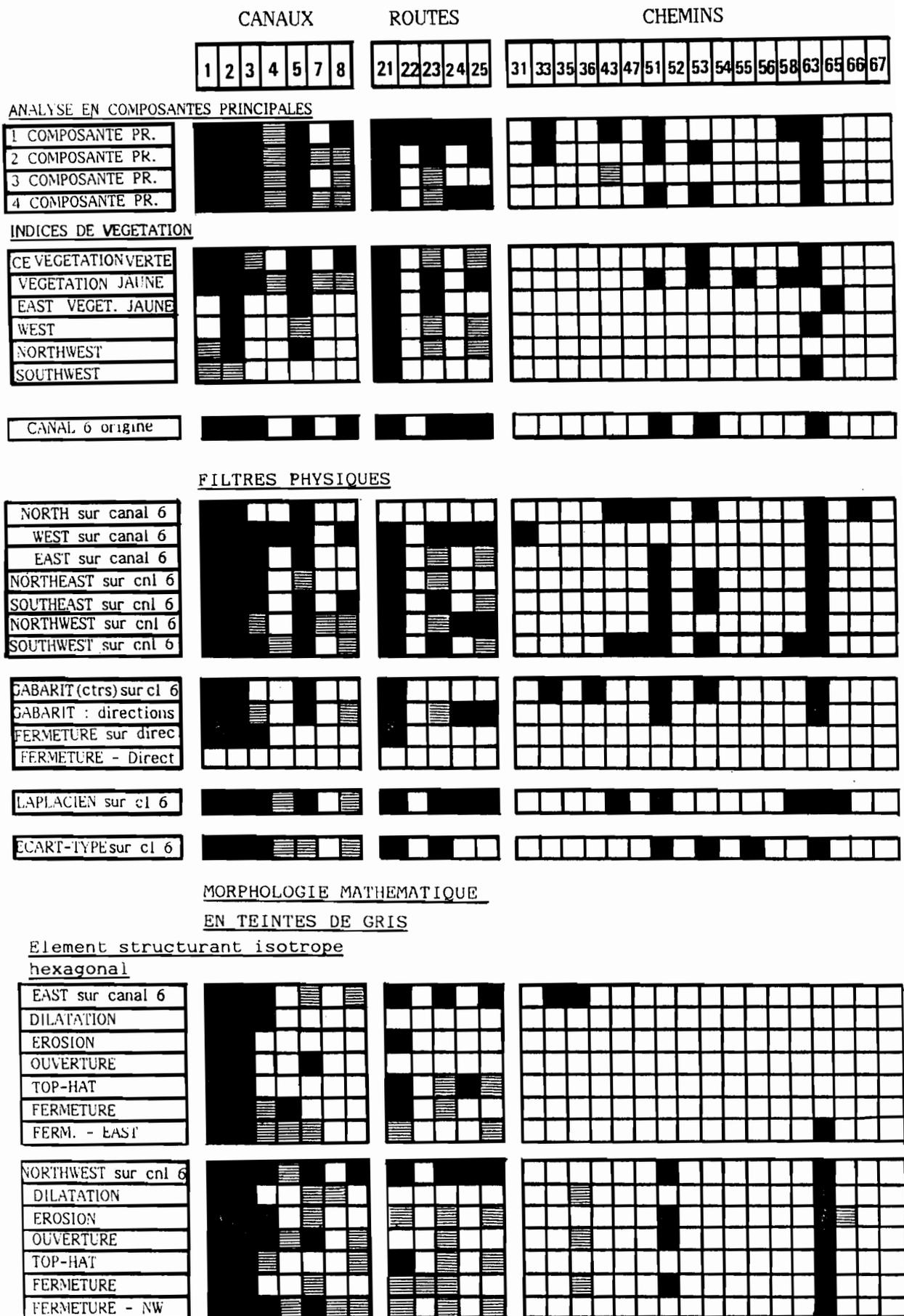
Pour toutes ces raisons, il paraît difficile d'établir un "modèle" de traitement extrapolable à tous les espaces géographiques, donc à toutes les images brutes. Notre objectif est plutôt de déterminer des principes généraux, des orientations ; de définir, pour un type d'image donné et suivant un objectif précis, une stratégie, c'est-à-dire la mise au point d'enchaînements d'opérations allant de l'image brute au résultat final.

L'étude détaillée des résultats obtenus peut être faite à partir des tableaux VII et VIII, qui pour chaque image, donc chaque traitement, recensent le nombre de réseaux identifiés et notent la qualité de leur mise en évidence (réseau entier, partiel, continu, discontinu). Avant d'aborder les images et les procédures les plus satisfaisantes dans le détail, quelques remarques générales peuvent être formulées.

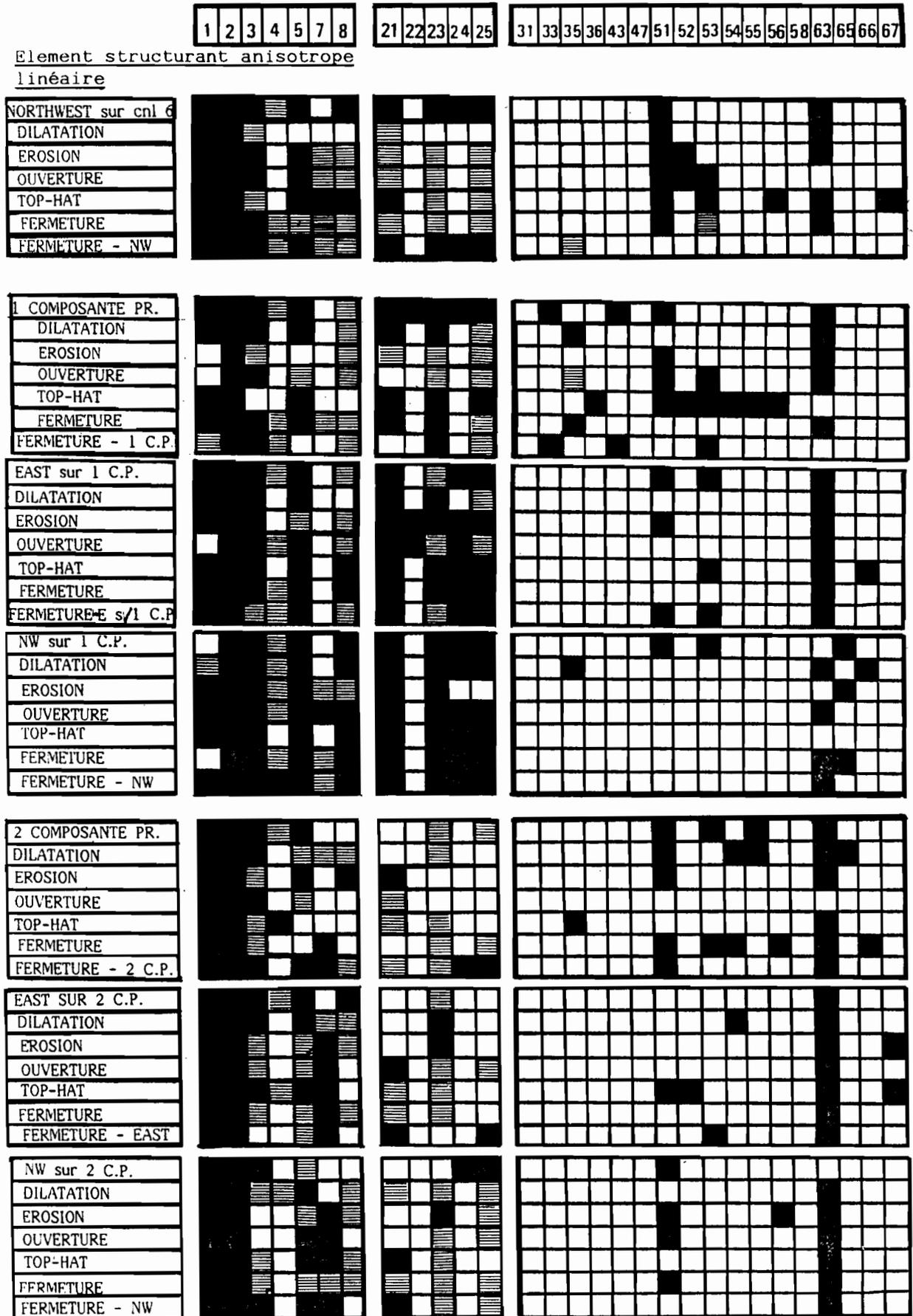
Tout d'abord, il apparaît que les résultats des transformations morphologiques les plus satisfaisants sont obtenus sur les images préalablement filtrées. Les deux premières composantes principales, par exemple, sont de bonnes images dans la mesure où elles mettent en évidence, par concentration des contrastes, un grand nombre de réseaux linéaires ; mais les résultats sont meilleurs quand elles ont été filtrées que lorsqu'elles sont directement exploitées par la Morphologie Mathématique. Cette étape qui consis-

tabl.VII .Sous-zone Panihari : résultats image par image et réseau par réseau.  
Lisibilité des réseaux.

 réseau lisible ; entier   
  réseau lisible ; partiel  
 réseau non lisible

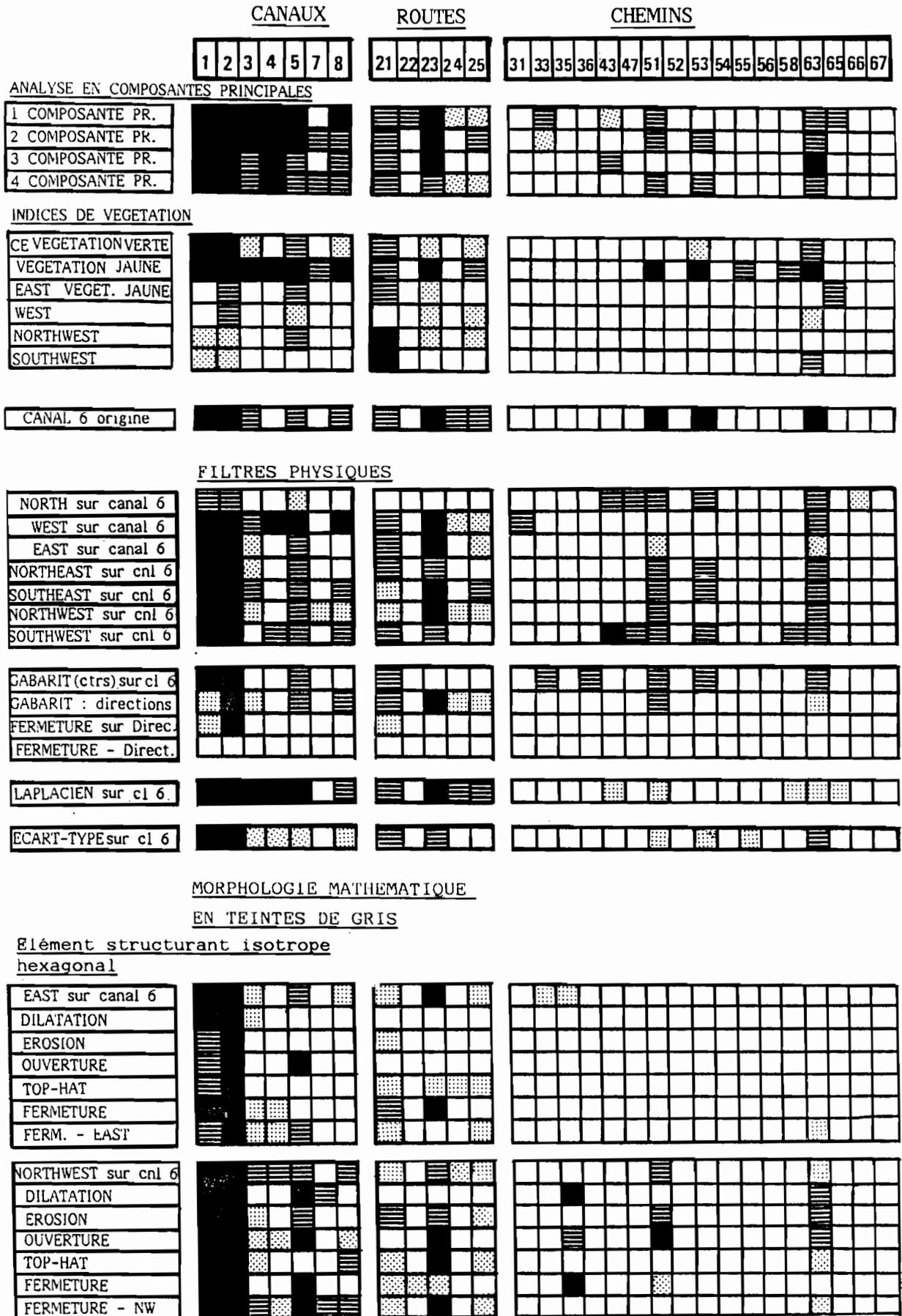


tabl.VII. Lisibilité des réseaux (suite)

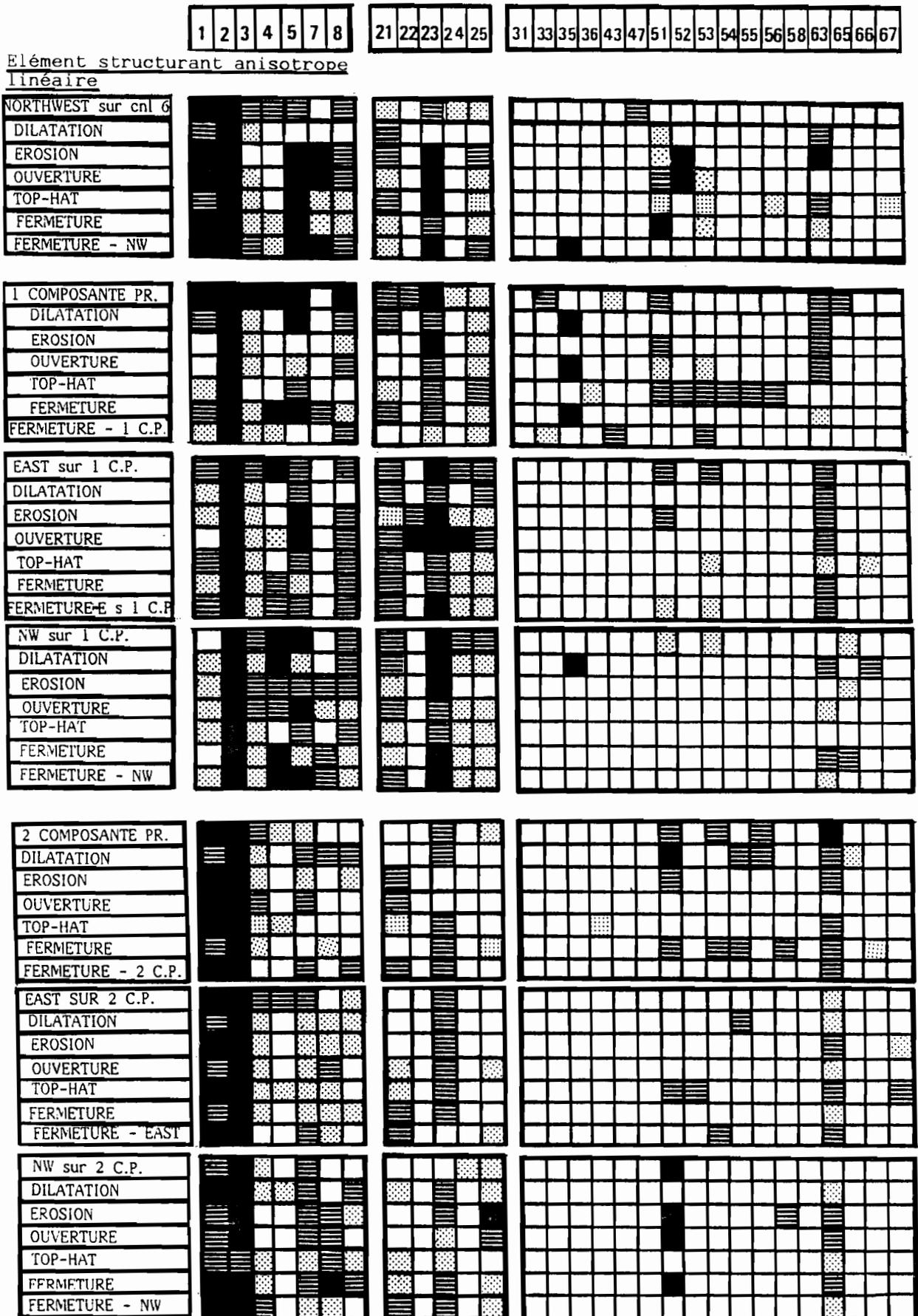


tabl.VIII . Sous-zone Panihari : Résultats image par image et réseau par réseau.  
Etude de la continuité des traits.

■ trait continu (c 0)    ▨ trait discontinu (c 1)    ▩ trait discontinu (c 2)



tabl.VIII. Etude de la continuité des traits (suite).



te à filtrer une image afin de réhausser les contrastes et d'identifier les réseaux par les valeurs extrêmes de l'échelle des gris semble souhaitable, indispensable même dans la majorité des cas. Soulignons cependant que ces filtres ne sont efficaces que sur des images déjà relativement bien contrastées, c'est-à-dire sur lesquelles les objets sont bien identifiés par leurs teintes de gris : appliqués à l'indice de végétation jaune, ces filtres ont brouillé l'image; les réseaux, même les plus importants (N° 1 et 2) ne sont plus visibles ; cette image de base paraissait pourtant riche et bien contrastée; cette notion est donc difficile à saisir visuellement.

Parmi les filtres physiques que nous avons expérimentés : le laplacien, l'écart-type, le filtre multi-directionnel Gabarit, et les gradients directionnels, ces derniers semblent les plus intéressants, même s'ils ont l'inconvénient de ne privilégier qu'une ou deux orientations. Le laplacien met en évidence de nombreux réseaux, mais ils ne sont pas suffisamment contrastés par rapport à l'environnement. L'écart-type, adopté comme image de base pour le traitement de la sous-zone Bhakra, met en valeur les zones de texture hétérogène ; les réseaux y sont moins bien identifiés cependant sur la sous-zone Panihari, qu'avec les filtres directionnels. Enfin, les traitements réalisés à partir de l'image "directions" du filtre Gabarit, se sont révélés , on l'a vu, plus que décevants (tabl. VII et VIII.)

L'utilisation, pour les transformations morphologiques d'un élément structurant anisotrope, est particulièrement adaptée à la recherche de réseaux linéaires. La comparaison de deux traitements identiques

effectués sur la même image de base, dans un cas avec l'élément structurant hexagonal, dans l'autre avec un segment, fait bien apparaître les avantages de ce dernier: La différence ne joue pas réellement pour les réseaux majeurs, le canal Bhakra ou la rivière Ghagghar, des sous-zones Bhakra et Panihari. La supériorité du segment est surtout sensible pour les réseaux fins. L'hexagone, opère dans toutes les directions de la même façon, ce qui tend à épaissir les traits



30. EROSION (élément structurant hexagonal) sur le canal 6 filtré par le gradient NW

et à accentuer la netteté des réseaux importants; mais il ne bouche pas les trous; les linéarités discontinues apparaissent en pointillé, comme les autres objets environnants (ph. 30.). L'élément structurant linéaire par contre, orienté parallèlement à la direction d'ensemble des réseaux, prolonge les traits et restitue les continuités; des réseaux ténus sont beaucoup plus nettement mis en évidence; les angles, les tournants sont plus nets (ph.42.).

Après ces constatations d'ordre général, nous abordons maintenant l'étude des résultats concrets des procédures, évoquées dans la seconde partie d'un point de vue théorique.

### 2.2.2. Resultats image par image : trois exemples

Nous analyserons dans un premier temps

les résultats des procédures adoptées pour le traitement de la sous-zone Bhakra, puis ceux des quatre procédures retenues pour la sous-zone Panihari. Pour le deuxième exemple, nous avons choisi, parmi les plus satisfaisantes, deux images de base : le canal 6 filtré par le gradient directionnel Northwest et la première composante principale filtrée par le gradient East.

A. Sous-zone Bhakra

Canal 6 (ph.31)

Ecart-type (ph.32)

Dilatation (ph.33)

Erosion  
(ph.34)

Ouverture  
(ph.35)

Médiane  
(ph.38)

Erosion  
(ph.36)

Gradient  
(ph.37)

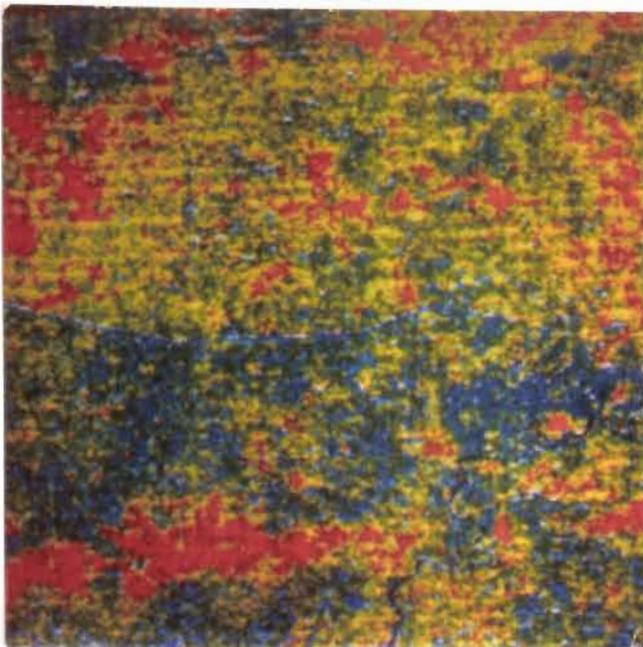
Procédure 1

Procédure 2

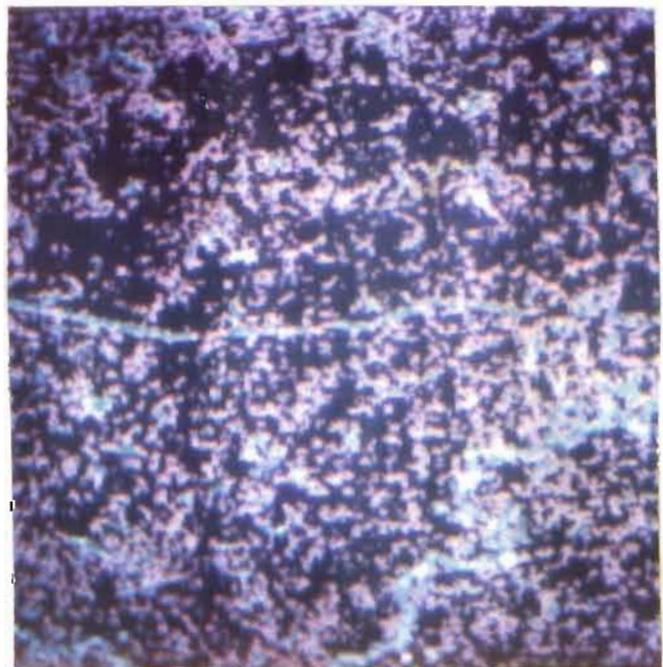
Procédure 3

Procédure 4

Toutes les procédures commencent rappelons-le par l'application de l'indice de texture "écart-type"



31. CANAL 6 brut (1)

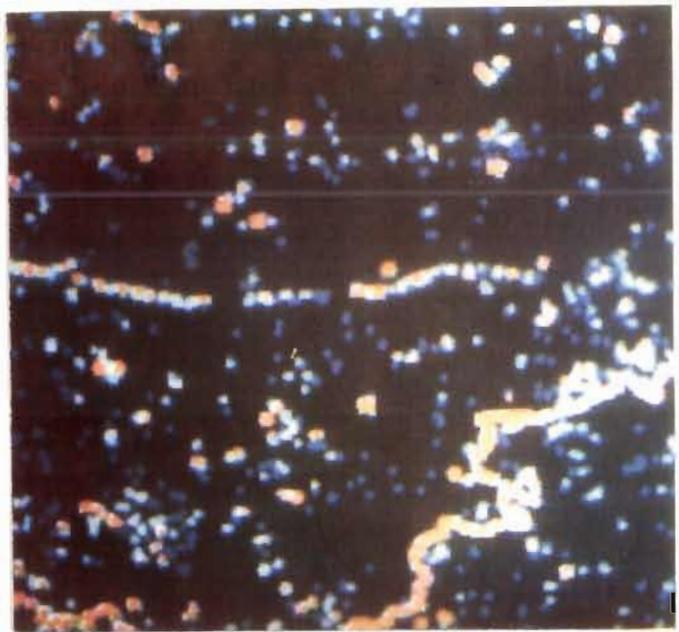


32. ECART-TYPE sur canal 6

(ph.32 ) à l'image brute : le canal 6 (ph. 31). Les deux réseaux, le canal Bhakra au Nord et la Ghagghar au Sud, ainsi que quelques taches isolées (réservoirs présumés), sont identifiés par les valeurs extrêmes maximales de l'échelle des gris. L'environnement , rendu plus homogène, est aisément seuillable en deux paliers (ici, ph.32, bleu foncé et rose).

a. Procédure 1

La Dilatation accentue la différence des teintes de gris entre les deux réseaux. On obtient une bonne discrimination entre le canal et la rivière, mais nous perdons de la précision dans le détail du tracé, notamment au niveau des méandres

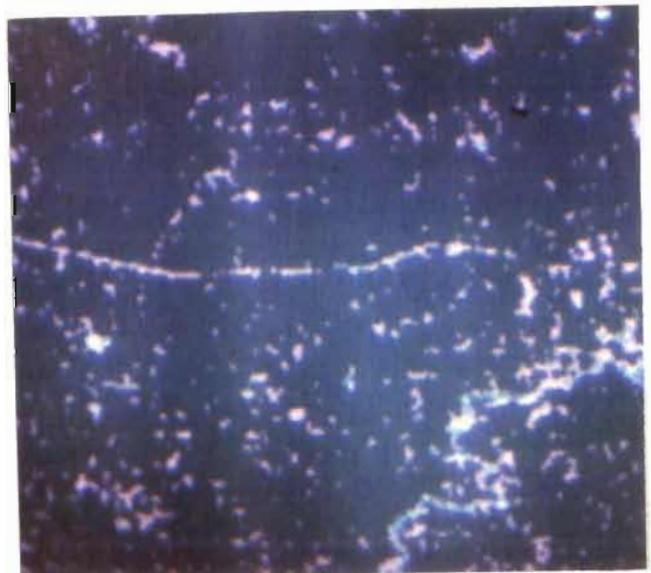


33 . DILATATION sur écart-type

de la rivière. Les points isolés, présents sur "l'écart-type", sont conservés. Le palier moyen (en rose sur la photo 32 ) est abaissé et seuillable comme le fond (en noir sur la photo 33 ).

b. Procédure 2

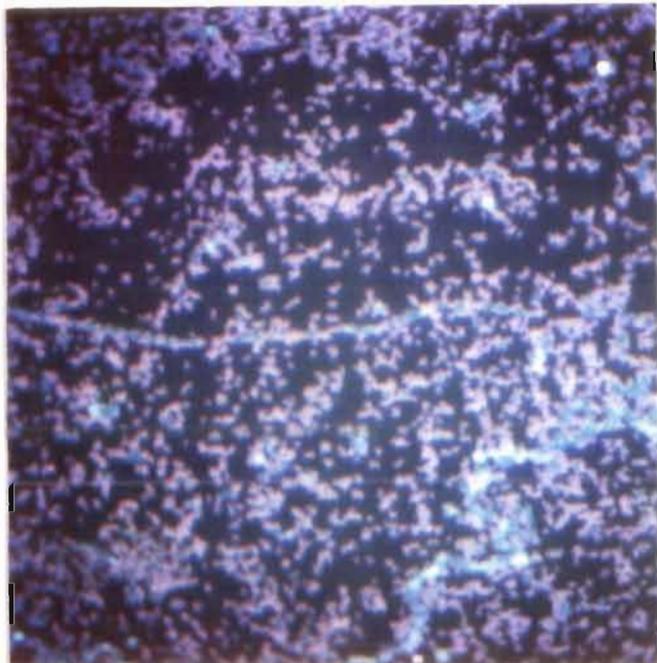
L'Erosion amincit les réseaux (valeurs hautes), elle coupe même par endroits le canal. Les tracés sont imprécis, mais le fond est lissé,



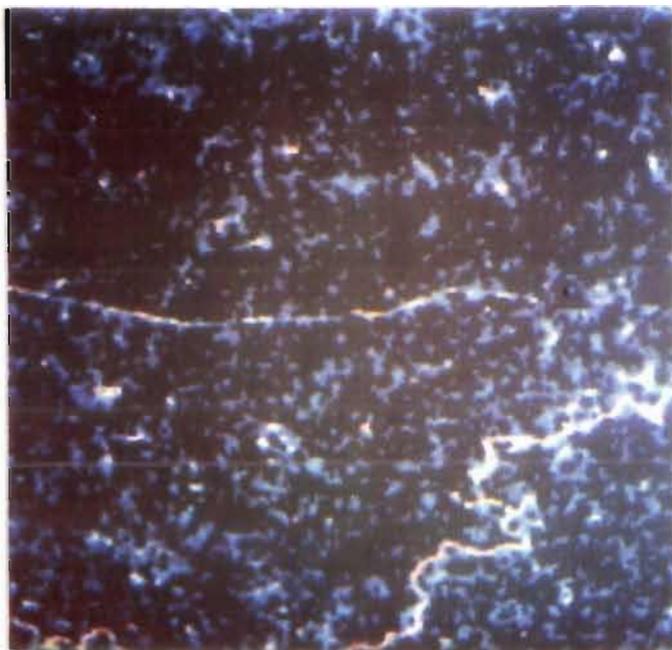
34 . EROSION sur écart-type

nettoyé par extension des zones de basses valeurs.

c. Procédure 3 : Enchaînement de trois transformations



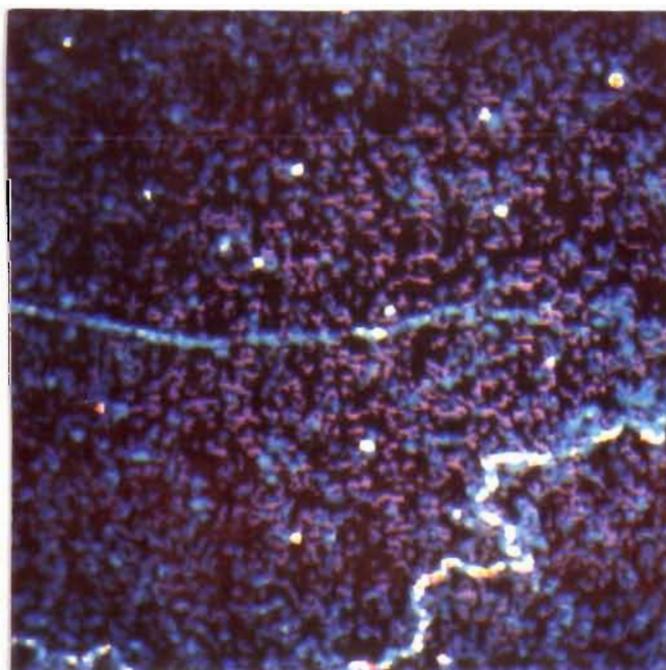
35 .OUVERTURE sur écart-type



36 .EROSION sur Ouverture (ph.35)

- L'Ouverture diminue les contrastes dans les valeurs hautes. Ici, elle ne modifie pas l'image des réseaux; seuls quelques points de valeurs moyennes (en rose sur la photo 32 ) ont disparu. Le "nettoyage" du fond est très faible. (ph.35)

- Erosion sur l'Ouverture : les réseaux sont amincis ; les valeurs du fond sont diminuées, mais ne sont pas rendues homogènes. Le tracé des réseaux est plus précis que sur l'image: "Erosion sur écart type" ; le trait est plus continu.

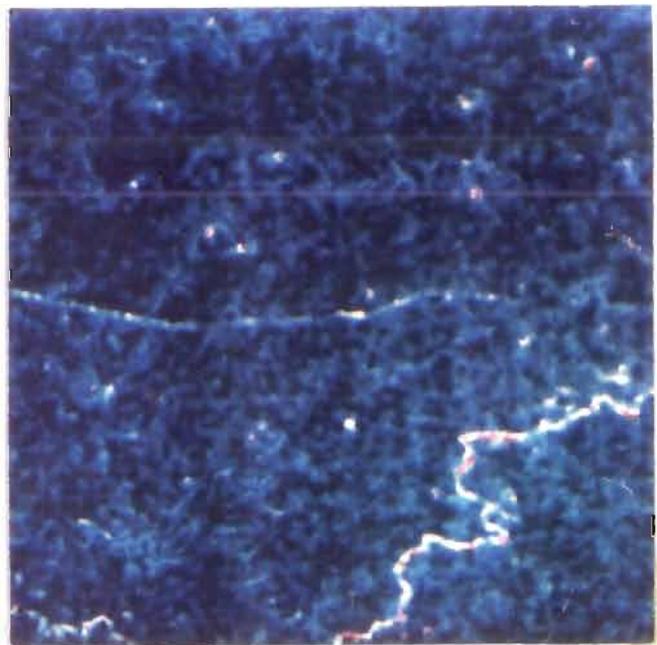


37 .GRADIENT sur ph.36 (Erosion sur Ouverture)

- Le Gradient morphologique effectué sur l'image précédente, accentue les contrastes locaux ; les réseaux et points isolés sont réhaussés par opposition à un fond rendu plus homogène. Le canal et la rivière, sont différenciés par leurs teintes de gris, sans modification de leur largeur. (ph.37)

#### d. Procédure 4

La Médiane amincit les réseaux; la rivière, identifiée par les valeurs maximales de l'échelle des gris, est bien contrastée par rapport au fond, qui a été lissé par le traitement. Le canal en revanche, est faiblement réhaussé ; il se différencie peu par ses teintes de gris, du fond. (ph.38)



38 MEDIANE sur écart-type

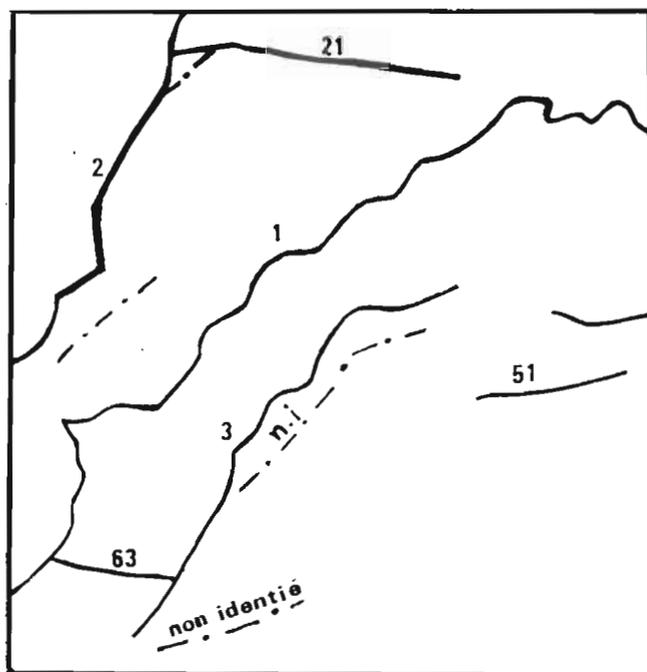
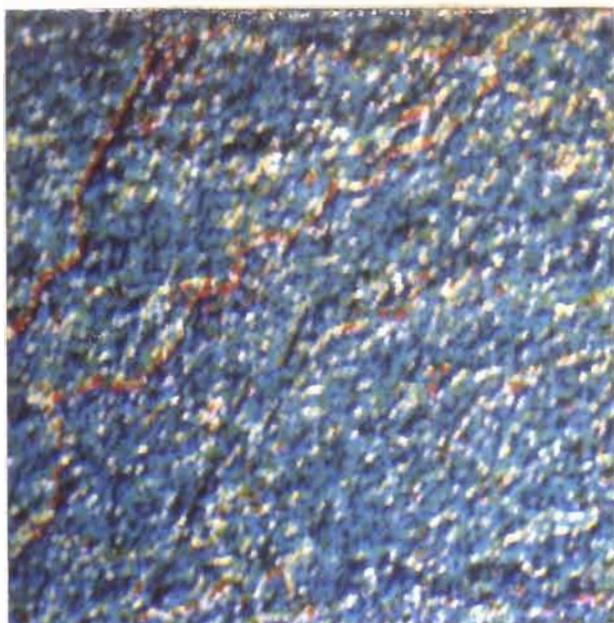
#### e. Résultats

Si l'on prend comme critère de satisfaction, la différenciation des deux réseaux par leur teintes de gris d'une part et leur extraction par seuillage des teintes de gris du fond d'autre part, les procédures 1 (Dilatation) et 3 (Ouverture, Erosion, Gradient) sont les plus satisfaisantes. L'efficacité de cette dernière est due aux trois transformations : l'image est lissée dans un premier temps par l'Ouverture, les réseaux linéaires sont ensuite amincis ; enfin, troisième étape, les contrastes sont réhaussés.



a. Procédure 1

La Dilatation par un élément structurant linéaire donne des résultats très différents de la Dilatation par l'hexagone. La largeur des deux réseaux principaux, identifiés par des valeurs hautes, n'a pas été modifiée, puisque le segment n'épaissit les pics de la fonction en teintes de gris que dans une seule direction. Les réseaux plus fins semblent également caractérisés par de hautes valeurs, mais leur tracé est très discontinu, ils sont à peine perceptibles. Les valeurs du fond, hormis de nombreux pics isolés, sont diminuées et ramenées à deux paliers (en bleu clair et bleu foncé sur la photo 41. fig.22)



41 . DILATATION sur filtre NW (ph.40.)

fig. 22 . Réseaux identifiés sur l'image 41

b. Procédure 2

L'Erosion élargit les réseaux sombres de valeurs basses) ; ainsi, les linéaments fins, peu perceptibles sur l'image brute, sont mis en évidence. (ph.42 ,fig.23)



42. EROSION sur filtre NW (ph.40)

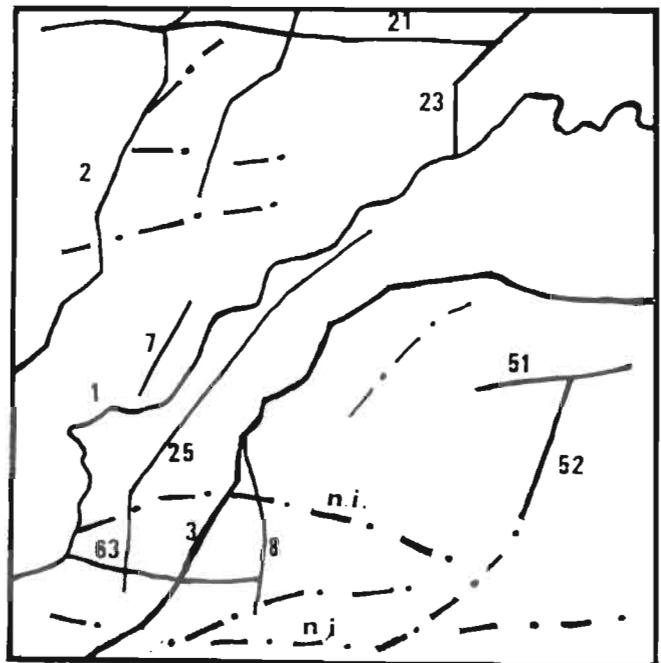


fig. 23 Réseaux identifiés sur l'image 42.

c. Procédure 3 : Enchaînement de deux transformations

-L' Ouverture supprime les points isolés et lisse le fond, rendant ainsi les réseaux plus distincts. (ph. 43;fig.24)



43. OUVERTURE sur filtre NW (ph.40)

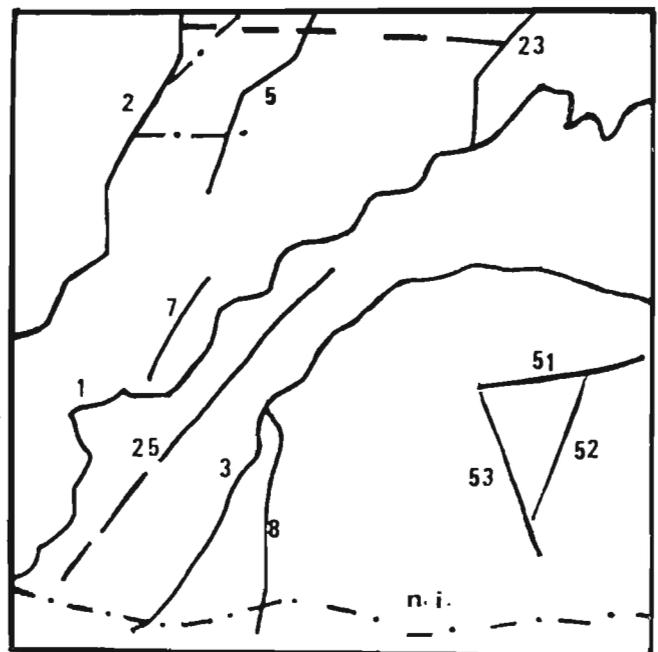


fig. 24 Réseaux identifiés sur l'image 43.

- Le "Top-hat" ne conserve que les réseaux en valeurs hautes. Les linéaments identifiés à la fois par des hautes et des basses valeurs sur l'image filtrée (ph.40) sont dédoublés; les points isolés blancs (pics) ne sont pas éliminés. Le fond est hétérogène. (fig.25 - ph.44)



44. "TOP-HAT" sur filtre NW (ph.40)

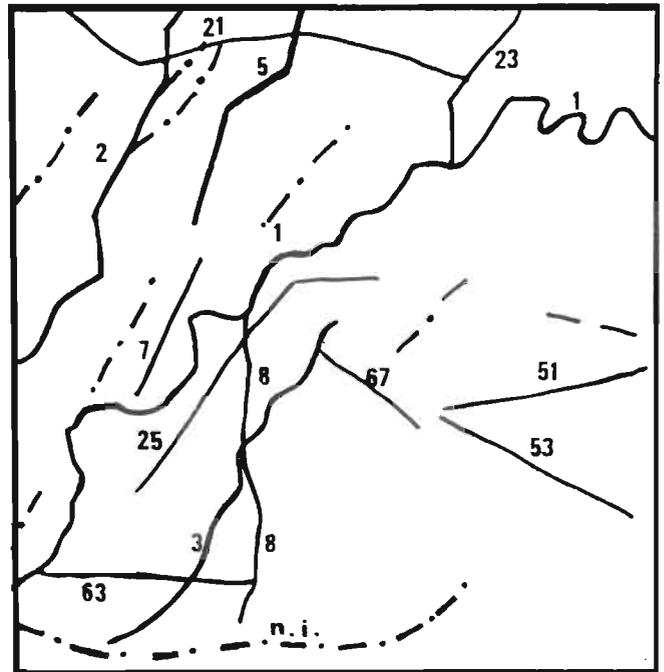
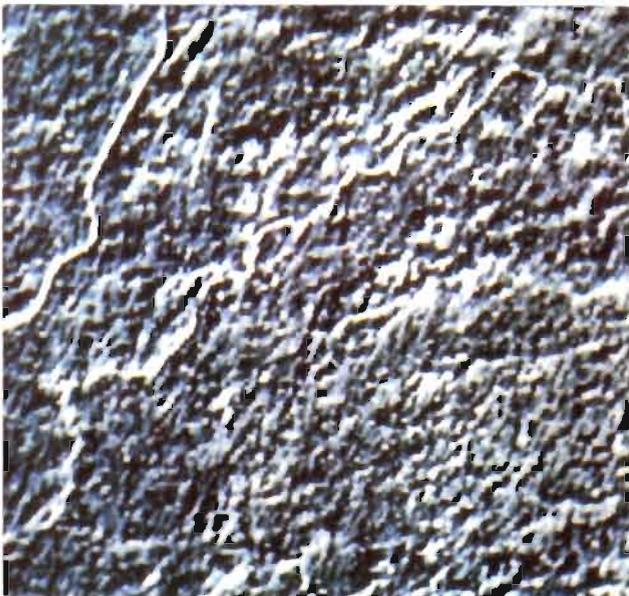


fig.25. Réseaux identifiés sur l'image 44

d. Procédure 4 : Enchaînement de deux transformations

- La Fermeture permet d'accentuer la continuité des réseaux sombres sans altérer les réseaux



45. FERMETURE sur filtre NW (ph.40)

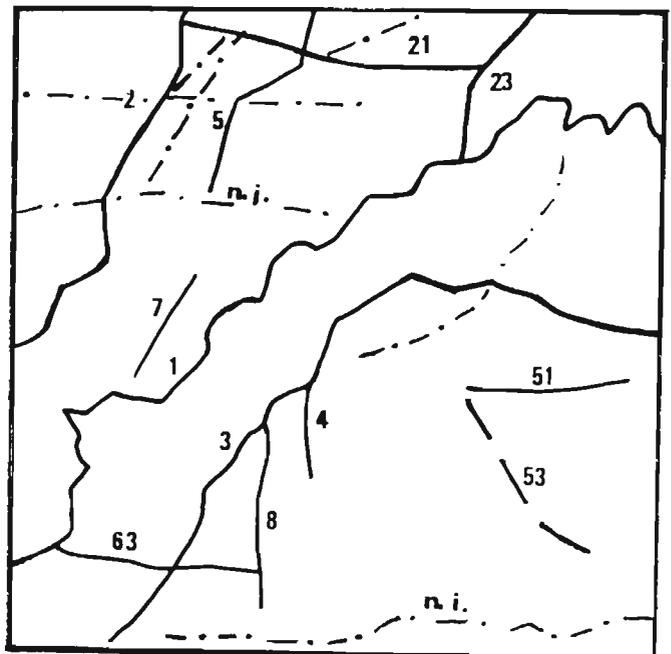
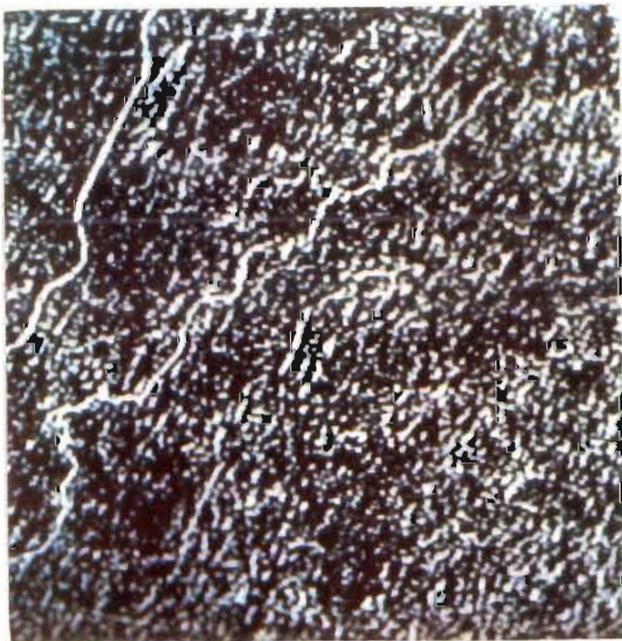


fig.26. Réseaux identifiés sur l'image 45

clairs. Le fond est nettoyé par élimination des valeurs basses isolées ("nettoyage" moins sévère que sur l'image ). (ph.45. - fig. 26.)

- La soustraction : Fermeture moins image sur laquelle elle est effectuée, extrait les vallées profondes; elle a donc pour effet de réhausser les linéarités sombres sur l'image filtrée. (ph.46 - fig.27)



46 . Soustraction : Fermeture - Filtre NW

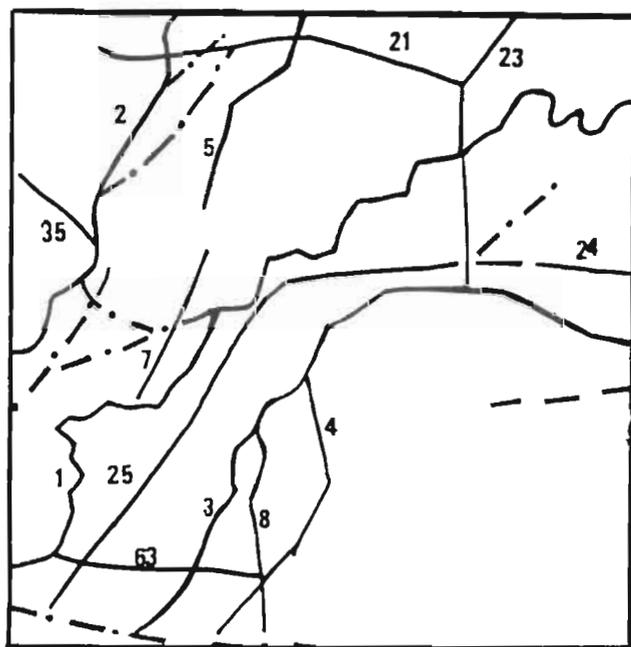


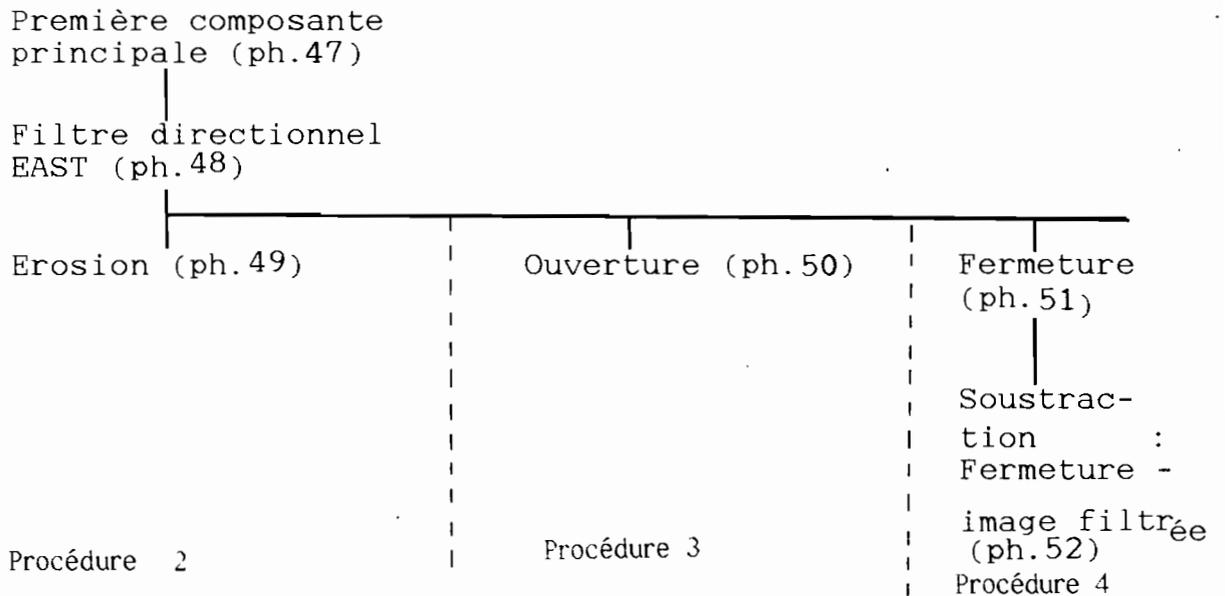
fig.27. Réseaux identifiés sur l'image46

#### e. Résultats

Des quatre procédures présentées, les plus satisfaisantes, sont la 2, la 3 : l'Ouverture uniquement, et la 4, la Dilatation et le "Top-hat" ne restituant pas les réseaux fins. L'Erosion et l'Ouverture sont satisfaisantes pour des raisons différentes. Dans un cas (l'Erosion) les réseaux apparaissent par élargissement des lignes sombres ; dans l'autre cas (l'Ouverture) par contraste avec un fond lissé. Ces deux images n'accentuent pas la continuité de la rivière, mais elles mettent en évidence les réseaux très peu distincts sur l'image de départ

(Sud et Sud-Est de l'image). La Fermeture réhausse la continuité du canal principal et la soustraction : fermeture - image filtrée accentue la continuité des réseaux situés au Nord et à l'Ouest de la rivière, et celle du réseau N° 3 (Suckchain disty); elle fait disparaître par contre les linéaments de la zone dunaire.

Ces quatre procédures ont été appliquées à d'autres images de base ; nous présentons maintenant les résultats des transformations les plus probantes, effectuées sur la première composante principale filtrée par le gradient directionnel East.





47 . Première composante principale



48 . Filtre EAST sur première composante principale

Les réseaux convenablement orientés (N-S et NE-SW) sont réhaussés par le gradient; de nombreuses linéarités fines apparaissent ; la rivière est peu distincte de l'environnement (ph.48)

a. Procédure 2

L'Erosion amincit les réseaux clairs (pics) et élargit des réseaux sombres (vallées) de la zone dunai-re ou de la partie Nord de l'image. (ph.49 - fig.28)



49. EROSION sur filtre EAST

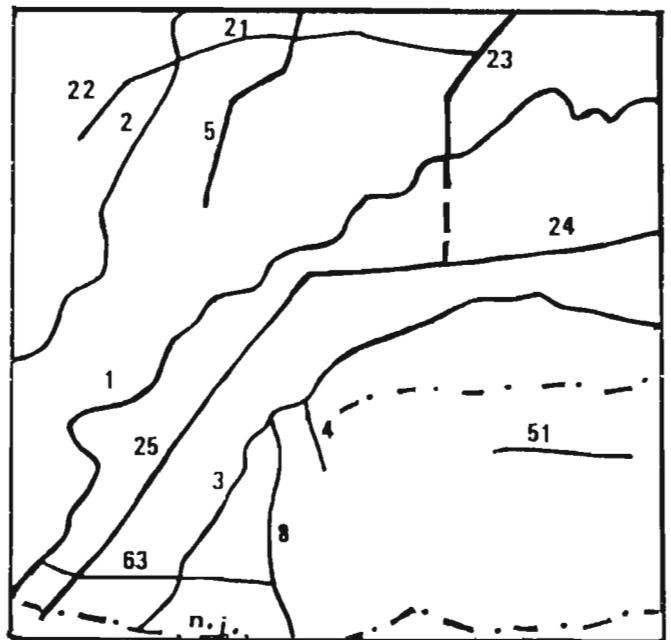


fig.28. Réseaux identifiés sur l'image 49

b. Procédure 3

L' Ouverture lisse le fond. La rivière n'est plus distincte de l'environnement, mais beaucoup de réseaux fins sombres apparaissent par contraste. (ph.50-fig 29).



50. OUVERTURE sur filtre EAST

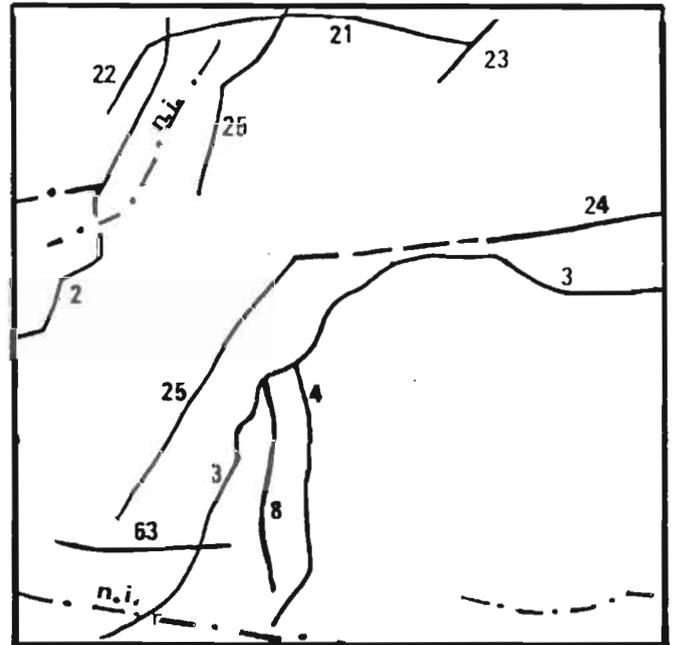


fig.29. Réseaux identifiés sur l'image 50.

c. Procédure 4

- La Fermeture a conservé les réseaux fins, mais ils sont peu distincts du fond. La continuité des réseaux sombres est accentuée. (ph.51 - fig.30)



51. FERMETURE sur filtre EAST

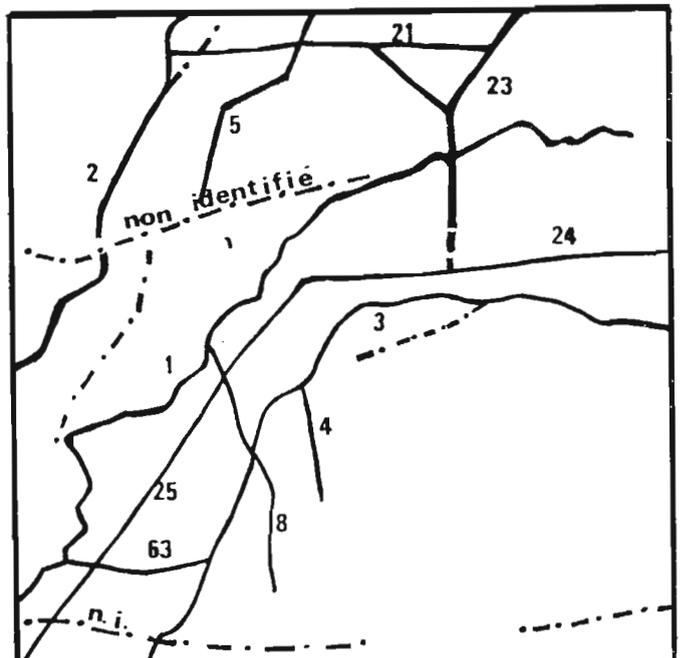
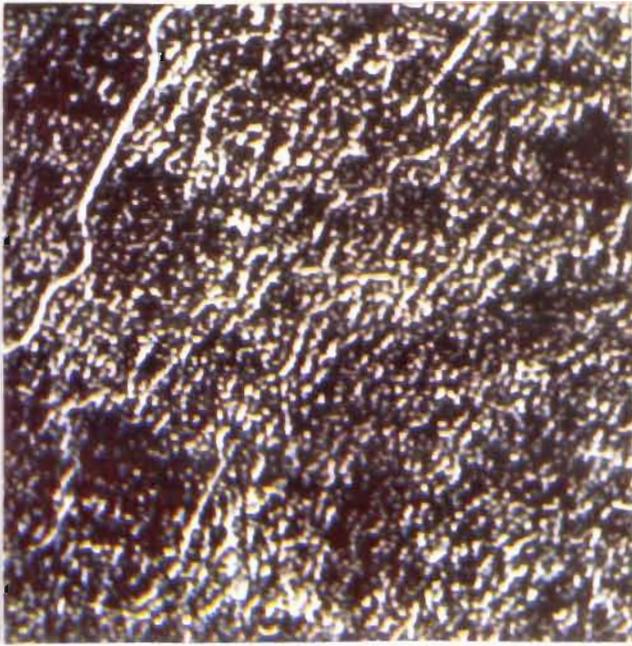


fig.30. Réseaux identifiés sur l'image 51

- Fermeture-image filtrée : les linéarités sombres sur l'image apparaissent en pics ; elles sont nettement visibles au NW de l'image, peu distinctes par contre dans le quart Sud-Est. (ph.52 - fig.31)



52 . Soustraction : Fermeture - filtre E

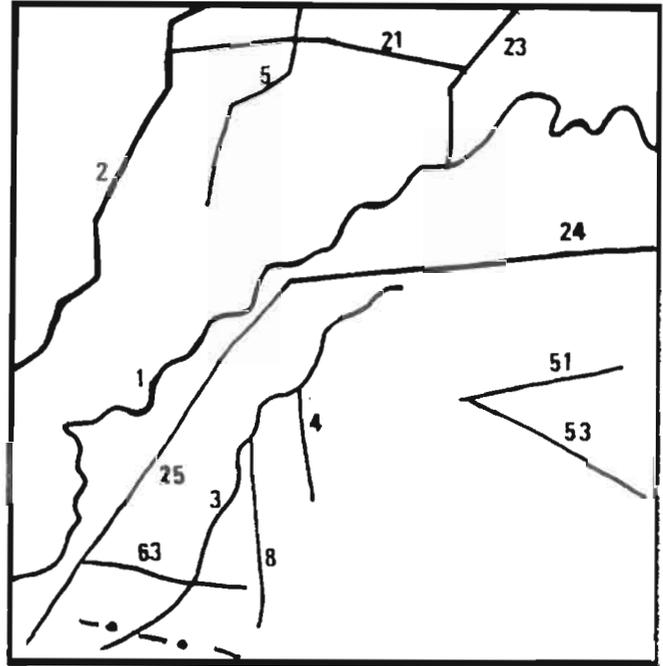


fig.31. . Réseaux identifiés sur l'image 52

#### d. Résultats

On obtient, on le voit, le même type de résultats que sur l'image filtrée du canal 6, avec bien sûr quelques variantes : dans le nombre de réseaux mis en évidence, dans la qualité de leur restitution. Ces deux images de base sont aussi satisfaisantes l'une que l'autre ; elles le sont davantage que les deux premières composantes principales brutes ou que la deuxième composante filtrée.

### 3. Conclusion

L'ensemble des résultats obtenus sur les deux zones d'étude Bhakra et Panihari, confirment l'efficacité des procédures mises au point. Ainsi, il n'y

a pas une seule procédure ni un seul type de traitement répondant à la fois aux objectifs de visualisation, de différenciation des réseaux linéaires. Ces objectifs ne peuvent être atteints qu'à la suite de plusieurs opérations. Les enchaînements simples, élémentaires que nous venons d'exposer, ont permis, sur le plan thématique, la mise en évidence de canaux d'irrigation actuellement non fonctionnels, qui n'étaient pas inscrits sur les cartes récentes. Sur le plan méthodologique, nous avons obtenu un réhaussement des structures, par renforcement de la structure elle-même (c'est-à-dire du contraste et de la continuité des linéaments), ou par lissage du fond sans altération de la structure recherchée.

Les trois objectifs que nous nous étions fixés : visualisation, différenciation et extraction des réseaux linéaires contenus dans deux sous-zones de la scène Landsat, ont été atteints à des degrés divers. En termes de visualisation, les résultats sont, on l'a vu, tout à fait probants (réhaussement, continuité, contraste) pour les réseaux importants comme pour les plus fins. En revanche, la différenciation des réseaux entre eux n'a pas pu être toujours obtenue sur une image complexe, comportant un grand nombre de réseaux, comme la sous-zone Panihari ; de même pour l'extraction. Non que ces objectifs ne puissent être atteints; ils l'ont été sur la sous-zone Bhakra. Le problème tient ici encore à la nature de l'image brute : plus les réseaux sont nombreux, et plus nous souhaitons conserver de structures, moins le seuillage, c'est-à-dire la séparation complète forme-fond, est difficile à réaliser. Or, il n'est possible d'extraire une forme que si l'image peut être binarisée, ou du moins, la quantité de niveaux de gris diminuée.

Choix d'une image brute, filtrage de celle-ci par un filtre physique, opérations élémentaires de morphologie mathématique : à la stratégie mise au point, il manquerait donc une étape : la binarisation de l'image sur laquelle les réseaux apparaissent très contrastés puis, éventuellement, la transformation de cette image par la morphologie mathématique binaire. Nous ne sommes pas parvenus à ce stade, considérant que l'objectif thématique était atteint , considérant d'autre part que l'image que nous traitons (sous-zone Panihari) se prêtait difficilement à la binarisation. Elle pourra cependant être réalisée ultérieurement, dans la poursuite du programme scientifique, sur la même zone et sur d'autres régions.

## CONCLUSION

Cette étude se proposait de mettre en évidence sur une image Landsat un type de réseau particulier. Nous avons été amené à développer, parallèlement à cette recherche d'ordre thématique, une méthode de travail permettant de répondre aux questions posées et qui soit adaptée aux conditions particulières qui nous étaient imposées : absence de terrain, image non choisie ... Ces "handicaps" ont permis de soulever quelques problèmes spécifiques du traitement d'image et en particulier de l'utilisation pratique de la morphologie mathématique, problèmes qui n'auraient pu être abordés dans une démonstration théorique.

Nous avons tenté de résoudre certains de ces problèmes, sachant que la solution n'est pas unique. Nous aurions pu mettre au point des procédures beaucoup plus élaborées, utilisant des transformations morphologiques plus complexes. Cette étude ne constitue donc pas une fin ; parler de "modèle" serait par ailleurs trop ambitieux. La méthode que nous avons mise au point qui combine par divers enchaînements les propriétés spécifiques de transformations classiques et de transformations élémentaires de morphologie mathématique, se voulait simple, rapide et extrapolable : les mêmes procédures appliquées à un même type d'image donneront le même type de résultat. Cependant, on l'a vu, la qualité de ces résultats reste subordonnée à la bonne qualité des images (en termes de contraste) et à une connaissance avancée, non seulement des objets même que l'on souhaite mettre en évidence, différencier ou extraire, mais aussi de la façon dont ils sont caractérisés sur l'image.

Sur le plan thématique archéologique, nous avons pu repérer sur les images traitées un canal ancien dont nous connaissions l'existence, mais pas le tracé précis ; nous ne savions pas par ailleurs si l'objet recherché, tel qu'il a été conservé, pouvait être mis en évidence sur des images de résolution assez médiocre comme celles de Landsat MSS. Les résultats, très probants obtenus sur ce plan pourront avec profit être extrapolés à d'autres régions moins connues : des réseaux anciens pourront être repérés dans des secteurs où leur présence est moins assurée ; une étude de ce type peut ainsi constituer une bonne préparation pour une mission sur le terrain.

La conservation, la restitution et le réhaussement de structures peuvent par ailleurs présenter un grand intérêt dans des disciplines autres que l'archéologie : de nombreuses questions sont posées au géographe par exemple, en termes de réseaux linéaires, qu'il s'agisse de réseaux naturels : cours d'eau, vallées, végétation, failles..., ou artificiels : voies de communication, réseaux irrigués, morphologie urbaine et péri-urbaine.

D'autres zones d'étude, d'autres objets, d'autres images : le champ d'application des techniques et méthodes de détection, de mise en évidence et de mesure des formes est très large. Des travaux à venir, réalisés sur des images de meilleure résolution, les images fournies par le satellite SPOT par exemple, tout en posant de nouveaux problèmes devraient permettre d'aller beaucoup plus loin dans l'analyse qualitative et quantitative des formes en géographie.

BIBLIOGRAPHIE

- AGRAWAL D.P., 1984. "Whatever happened to the river Sarasvati ?" Science Age, february, p.18-24.
- CASSANET J.,1984. Satellites et capteurs, Paradigme, Caen, coll. Télédétection Satellitaire,128 p.
- COSTER F., CHERMANT J.L., 1985. Précis d'analyse d'images, Editions du CNRS, Paris.
- COURTY M-A., 1985. "Le milieu physique et utilisations du sol", Francfort H-P. éd. 1985, p. 11-31.
- COURTY M-A. and FEDOROFF N., 1985. "Micromorphology of recent and buried soils in a semi-arid region of northwestern India", Geoderma, Amsterdam, 35, p. 287-332.
- COUZY A., 1981. La Télédétection, Presses Universitaires de France, Paris, 126 p., coll. Que sais-je ? n° 1919
- DANI A.H., 1981. Indus Civilisation New Perspectives Centre for the study of the civilisation of Central Asia, Quaid-i-Azam University, Islamabad, Pakistan, p. 67-68.
- DEBAINE F., 1985. "Recherche de réseaux en Inde du Nord, première approche (Landsat RBV numérisé)", PONCET Y. éd, 1985, p. 41-62
- DEBAINE F., MERING C., PONCET Y., 1985, "Réseaux linéaires par Morphologie Mathématique. Deux exemples d'application de la Morphologie Mathématique à une image spatiale." A paraître.

- DESTIVAL I., 1985. Morphologie Mathématique et télédétection. Recherche de réseaux linéaires. Centre de Géostatique et de Morphologie Mathématique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Fontainebleau.
- DURAND-DASTES F., 1965. Géographie de l'Inde, Presses Universitaires de France, collection Que sais-je? n° 1184, 126 p.
- FRANCFORT H:P. éd, 1985. Prospections archéologiques au NW de l'Inde. Rapport préliminaire 1983-1984 (travaux de la Mission Archéologique Française en Inde n° 1), Edition Recherches sur les Civilisations, Paris, "Mémoires" n° 62.
- FRANCFORT H:P., 1985. "Distribution des sites", FRANCFORT H.P. éd., 1985, p. 55-76
- GENTELLE P., 1985. "Paysages, environnement et irrigation : hypothèses pour l'étude des 3è et 2è millénaires." FRANCFORT H:P. éd. 1985, p. 33-42.
- GHOSE B., KHAR A., HUSAIN Z., 1979. "The lost courses of the Sarasvati river in the Great Indian desert : new evidence from Landsat imagery", the Geographical Journal, vol. 145, part 3, november p. 446-451.
- GHOSE B., KHAR A., HUSAIN Z., 1980. "Comparative role of the Arawalli and the Himalayan river system in the fluvial sedimentation of the Rajasthan desert". Man and Environment, 4, Poona , p.8-12.
- JOLY G., 1984. Les Données-Images, Paradigme, Caen, coll. Télédétection Satellitaire.

- MERING C., PONCET Y., RAKOTO-RAVALONTSALAMA M., 1985. "Traitements numériques d'image spatiale appliqués aux dunes du Sahel", Programmation et Sciences Humaines n° 4, CNRS-MSH, Paris, 26 p.
- MERING C., 1985. "Pour une description quantitative des formes à différentes échelles, à partir des images satellitaires", PONCET Y. éd., 1985, p.31-37.
- MERING C., PONCET Y., JACQUEMINET C., RAKOTO-RAVALONTSALAMA M. 1986. "Description quantitative des formes de dénudation au Sahel Ouest-africain", Xè Congrès Cospar, Toulouse, juillet.
- MISRA V.N., 1977. "Evolution of the pattern of the human settlement in the arid and semi-arid regions", JAISWAL P.L. ed., Desertification and its control, (Indian Council of Agricultural Research), New-Delhi, p. 10-24.
- PAL Y., SAHAI B., SOOD R.K., AGRAWAL D.P., 1980. "Remote sensing of the "Lost" Sarasvati River", Proc. Indian Acad. Sci., 89, 1, November, p. 317-331.
- PONCET Y. éd, 1985. Sujet de recherche "zones sensibles au Sahel", Rapport d'activité, Documents provisoires, ORSTOM : Département B, Atelier de Télédétection de Bondy, CNRS : URA 10, ATP Télédétection, décembre.
- PONCET Y. 1985. "Télédétection et archéologie à l'échelle régionale : une opération sur les données Landsat", Revue d'Archéométrie, Bulletin de liaison du Groupe des méthodes Physiques et Chimiques de l'Archéologie, n° 9.
- PONCET Y., 1984. "La télédétection spatiale dans un inventaire géographique à petite échelle", l'Espace Géographique, n° 3, 173-184, 289, Paris.
- PRATT W.K., 1978. Digital Image Processing, Wiley and Sons, New-York.

RAKOTO-RAVALONTSALAMA M., 1985. " Contribution à une recherche sur les formes : identification et mesures", PONCET Y. ed, 1985, p.63-83.

RICHARDS J.A., 1984. "Thematic Mapping from Multitemporal Image Data Using the Principal Components Transformation", Remote Sensing of Environment, 16, p.35-46.

SCANVIC J.Y., 1983. Utilisation de la télédétection dans les sciences de la Terre, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Manuels et méthodes n° 7, Orléans.

SCHOWENGERDT R., 1985. Techniques for image processing and classification in remote sensing, Academic press, New-York.

SERRA J., 1982. Image analysis, Academic Press, Londres.

SPATE O.H.K., and LEARMONTH A.T.A., 1967. India and Pakistan, a General and Regional Geography, Methuen & co LTD.

VERGER F., 1982. L'observation de la Terre par les satellites, Presses Universitaires de France, collection Que sais-je ?, n° 1989.

Les satellites d'observation de la Terre, Landsat, Télédétection 1, Initiations - Documentations Techniques n° 34, ORSTOM, Paris, 1977.

Cartes topographiques :

Haryana - Punjab - Rajasthan, 44° 1/250 000, 1977.

Haryana - Punjab, 44  $\frac{0}{2}$  et 44  $\frac{0}{6}$  , 1/50 000, 1977.

Punjab, 44  $\frac{0}{2}$  et 44  $\frac{0}{6}$  , one inch ou 1/63 360, 1915.

Indian atlas, quarter sheet 31 - SE, quarter inch ou 1/250 000

LISTE DES FIGURES

- fig.1. Situation de la zone étudiée dans le Nord-Ouest de l'Inde.
- fig.2. Province d'haryana : pluviométrie et différentes formes du relief. D'après P. Gentelle, 1985.
- fig 3. Carte pédologique simplifiée du bassin de la Ghagghar-Sarasvati. D'après Ahuja and Khana, 1982, cf. Courty, 1985.
- fig.4. Courbe ombrothermique de la station climatique de hissar (Ahuja and Mahenda, Singh, 1983)
- fig.5. Bande spectrale 6. Canal Bhakra. Zoom. Sortie imprimante.
- fig.6. Bande spectrale 6. La Ghagghar (rivière). Zoom. Sortie imprimante.
- fig.7. Deuxième composante principale. Canal Bhakra. Zoom. Sortie imprimante.
- fig.8. Deuxième composante principale. La Ghagghar (rivière). Sortie imprimante.
- fig. 9. Sous-zone Panihari : zonage sur bande spectrale 6.
- fig.10. Sous-zone Panihari : zonage sur indice de végétation jaune.
- fig.11. Sous-zone Panihari : zonage sur indice de végétation verte.
- fig.12. Dilatation de la fonction en teintes de gris.
- fig.13. Erosion de la fonction en teintes de gris.
- fig.14. Ouverture de la fonction en teintes de gris.
- fig.15. Gradient morphologique.
- fig.16. Fermeture de la fonction en teintes de gris.
- fig.17. Sous-zone Panihari : les réseaux: les canaux -actuels et anciens-, les routes, les chemins ; synthèse des cartes topographiques.

- fig.18. Extrait de la carte au 1/250 000 de 1977 ; agrandissement.
- fig.19. Nombre de canaux identifiés sur chaque image.
- fig.20. Nombre de routes identifiées sur chaque image.
- fig.21. Nombre de chemins identifiés sur chaque image.
- fig.22. Réseaux identifiés sur l'image 41.
- fig.23. Réseaux identifiés sur l'image 42.
- fig.24. Réseaux identifiés sur l'image 43
- fig.25. Réseaux identifiés sur l'image 44
- fig.26. Réseaux identifiés sur l'image 45.
- fig.27. Réseaux identifiés sur l'image 46.
- fig.28. Réseaux identifiés sur l'image 49
- fig.29. Réseaux identifiés sur l'image 50.
- fig.30. Réseaux identifiés sur l'image 51.
- fig.31. Réseaux identifiés sur l'image 52.

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

1. Tirage photographique au 1/1 000 000è de la vue Landsat 159-040 du 10 novembre 1975.
2. Le piémont himalayen ; Nord-Ouest de l'Inde.
3. Bande spectrale 5. Canal Bhakra. Zoom. Photo d'écran Péricolor (couleur).
4. Bande spectrale 4. Deux canaux d'irrigation. Zoom. Photo d'écran Péricolor (couleur).
5. Bande spectrale 7. La Ghagghar (rivière). Zoom. Photo d'écran péricolor (couleur).
6. Sous-zone Panihari. Bande spectrale 6 brute. Photo d'écran Péricolor (couleur).
7. Sous-zone Panihari. Zonage sur composition colorée lissée des quatres bandes spectrales (4, 5, 7). Photo d'écran Péricolor (couleur).
8. Sous-zone Panihari. Composition colorée des 1<sup>ère</sup> , 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> composantes principales. Photo d'écran Péricolor (couleur).
9. Sous-zone Panihari. Indice de végétation jaune. Photo d'écran Péricolor (noir et blanc).
10. Sous-zone Panihari. Indice de végétation verte. Photo d'écran Péricolor (noir et blanc).
11. Sous-zone Panihari. Première composante principale. Photo d'écran Péricolor (couleur).
12. Sous-zone Panihari. Deuxième composante principale. Photo d'écran Péricolor (couleur).
13. Un tank ; village de Dhanana. Décembre 1985, H.-P.F. (1).
14. La Ghagghar (rivière) à Madh (vue vers le Nord-Ouest); janvier 1983, P.G. (1)
15. Canal du Rajasthan, au Nord de Rawatsar (février 1983, P.G.)

---

(1). H.-P.F. : Henri-Paul Francfort  
P.G. : Pierre Gentelle

16. Canal Bhakra. Février 1983, P.G.
17. Arbres alignés / canal / arbres alignés. Janvier 1985, H.-P.F.
18. Végétation / canal : Missika minor / route / végétation. Janvier 1985, H.-P.F.
19. Canal double (Dang minor) bordé d'arbres alignés. Janvier 1985, H.-P.F.
20. Alignement d'arbres signalant la présence d'un canal: Dang minor. Janvier 1985, H.-P.F.
21. Arrière plan : arbres signalant la présence d'un canal (Talu minor). Janvier 1985, H.-P.F.
22. Canal très étroit (1 ou 2 m de large). Janvier 1985, H.-P.F.
23. Canal situé entre Shapur et Matarsham ; XIX<sup>e</sup> siècle.
24. Butte matérialisant le tracé d'un canal médiéval.
25. Bandes de sable, vestiges d'un canal médiéval.
26. Traces très mal conservées d'un canal médiéval.
27. Route bitumée importante ; réservoir ; village de Ghari. Janvier 1985, H.-P.F.
28. Route bitumée de moyenne importance (route Mundaya-Dhanana). Janvier 1985, H.-P.F.
29. Chemin ; grande dune.
30. Sous-zone Panihari. Erosion (élément structurant hexagonal) sur canal 6 filtré par le gradient NW. Photo d'écran Péricolor (noir et blanc).
31. Sous-zone Bhakra. Bande spectrale 6 brute. Photo d'écran Péricolor (couleur)
32. Sous-zone Bhakra. Ecart-type sur canal 6. (1)
33. Sous-zone Bhakra. Dilatation sur écart-type.
34. Sous-zone Bhakra. Erosion sur écart-type.
35. Sous-zone Bhakra. Ouverture sur écart-type.
36. Sous-zone Bhakra. Erosion sur Ouverture (35).
37. Sous-zone Bhakra. Gradient sur (Erosion sur Ouverture: 36)

---

(1). Les photos 31 à 38 sont des photos d'écran Péricolor, couleur.

38. Sous-zone Bhakra. Médiane sur écart-type.
39. Sous-zone Panihari. Canal 6 brut. Photo d'écran Péricolor (noir et blanc).
40. Sous-zone Panihari. Filtre directionnel NW sur canal 6 Photo d'écran Péricolor (noir et blanc).
41. Sous-zone Panihari. Dilatation sur filtre NW (40) Photo d'écran Péricolor (couleur).
42. Sous-zone Panihari. Erosion sur filtre NW (40). (1)
43. Sous-zone Panihari. Ouverture sur filtre NW. (40).
44. Sous-zone Panihari. Top-hat sur filtre NW (40).
45. Sous-zone Panihari. Fermeture sur filtre NW (40).
46. Soustraction : Fermeture - filtre NW (40).
47. Sous-zone Panihari. Première composante principale.
48. Filtre EAST sur première composante principale.
49. Sous-zone Panihari. Erosion sur filtre East (48).
50. Sous-zone Panihari. Ouverture sur filtre East (48).
51. Sous-zone Panihari. Fermeture sur East (48).
52. Sous-zone Panihari. Soustraction : Fermeture - filtre East (48).

---

(1). Les photos 42 à 52 sont des photos d'écran Péricolor (noir et blanc).

LISTE DES TABLEAUX

- tabl. I. Apports des différentes cartes topographiques ; comparaison des légendes.
- tabl. II. Comportement radiométrique et morphologique de quatre réseaux linéaires sur trois bandes spectrales.
- tabl. III. Les étapes du traitement des sous-zones Bhakra et Panihari.
- tabl. IV. Sous-zone Bhakra : ensemble des procédures expérimentées.
- tabl. V. Sous-zone Bhakra : les procédures les plus satisfaisantes
- tabl. VI. Sous-zone Panihari : ensemble des procédures expérimentées.
- tabl. VII. Sous-zone Panihari : résultats image par image et réseau par réseau : lisibilité des réseaux.
- tabl. VIII. Sous-zone Panihari : résultats image par image et réseau par réseau : étude de la continuité des traits.

## MOYENS TECHNIQUES UTILISES

Le traitement informatique des images a été effectué à l'Atelier de Télédétection de l'ORSTOM à Bondy (ATOB).

L'unité de traitement informatique de l'ATOB dispose d'un ordinateur Mini 6 Honeywell Bull et d'extensions disques durs, d'un périphérique de visualisation Péricolor 1000, de tables traçantes noir et blanc et couleurs (Colorplot et Benson), d'un Péricolor 1000 off line, et d'une bibliothèque de logiciels (traitements statistiques, mathématiques, classifications multivariées diverses, visualisations recalages géométriques et radiométriques...).

LISTE DES PROGRAMMES UTILISES  
POUR LE TRAITEMENT DES IMAGES

(Bibliothèque de logiciels de l'Atelier de Télédétection  
de l'ORSTOM)

FILTRES PHYSIQUES

- FILTRE : effectue le filtrage d'un canal par convolution avec une matrice 3x3.  
Auteur : C. Méring
- GABARI : calcule pour chaque pixel, à partir d'un canal quelconque, le gradient le plus élevé parmi huit directions et la direction où le gradient est maximum.  
Auteur : C. Méring
- LIVAR : filtre par l'écart-type local.  
Auteur : C. Méring

TRAITEMENTS MULTISPECTRAUX

- FANSYS : crée un fichier de données destiné aux analyses multidimensionnelles.
- ANALYS : Analyse en composantes principales  
COE4
- INDIC : calcule trois indices à partir des canaux de Landsat : indice de végétation verte, indice de végétation jaune, indice de brillance.

MORPHOLOGIE MATHEMATIQUE

- CARHEX : Conversion d'un cadre 256x300 en une image type MORPHOLOG (trame hexagonale) de 256x256.  
Auteur : M. Rakoto-Ravalontsalama

- VOISIN : Morphologie Mathématique en teintes de gris  
transformations de voisinage de rayon 1  
Auteur : M. Rakoto-Ravalontsalama
  
- RAYONX : Morphologie Mathématique en teintes de  
gris : transformations de voisinage de  
rayon quelconque.  
Auteur : M. Rakoto-Ravalontsalama
  
- BINLOG : Morphologie Mathématique binaire  
Auteur : M. Rakoto-Ravalontsalama
  
- ARITHM : Opérations arithmétiques entre images  
ou entre image et constante.  
Auteur : M. Rakoto-Ravalontsalama

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	p. 2
I - LE MILIEU D'ETUDE	5
1. Le cadre régional	5
1.1. L'environnement actuel	5
1.1.1. Géomorphologie	5
1.1.2. Le climat	9
1.1.3. La végétation	11
1.2. Les paléo-environnements	13
2. Les sources d'information	20
2.1. Les cartes topographiques	20
2.2. Le terrain - les photos aériennes	24
2.3. Les images spatiales	26
3. Les informations apportées par la télédé- tection au niveau local	28
3.1. Les données	29
3.2. Délimitation d'unités homogènes - essai d'interprétation	30
a. Les réseaux linéaires	30
b. Sols clairs, sableux ? dunes ?	35
c. Présence de végétation ?	39
3.3. Conclusion	40
II - METHODES D'ETUDE, PROCEDURES DE TRAITEMENT	42
1. Les questions posées, la problématique	42
2. La stratégie	43
2.1. Méthodes d'analyse statistique et filtres physiques	45
a. Recherche d'une "image de base"	45
b. Réhaussement des contrastes sur l'image de base	46
2.2. La morphologie mathématique	47
a. Principes	47

b. Les transformations morphologiques	49
3. Les images - les procédures de traitement	58
3.1. La sous-zone Bhakra	51
a. Procédure 1	53
b. Procédure 2	54
c. Procédure 3	55
d. Procédure 4	56
3.2. La sous-zone Panihari	56
3.2.1. Recherche des images de base	58
3.2.2. Réhaussement des contrastes	60
3.2.3. L'utilisation de la Morphologie mathématique	62
3.2.4. Les procédures de traitement	63
a. Procédure 1	63
b. Procédure 2	64
c. Procédure 3	64
d. Procédure 4	65
III - LES RESULTATS	68
1. Les critères de satisfaction	68
1.1. Méthode d'analyse des données	68
1.2. Lisibilité des réseaux linéaires	71
1.3. Continuité du trait	72
1.4. Différenciation des réseaux entre eux	72
1.5. L'extraction des réseaux	73
2. Analyse des résultats selon les quatre critères de satisfaction	73
2.1. Les réseaux	73
2.2. Les procédures	86
2.1.1. Remarques générales	86
2.2.2. Résultats image par image et réseau par réseau	94

A. Sous-zone Bhakra	95
a. Procédure 1	96
b. Procédure 2	96
c. Procédure 3	97
d. Procédure 4	98
e. Résultats	98
B. Sous-zone Panihari	99
a. Procédure 1 (sur canal 6 filtré)	100
b. Procédure 2	100
c. Procédure 3	101
d. Procédure 4	102
e. Résultats	103
Traitements sur première composante principale	104
a. Procédure 2	105
b. Procédure 3	106
c. Procédure 4	
c. Procédure 4	106
d. Résultats	107
3. Conclusion	107
CONCLUSION	110
BIBLIOGRAPHIE	113
LISTE DES FIGURES	117
LISTE DES PHOTOGRAPHIES	119
LISTE DES TABLEAUX	122
MOYENS TECHNIQUES UTILISES	123
LISTE DES PROGRAMMES UTILISES POUR LE TRAITEMENT DES IMAGES	124
TABLE DES MATIERES	127
ANNEXE	I - XVII

ANNEXE

Nous présentons ci-dessous la description méthodologique et les résultats des travaux effectués sur l'image Landsat RBV 158-040 A, numérisée.

Les objectifs sont semblables à ceux de l'étude réalisée sur l'image Landsat MSS : mettre en évidence, dans un premier temps, des réseaux de toute nature, puis, dans un second temps, des différences entre ces réseaux, différences de nature radiométrique, de dimensions, de forme.

Cette étude a permis l'apprentissage des logiciels et du matériel de traitement d'image.

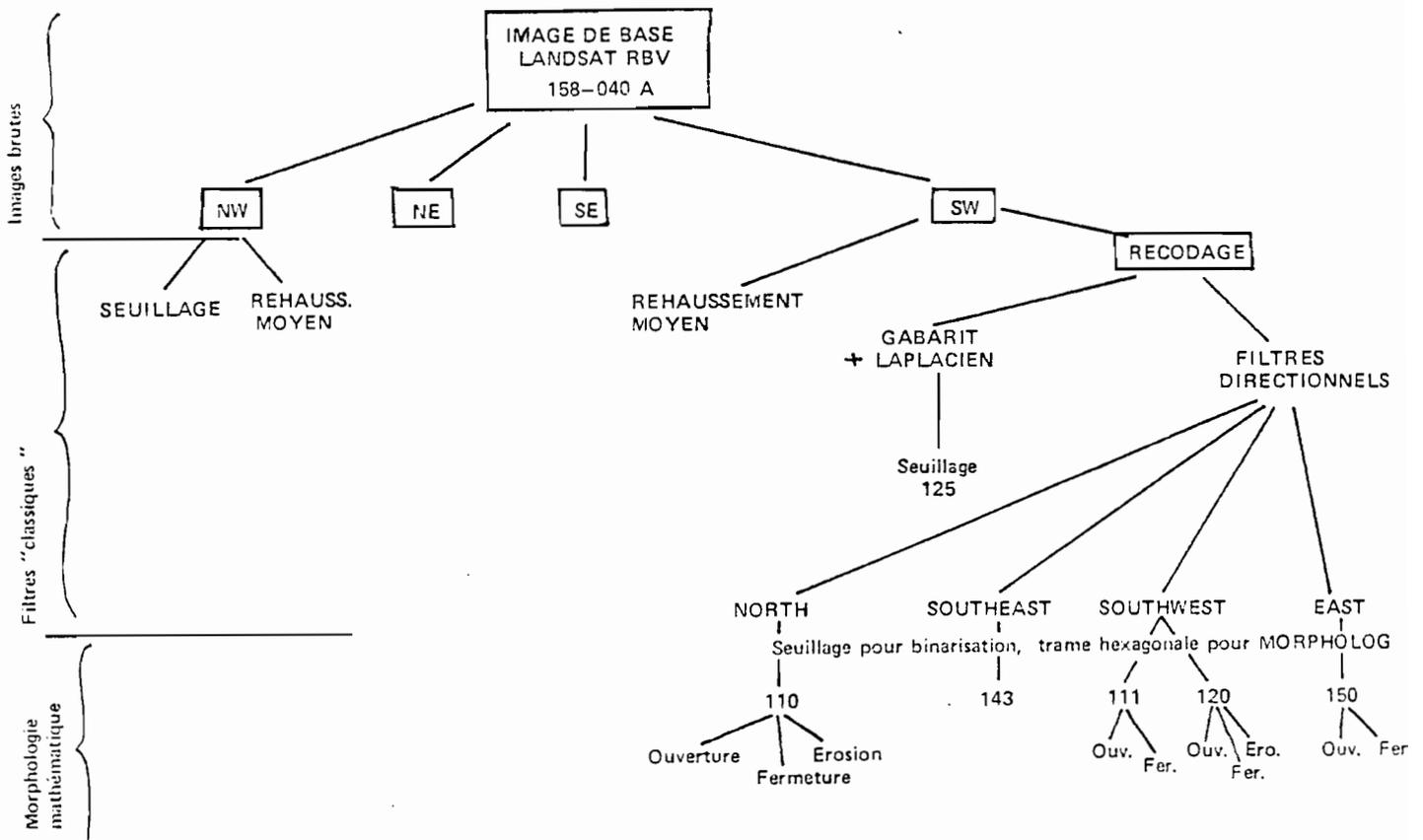


Fig. 1. Tableau d'enchaînement des opérations.

## 1. LES DONNEES SPATIALES EXPLOITEES

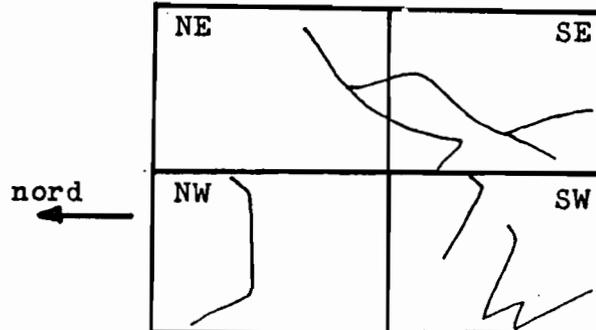
Pour la phase qui est décrite ici (phase I), nous disposons des données fournies par le système RBV (Return Beam Vidicon) de Landsat, système constitué de deux caméras vidicon à retour de faisceau opérant dans une même bande spectrale, de 0,505 à 0,750 nanomètres.

La scène RBV couvre 183 sur 181 kilomètres de terrain ; elle est divisée en quatre "sous-scènes" appelées A, B, C, et D, correspondant respectivement aux quarts Nord-Ouest, Nord-Est, Sud-Ouest et Sud-Est de la scène. La résolution spatiale est de 24 mètres sur 24 mètres, en théorie sur les données originales.

Nous ne disposions pas des données numériques RBV correspondant à la région à étudier, nous avons donc numérisé les images disponibles (sous forme de négatifs sur film) afin de procéder à des traitements informatiques et statistiques susceptibles de simplifier schématiser, renforcer et "extraire" les linéaments peu perceptibles sur le terrain et sur image brute. Mais la numérisation d'une image graphique n'est pas sans entraîner une dégradation, une perte d'information par rapport aux données numériques originales. L'essai nous a cependant paru digne d'être tenté, tenant compte de ce que la meilleure résolution des données RBV pouvait tout de même fournir des résultats. Par ailleurs, l'application des procédures de traitement d'image sur données RBV a servi de "stage", d'apprentissage technique et informatique.

La numérisation (au moyen d'une caméra à numériser classique) a subdivisé la "sous-scène"

158-040 A en quatre fenêtres de 255 pixels sur 255 ; orientées et dénommées selon le schéma ci-dessous :



Dans un premier temps, il était nécessaire de rechercher le système le plus satisfaisant pour éliminer les croix figurant sur l'image brute (ph.1) Il s'agit de repères géométriques sans aucune signification radiométrique, qui comme tous les artefacts, doivent être éliminés préalablement à tout traitement; sinon, les valeurs correspondantes (les plus élevées) sont incluses dans les calculs, ce qui entraîne des résultats aberrants.

### 1.1. Le lissage majoritaire

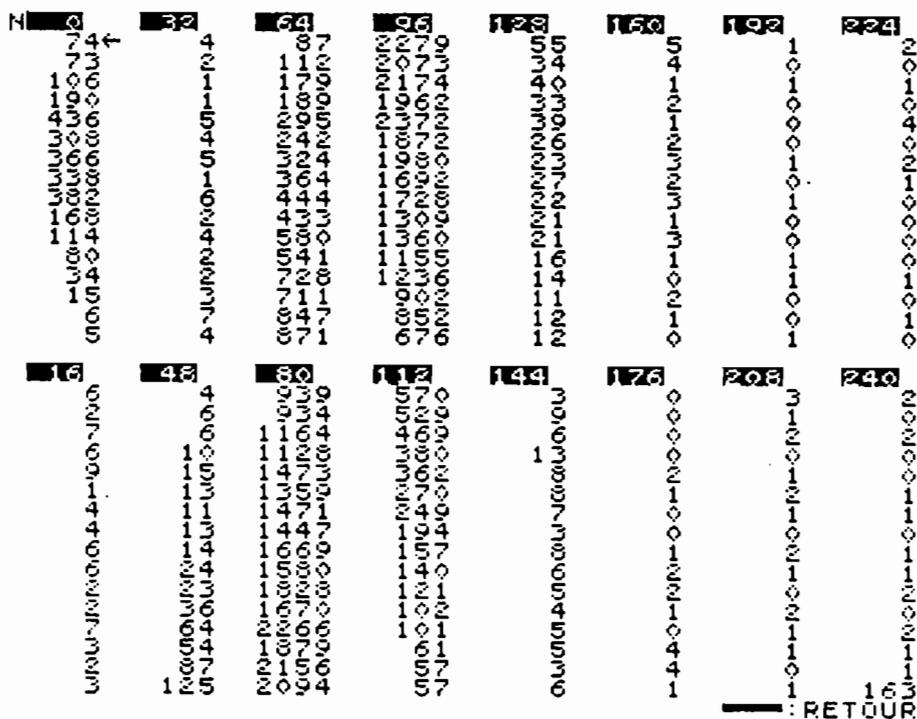
Le lissage majoritaire s'effectue à l'intérieur d'une maille carrée 3x3, le pixel central étant remplacé par la valeur majoritaire dans la maille.

Ce lissage a fait disparaître les croix, mais l'image résultante est "floue" et l'épaississement des formes très accentué, ce qui est particulièrement gênant dans une recherche de linéaments. Notre but était d'éliminer les artefacts sans que l'image dans son ensemble et surtout les réseaux linéaires soient affectés.

Nous avons alors effectué un recodage des niveaux radiométriques, indépendamment du contexte géographique.

1.2. Le recodage (1)

D'après l'histogramme de répartition des valeurs de chaque pixel, nous avons déterminé l'intervalle de niveaux dans lequel se situent les valeurs des croix : 173 à 256. Nous leur avons substitué la valeur la plus représentée dans l'image (d'après l'histogramme, là encore) : 100.

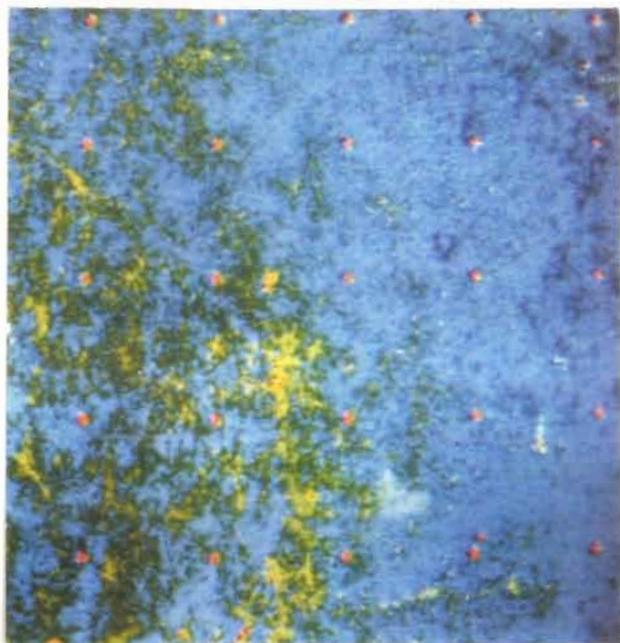


L'image obtenue est satisfaisante (ph.2) : les croix ont été éliminées (en même temps que quelques

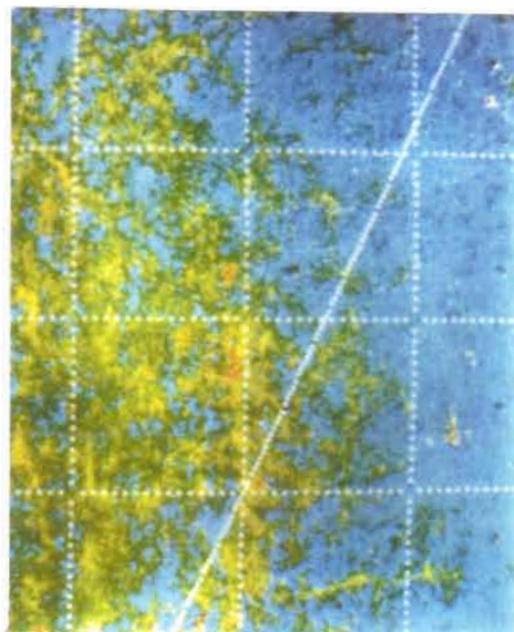
---

(1). Programme ATOB "RECODE".

points de mêmes valeurs), sans que le tracé des linéaments situés dans une gamme de valeurs radiométriques plus basses, semble avoir été affecté par le traitement.



1. Image brute (photographie d'écran)



2. Image recodée (photographie d'écran)

Ces artefacts éliminés, nous avons procédé au traitement proprement-dit de l'image : dans un premier temps, nous avons utilisé des traitements classiques : filtres directionnels et multidirectionnels ; dans un deuxième temps, nous avons abordé quelques traitements de morphologie mathématique.

## 2. LES TRAITEMENTS DITS "CLASSIQUES"

Nous avons expérimenté deux familles de filtres : les filtres directionnels, qui soulignent les orientations définies par les coefficients de la matrice de convolution et les filtres multidirectionnels

qui calculent parmi huit directions, celle dans laquelle le gradient est maximal.

### 2.1. Les filtres directionnels (1)

Nous avons expérimenté divers gradients orientés ; rappelons que la nomenclature de Pratt qui est employée ici désigne la "direction d'éclairement", c'est donc la direction perpendiculaire au nom du filtre qui est soulignée.

Ainsi, le filtre appelé NORTH, de coefficients

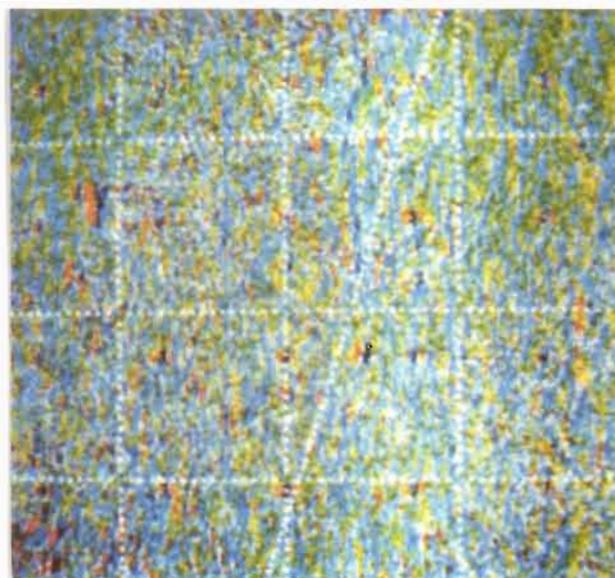
$$\begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{array}$$

met en valeur les directions horizontales et quelques diagonales à composantes horizontales déjà visibles sur l'image brute.

Le filtre EAST

$$\begin{array}{ccc} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{array}$$

met en évidence les structures locales verticales très nombreuses, ainsi que quelques obliques proches de la verticale. Deux structures centrales sont plus marquées (ph.3)



3. Filtrage EAST

Le filtre SOUTHEAST    -1-1 1  
                              -1-2 1  
                                  1 1 1

éclaire les diagonales de direction Nord-Est/Sud-Ouest et fait apparaître de nombreuses directions locales.

Le filtre SOUTHWEST    1-1-1  
                              1-2-1  
                                  1 1 1

accentue les diagonales Nord-Ouest/Sud-Est ainsi que quelques directions verticales : l'image résultante présente de nombreux réseaux parallèles, du Sud-Ouest au Nord-Est.

A ces quatre images filtrées, nous avons appliqué une fonction de visualisation (fonction prédéfinie du Péricolor 1000) : ceci a permis de modifier l'image visualisée en changeant la gamme de ses couleurs (ce qui permet d'accentuer certains contrastes), sans modifier les valeurs recalculées par le filtrage.

## 2.2. Les filtres multidirectionnels

### 2.2.1. Les filtres de type Gabarit

Les filtres Gabarit sont de simples gradients, mais optimisés localement : en chaque point de l'image, on remplace le pixel central d'une maille carrée 3x3 par le résultat de la convolution avec celui des huit masques directionnels (deux par axe, deux par diagonale) qui fournit le plus fort gradient. Le Gabarit calcule donc un contour et une direction (celle où le gradient est le plus élevé).

L'image obtenue n'est pas très satisfaisante, compte tenu de ce que nous recherchions ; Les linéarités les plus fines sont en effet gommées. Afin de renforcer les linéaments, nous avons superposé à l'image filtrée par Gabarit, un filtre laplacien de

coefficients -1-1-1  
                  -1-8-1  
                  -1-1-1

les linéaments sont mieux soulignés, les plus fins apparaissent cependant assez peu. Ce type de traitement

rend visible des tronçons partiels mal perçus ou non perçus sur l'image brute, mais il met en valeur aussi bien les réseaux ouverts que les réseaux fermés, ce qui conserve trop de détails dans l'image : détails qui empêchent de distinguer les réseaux ouverts.



4. Gabarit + laplacien

Afin d'obtenir une meilleure visualisation, une meilleure "évidence" des linéaments, nous avons transformé l'image résultante en image binaire, en sélectionnant un seuil au-delà duquel les valeurs sont visualisées comme étant de valeur 0, en-deçà duquel les valeurs sont visualisées comme étant de valeur 1 (ou vice-versa), (ph.4).

#### 2.2.2. Essai d'un filtre laplacien dit "de réhaussement moyen"

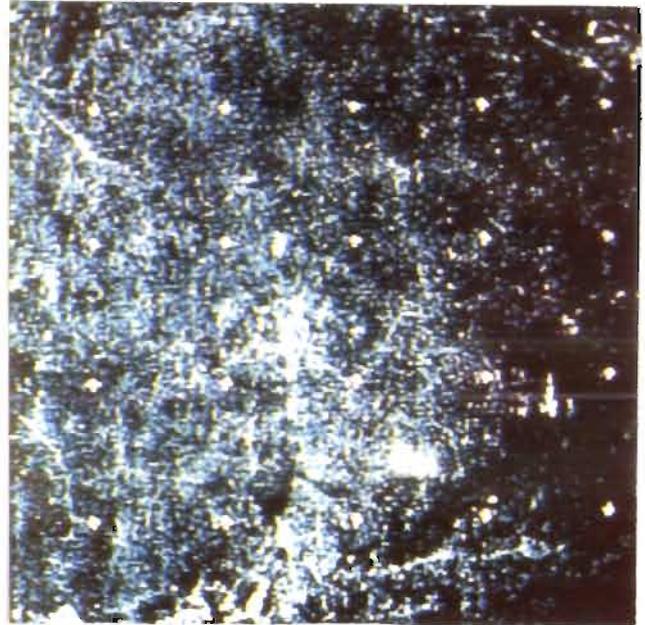
Additionné à l'image brute (ici non recodée), un filtre laplacien "de réhaussement moyen" (1) donne

---

(1). Ce filtre correspond aux coefficients suivants : pixel central=12, pixels périphériques=1. Le laplacien cité plus haut (pixel central=8) est dit "de réhaussement élevé".

un effet de relief : les transitions, les contrastes sont tous accentués (ph.5).

Ces familles de filtres (filtres directionnels et multidirectionnels, tels que les laplaciens) ont modifié l'image brute à des degrés variables. Les résultats sont inégalement satisfaisants : les filtres directionnels ont donné des figurations de structures, peu hiérarchisées



5. Réhaussement moyen

pour une même direction et brouillées par des détails trop abondants, non interprétables. Le Gagarit, on l'a vu, conserve également trop d'informations. Les laplaciens donnent des résultats assez proches de l'image brute pour la figuration des réseaux, sans donner d'éléments de différenciation.

Sur toutes les images résultantes, les filtres introduisent des éléments "parasites" qui n'ont rien à voir avec les réseaux recherchés et rendent leur mise en évidence malaisée.

Nous avons donc expérimenté quelques procédures de morphologie mathématique pour tenter de schématiser ces images, de les "nettoyer" en quelque sorte.

### 3. L'UTILISATION DE LA MORPHOLOGIE MATHÉMATIQUE

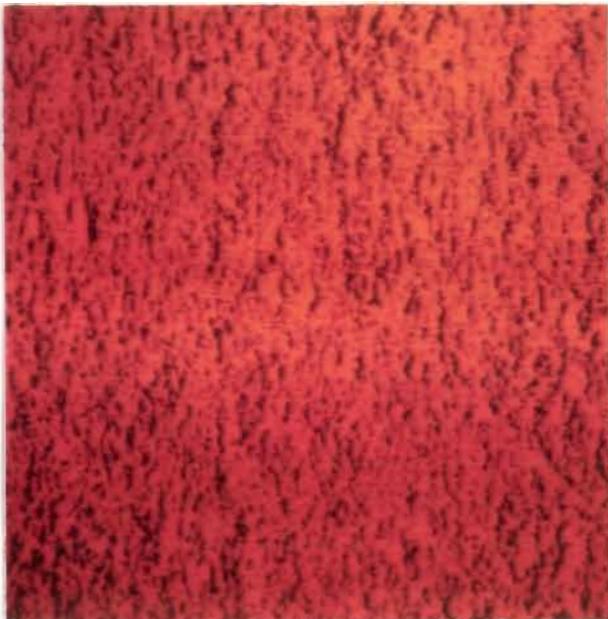
Nous avons choisi de traiter par la morphologie mathématique sous sa forme binaire, les images en niveaux compris entre 0 et 255, résultats des filtres directionnels cités plus haut (cf.fig.1)

### 3.1. Les étapes du traitement

#### 3.1.1. La binarisation préalable

La binarisation, ou conversion en "tout ou rien" est la transformation de l'image de façon à ce qu'elle ne présente plus que deux valeurs : 0 et 1. Elle est effectuée par seuillage, opération qui consiste à supprimer logiquement une partie de l'information, correspondant aux pixels dont la valeur est située au-dessus ou au-dessous du seuil choisi. Il s'agit de sélectionner les objets morphologiquement pris en compte.

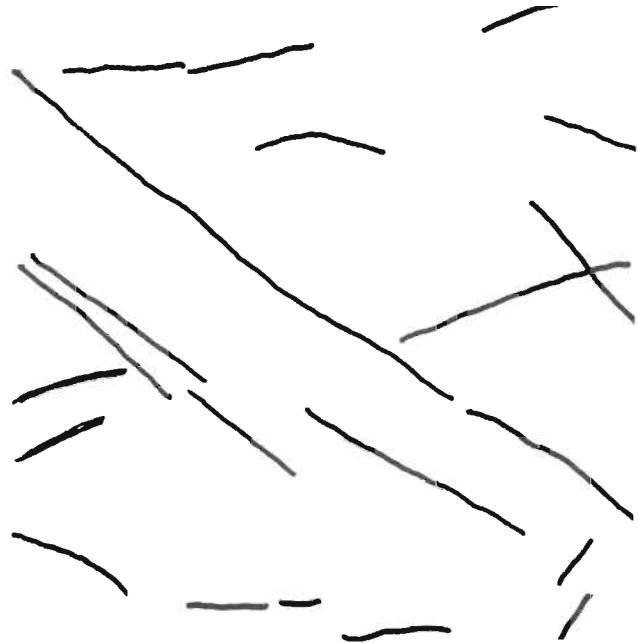
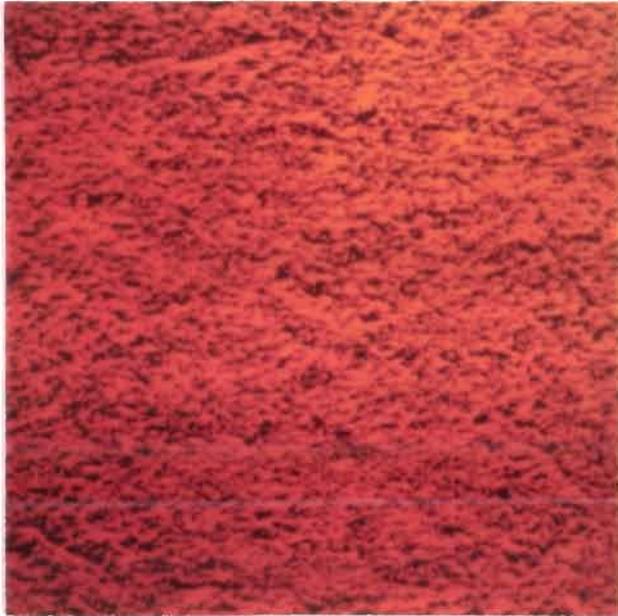
Il existe évidemment de multiples façons



6. Filtrage East seuillé

de seuiller une image à niveaux multiples (ou image en "teintes de gris") pour obtenir une image binaire.

Ici, nous avons combiné l'examen de l'histogramme des valeurs de l'image origine (résultante d'un filtrage



7. Filtrage North seuillé

directionnel) et l'examen visuel du résultat d'une dégradation de niveaux (fonction G5 du Péricolor 1000) pour déterminer un seuil optimal dans chaque image, mettant le mieux en évidence, en "positif" ou en "négatif", les linéaments révélés ou accentués par le filtrage.

Les seuils retenus ont été les suivants:

- filtre SOUTHWEST : n=120 (n pour "niveau")
- filtre EAST : n=150 (ph.6)
- filtre SOUTHEAST : n=143
- filtre NORTH : n=110 (ph.7)

### 3.1.2. La transformation de l'image pour MORPHOLOG

Les images ainsi binarisées ont été transformées afin d'être traitées par le logiciel MORPHOLOG, qui opère exclusivement sur des images de trame hexagonale, et non de trame carrée.

### 3.2. Les principes de la morphologie mathématique binaire

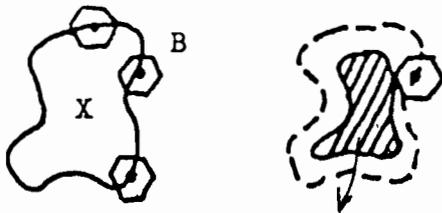
La morphologie mathématique binaire aborde l'image traitée de manière active, en la modifiant à l'aide d'un élément structurant que l'on promène dans l'image et grâce auquel on peut, en quelque sorte regarder celle-ci sous un angle particulier, selon la nature de cet élément structurant. Nous avons appliqué trois transformations morphologiques à l'image filtrée et binarisée "NORTH 110" (filtrage directionnel NORTH, qui met en valeur les structures horizontales, et seuil au niveau 110) : "Erosion", "Ouverture" et "Fermeture".

Nous opérons désormais sur des ensembles, décrits sur l'image par les pixels qui ont une valeur différente de 0.

Nous exposerons donc brièvement les principes de l'Erosion (et de son contraire, la Dilatation), puis ceux de l'Ouverture et de la Fermeture, qui sont des combinaisons des deux premières.

### 3.2.1. Erosion et Dilatation

fig.II



Soit X un ensemble connexe de pixels, codé différent de 0 et B un élément structurant de forme hexagonale

Erodé de X par B, s'écrit  $X \ominus B$  repéré par son centre en x. Bx est déplacé dans X de telle sorte que son centre occupe successivement toutes les positions x de l'espace.

Pour chaque position, on pose la question suivante : Bx est-il complètement inclus dans X ?

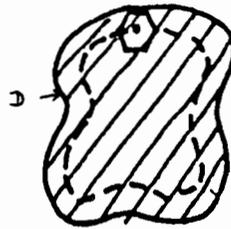
L'ensemble des positions x correspondant à une réponse positive forme un nouvel ensemble Y appelé érodé de X par B. Cet ensemble satisfait à l'équation :

$$Y = \{x : Bx \subset X\}$$

L'Erosion provoque une réduction de la surface de l'ensemble. (fig.II)

fig.III

D: Dilaté  
de X par B:  
 $X \oplus B$



Le dilaté de X par B est l'ensemble Y des centres x de Bx qui touchent l'ensemble X.

$$Y = \{x : Bx \cap X \neq \emptyset\}$$

La Dilatation a pour effet d'augmenter la surface de l'ensemble X.(fig.III)

Si l'on itère l'opération Erosion un certain nombre de fois, celui-ci finira par disparaître. Inversement, si l'on itère l'opération Dilatation un certain nombre de fois sur l'ensemble X, celui-ci remplira complètement le cadre.

### 3.2.2. Ouverture et Fermeture

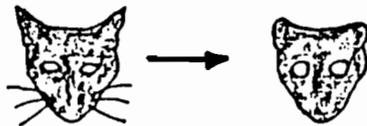


fig.IV

L'Ouverture est une Erosion suivie d'une Dilatation :  
L'ouvert de X par B est

$$X_B = (X \ominus B) \oplus B$$

En général, après une Ouverture, on ne retrouve pas l'ensemble de départ.

L'Ouverture fait disparaître les irrégularités différentes de 0 ; elle supprime les parties saillantes étroites.(fig.IV)



fig.V

La Fermeture est une Dilatation suivie d'une Erosion : le fermé de X par B est :

$$X^B = (X \oplus B) \ominus B$$

La Fermeture "remplit les trous" ; elle supprime les parties rentrantes étroites (fig.V).

Ouverture et Fermeture ont la propriété d'être idempotentes : si on itère l'opération avec un élément structurant de taille constante, l'image ne bouge pas.

Dans tous les cas, on peut faire varier la taille de l'élément structurant.

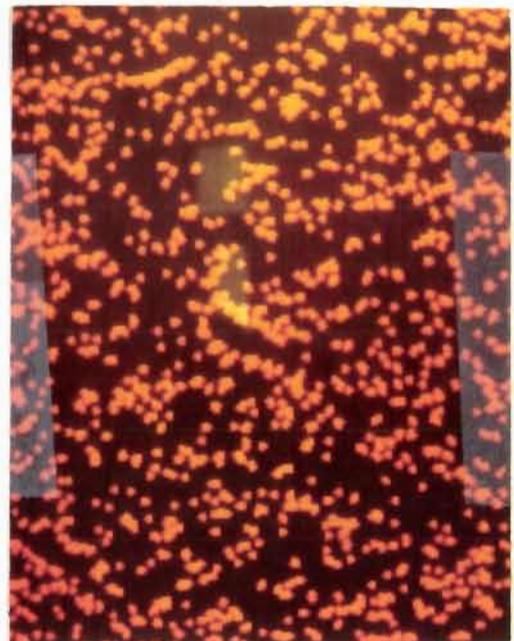
### 3.3. Les résultats

Les résultats des transformations effectuées sur les images filtrées binaires, avec un élément structurant de taille 1, sont inégalement satisfaisantes et souvent difficiles à interpréter.

Les images d'Ouverture présentent un éparpillement de points, la continuité des structures disparaît totalement (ph .8). Les images de Fermeture présentent certes des structures, mais "grossies", "étalées" l'image résultante est moins exploitable que l'image filtrée et même que l'image brute ( Ph .9). Une simple



8. Ouverture sur NORTH 110



9. Fermeture sur NORTH 110

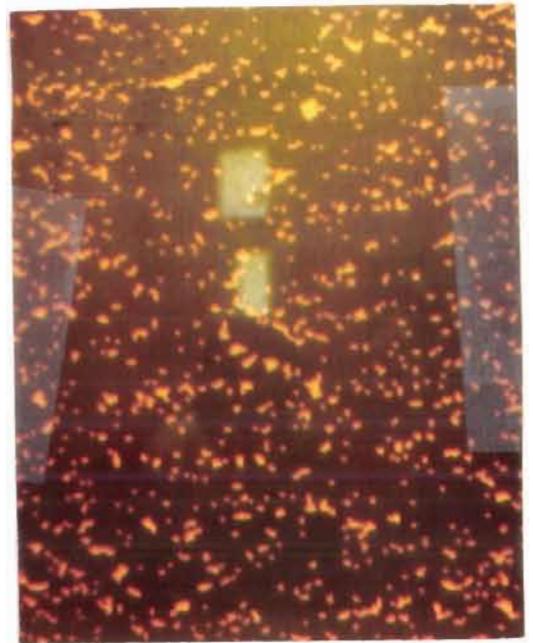
Erosion a été faite sur l'image NORTH, seuil 110 et sur une image SOUTHWEST seuil 120. Sur l'image SW 120, des indices de réseaux subsistent, mais discontinus, "effacés". Sur N 110 par contre, (ph.10), les réseaux apparaissent plus clairement, ils sont plus continus.

La raison la plus évidente de ces médiocres résultats semble bien être un mauvais choix des seuils de binarisation : sélectionnés pour mettre le mieux en évidence des structures sur l'image visualisée, ils "disparaissent" en

effet à la moindre transformation. Des images binaires "plus riches" ou "plus pauvres" selon le choix des seuils auraient pu donner des résultats différents. Mais comment choisir les seuils dans une première approche si ce n'est de façon empirique et par tâtonnements ? Il paraît alors plus simple de transformer une image "en teintes de gris".

#### 4. CONCLUSION

Les résultats de cette phase expérimentale sont inégaux : les réseaux sont plus ou moins mis en évidence selon les traitements ; l'image brute est souvent plus significative que les images traitées, s'il s'agit simplement de "dessiner" et de prolonger par l'oeil des linéaments considérés à priori comme



10. Erosion sur NORTH 110

significatifs. Cependant, l'image brute est incapable de restituer, même après un examen visuel très attentif, de façon assurée un linéament peu distinct, de mettre des linéaments "nouveaux" en évidence, de donner des distinctions entre des linéaments différents.

On peut invoquer plusieurs raisons d'ordre général pour expliquer ces résultats, à la vérité peu satisfaisants. D'une part, la mauvaise qualité de l'image origine : les données RBV ont certes une bonne résolution spatiale, mais leur transcription sous forme photographique d'abord puis leur numérisation, fait perdre beaucoup de sa richesse à l'image d'origine théorique ; les contrastes de réflectance sont en effet très amortis, les linéaments fins s'il en existe, ne sont pas restitués.

L'image RBV est une image mono-spectrale, elle ne restitue guère de faibles nuances sur le terrain (différences de végétation, nuances dans les sols nus...), qui seraient thématiquement significatives pour notre recherche : les réseaux correspondant à des routes en terre, à des alignements de végétation, par exemple, ne sont pas restitués.

Enfin, comme on l'a vu précédemment, certains choix (les seuils de binarisation, par exemple, ou les coefficients de filtrage) n'étaient pas assez précis ; des traitements plus nombreux, en modifiant les paramètres, auraient pu donner des résultats plus significatifs.

Mais au moment où cette phase expérimentale et d'apprentissage s'achevait, les données numériques Landsat multi-spectrales (MSS) 159-040, vue en date du 10 novembre 1975, étaient rendues disponibles. Nous avons alors choisi de ne pas poursuivre l'étude des

traitements sur image RBV numérisée , mais d'appliquer l'expérience acquise à cette nouvelle image.

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

1. Image brute. Photo d'écran Péricolor ((couleur).
2. Image recodée. Photo d'écran Péricolor (couleur).
3. Filtrage East. Photo d'écran Péricolor (couleur).
4. Gabarit + laplacien. Photo d'écran Péricolor (couleur)
5. Réhaussement moyen. Photo d'écran Péricolor (noir et blanc).
6. Filtrage East seuillé. Photo d'écran Péricolor (couleur).
7. Filtrage North seuillé. Photo d'écran Péricolor (couleur).
8. Ouverture sur North seuillé. Photo d'écran Péricolor (couleur).
9. Fermeture sur NOOrth 110. Ph. d'écran Péricolor (couleur)
10. Erosion sur North 110. Ph. d'écran Péricolor (couleur)