

Thèse de Doctorat
de
l'Université de Paris I - Panthéon - Sorbonne
préparée sous la direction de M. Alain GODARD
Spécialité : GEOGRAPHIE

par
Françoise DEBAINE

PALEOENVIRONNEMENTS
ET
OCCUPATION HUMAINE ANCIENNE

L'APPORT DES IMAGES SATELLITAIRES A L'ETUDE
GEOGRAPHIQUE DES CONFINS INDO-PAKISTANAIS

Soutenue le 29 janvier 1993 devant le jury composé de :

Mme Marie-Françoise COUREL
M. Pierre GENTELLE
M. Alain GODARD
M. Jean-François JARRIGE

M. Marcel POUGET
M. Fernand VERGER

Directeur de Recherche au C.N.R.S.
Directeur de Recherche au C.N.R.S.
Professeur à l'Université de Paris I
Conservateur Général des Musées
chargé du Musée Guimet
Directeur de Recherche à l'ORSTOM
Professeur à l'Ecole Normale Supérieure

Avant Propos

En 1987, Monsieur Henri-Paul Francfort, directeur de l'U.P.R. n° 315 du CNRS "Archéologie de l'Asie centrale : milieux, peuplement, techniques" me proposait de continuer, en la développant, une recherche commencée en maîtrise qui portait sur l'apport des images satellitaires à l'étude des vestiges de l'occupation humaine ancienne et des paléoenvironnements. Ce travail s'inscrivant dans un cadre pluridisciplinaire me donnait accès à un terrain choisi ainsi qu'à une équipe de recherche dont le contact fut pour moi des plus fructueux. Je tiens à lui exprimer ma reconnaissance pour la confiance dont il m'a honorée.

A Monsieur Alain Godard qui fut pour moi, avec une amicale compréhension, un guide éclairé tout au long de ces années va ma profonde gratitude. Sa direction confiante me laissant le libre choix de mes orientations, ce dont je lui suis tout particulièrement reconnaissante, ainsi que son soutien permanent et sa disponibilité tant sur le terrain qu'au cours de la période de rédaction, m'ont permis de mener à bien ce travail.

Le Laboratoire de Géographie Physique "Pierre Birot" de Meudon (URA 141) qu'il dirige m'a accueillie chaleureusement, m'offrant au sein de l'équipe "Paléoenvironnements du Quaternaire supérieur : paysages végétaux, anthropisme et dynamique physique" un contexte scientifique stimulant ainsi qu'un appui financier. J'exprime ici mes remerciements à Monsieur Bernard Valadas son responsable, à tous les membres de cette équipe qui m'ont fait partager leur expérience et à tous ceux du laboratoire dont l'intérêt et les encouragements m'ont été d'un grand soutien.

Je dois également beaucoup à la réflexion, aux conseils ainsi qu'aux remarques sans concession de Monsieur Pierre Gentelle qui a bien voulu porter sur ce travail le regard d'un géographe archéologue, grâce auquel la géographie liée à l'histoire des civilisations s'est éclairée pour moi d'un jour nouveau.

C'est en 1985 à l'Unité de Télédétection (Laboratoire d'Informatique Appliquée) de l'Institut Français de Recherche pour le Développement en Coopération (ORSTOM), que je faisais mes premières armes en télédétection. Cette thèse doit sa réalisation aux conditions de travail idéales que j'y rencontrai. Mes plus sincères remerciements vont à Monsieur Jean Pouget directeur encore en 1991, qui m'y a chaleureusement accueillie et à toujours manifesté un intérêt bienveillant pour mes recherches. Ses conseils et ses encouragements ont été pour moi le plus vif des stimulants. Je le remercie également d'avoir bien voulu accepter d'être présent dans mon jury.

Les recherches que je menai entraient dans le Programme Scientifique "Zones Sensibles au Sahel" développé par le Département "Milieux et Activités Agricoles" de l'ORSTOM. Avec beaucoup de gentillesse et de disponibilité Madame Yveline Poncet, responsable de ce programme, a toujours manifesté son intérêt pour mon travail. Le soutien matériel qu'elle m'a accordé tant pour effectuer des missions de terrain que pour l'achat des images ou pour la participation à des colloques, m'a permis de mener à bien dans les meilleures conditions possibles ce travail. Qu'elle veuille bien trouver ici mes remerciements les plus sincères. Je les adresse également à Madame Catherine Mering, laquelle a été mon guide sur les voies de l'analyse d'image en me permettant de me familiariser avec un ensemble de méthodes encore peu utilisées. Elle a été pour moi une aide précieuse dans le maniement des méthodes et des

procédures. Monsieur Haja Andrianasolo à son tour m'a fait partager son expérience en matière d'analyse des données. Il a beaucoup contribué à la préparation méthodologique de ce travail en me permettant d'accéder à des logiciels qu'il a élaboré. Qu'il en soit ici remercié.

Madame Annick Aing a tout au long de ces années avec toujours le même soin et beaucoup de disponibilité réalisé les travaux photographiques indispensables notamment aux phases d'analyse des résultats ou de terrain. Pour son amitié et son soutien moral dans les moments difficiles je tiens à lui exprimer mes plus vifs remerciements. Madame Liliane Zuretti a partagé avec moi les heures éprouvantes de la mise en page de cette thèse. Sa gentillesse et son calme dans l'adversité m'ont été d'un grand secours. Mes remerciements vont aussi à Marie Thérèse D'Hier responsable de la Documentation, à Nicole Zerbib ainsi qu'à Sandrine Vallat, Jean-Michel Eberhard, Christine Triboulet, Nittaya Nintarakit, José Madeira pour leur soutien amical.

Je suis également très heureuse d'exprimer tous mes remerciements aux personnes ou aux organismes suivants, qui à quelque moment ont été pour moi des rencontres souvent décisives et toujours bénéfiques dans ce long parcours :

Monsieur Fernand Verger, qui s'est tenu au courant de l'avancement de mon travail, m'a encouragée, et à bien voulu participer à mon jury.

Madame Marie-Françoise Courel qui, en 1990 acceptait de découvrir avec moi un désert peu connu, le Cholistan. C'est avec beaucoup de générosité qu'elle me faisait partager son expérience, et ses conseils et son soutien amical ont été un grand réconfort.

Monsieur Jean-François Jarrige, qui a accepté de lire cette thèse et de participer à mon jury.

Tous ceux qui ont bien voulu me consacrer de leur temps pour m'éclairer et dont les enseignements m'ont été précieux dans les phases d'incertitude que j'ai pu traverser. Je pense tout particulièrement à Monsieur Roger Coque, à Monsieur Roland Mussot et à Monsieur Philippe Chamard.

La Mission Archéologique Française en Inde (MAFI) devenue le Centre de Sciences Humaines qui fut à New Delhi le port d'attache accueillant de mes séjours en Inde. J'y fus reçue très amicalement par Christine Pariselle.

Olivier Guillaume, directeur du CSH, Gerdi Gersheimer et Madame Bhalla qui ont tout mis en oeuvre pour organiser et faciliter nos missions.

Celles-ci ont été rendues possibles grâce à la collaboration de l'Archaeological Survey of India dirigée par J. P. Joshi.

Messieurs Sinha et Sharma qui nous ont accompagnés sur le terrain.

Monsieur Rahmat Ali qui a organisé notre mission au Pakistan.

Pour terminer, je n'aurais garde d'oublier qu'au long de ces années j'avais à mes côtés des amis qui par leur sympathie et leur affection m'ont apporté un soutien moral inappréciable : Emmanuèle Gautier, François Costard, Guillaume Pierre, Emmanuelle Defive, Christine Jacqueminet, Denis Blamont.

A mes parents, à ma soeur, enfin, qui ont partagé avec moi les moments d'enthousiasme ou d'inquiétude, je voudrais exprimer mon profond attachement en retour de leur générosité, de leur soutien inconditionnel, et du réconfort qu'ils ont toujours su m'apporter.

Sommaire

INTRODUCTION

CHAPITRE I : LE CADRE ET LA PROBLEMATIQUE

1. UN TRAIT ESSENTIEL : L'ARIDITE
2. LES TRACES DE L'OCCUPATION HUMAINE ANCIENNE
3. LA QUESTION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES
4. LA QUESTION DE L'HYDROGRAPHIE
5. CULTURE PLUVIALE OU IRRIGUEE ?

CHAPITRE II : QUESTIONS, DEMARCHE, METHODES ET TECHNIQUES

1. DES QUESTIONS RESTEES SANS REPONSE
2. DES CONTRAINTES ET UNE DEMARCHE SPECIFIQUE
3. DES METHODES POUR UNE APPROCHE GLOBALE
4. PROCEDURES ET TECHNIQUES

CHAPITRE III : DES UNITES RADIOMETRIQUES AUX PALEOENVIRONNEMENTS

1. A L'OUEST : LA PLAINE ALLUVIALE DE LA HAKRA ENTRE FORT ABBAS ET KHANPUR
2. A L'EST : LA PLAINE ALLUVIALE DE LA CHAUTANG ENTRE BHADRA ET BHIWANI
3. CONCLUSION

CHAPITRE IV : OCCUPATION HUMAINE ANCIENNE ET PALEOENVIRONNEMENTS

1. L'OCCUPATION HUMAINE ANCIENNE DANS LA PLAINE DE LA CHAUTANG ENTRE BHADRA ET BHIWANI
2. L'OCCUPATION HUMAINE ANCIENNE DANS LA PLAINE DE LA HAKRA ENTRE FORT ABBAS ET KHANPUR

CONCLUSION

ANNEXE

BIBLIOGRAPHIE

TABLES

Introduction

Souvent marquées dans leurs composantes physiques par les héritages morphoclimatiques du Quaternaire -paléovallées, paléochenaux plus ou moins effacés, plaines d'épandage-, les marges septentrionales du désert de Thar au nord-ouest du sous-continent indo-pakistanaï ont gardé dans leurs paysages de nombreux vestiges laissés par les phases successives d'occupation humaine : anciens villages ou habitations isolées, anciens canaux d'irrigation.

Ce sont eux qui font l'objet de notre étude, et non pas l'occupation actuelle du territoire. Il s'agit donc de géographie historique, ou, si l'on préfère, de l'étude géographique de vestiges archéologiques. Cette géographie, tout en incluant la géo-archéologie, qui privilégie les relations entre milieu naturel et vestiges archéologiques la dépasse car elle cherche en outre à comprendre les paysages du passé, c'est-à-dire à rendre leur place à l'ensemble des techniques (de production, d'encadrement) par lesquelles les sociétés des époques successives ont modelé leurs paysages, dont nous ne trouvons plus que des restes partiels.

L'outil qui a été retenu pour mener à bien cette analyse est l'image de satellite. Synoptique, globale, parce qu'elle représente -à diverses échelles- un ensemble de phénomènes, d'objet ou de relations, un état de ce qui est inscrit, présent à la surface de la Terre, elle est susceptible d'apporter des données de nature nouvelle sur des problèmes non résolus : les relations que les populations ont entretenues avec le milieu dans lequel elles se sont installées, aux différentes époques identifiées par l'analyse archéologique.

Cette question impliquait une démarche globale prenant en compte la complexité du phénomène étudié. Il était nécessaire d'établir une typologie des milieux où se trouvaient les sites, dans un espace de quelques milliers de kilomètres carrés, permettant de comparer la localisation de vestiges pouvant se trouver éloignés de plus de 150 km. L'image de satellite est apparue comme la seule source d'information possible répondant à ces contraintes.

Deux secteurs d'étude ont particulièrement retenu notre attention au sein de ce vaste ensemble qui couvre d'est en ouest environ 500 km. Le Cholistan au Pendjab pakistanaï (Fig. 1) dans le district de Bahawalpur, entre Fort Abbas à la frontière indo-pakistanaïse

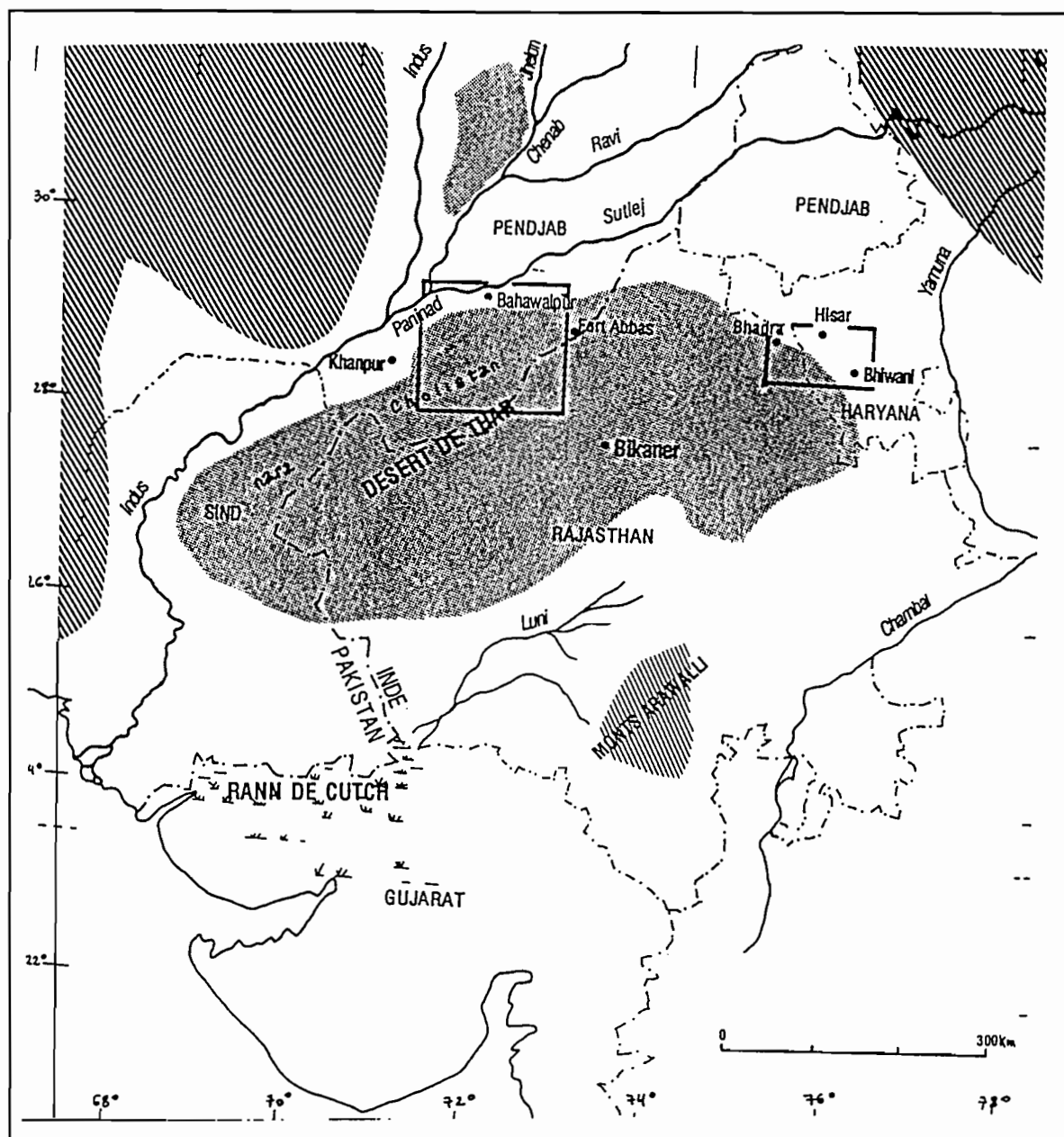


Fig. 1 : Deux secteurs d'étude au marges du désert de Thar

et Khanpur, constitue la marge nord-occidentale du désert, limitée au nord par la plaine d'inondation du Sutlej, rivière himalayenne affluent de l'Indus, à l'ouest par les hautes dunes du Thar. Dans cet espace parcouru par des paléochenaux identifiés comme la vallée asséchée de la Hakra, hors de portée du réseau de canaux d'irrigation pérennes qui prend son eau dans le Sutlej, et actuellement occupé seulement par des populations nomades, quelque quatre cents sites archéologiques, traces d'une occupation sédentaire et temporaire, ont été recensés au cours de diverses expéditions. Celle que dirigea M. R. Mughal, la plus récente (1974-1977), fut aussi la plus systématique. Datés pour les plus anciens du IV^e millénaire avant notre ère, les sites archéologiques recensés représentent les différents stades de développement de la civilisation de l'Indus (III^e- II^e millénaire avant J.-C.) tels qu'ils ont été périodisés par les archéologues.

Aux confins de l'Haryana et du Rajasthan, l'espace situé au sein du triangle formé par les trois villes actuelles de Hisar au nord, de Bhadra à l'ouest, et de Bhiwani au sud-est (Fig. 1) a été étudié par la Mission Archéologique Française en Inde sous la direction d'H.-P. Francfort en collaboration avec l'*Archaeological Survey of India*. Dans cette région également des vestiges d'occupation remontant à la protohistoire ont été identifiés, d'autres ont été datés de la période historique ancienne (I^{er}-VIII^e s.) et de la période médiévale (VIII^e-XVIII^e s.). Des traces de mise en valeur par l'irrigation remontant au Moyen-Âge y ont été mises en évidence. Ce secteur est traversé par la paléovallée dite de la Chautang, qui n'est plus actuellement qu'une dépression presque entièrement comblée. A la différence du Cholistan, où les sites sont hors des périmètres actuellement irrigables, où les espaces autrefois cultivés et habités sont aujourd'hui désertés, les sites sont en Haryana répartis à l'intérieur d'une plaine irriguée, donc densément cultivée et peuplée.

Ainsi, au Cholistan, comme en Haryana, la localisation des sites archéologiques, sites qui témoignent d'une occupation reposant sur l'agriculture, pose plusieurs problèmes emboîtés. Dans la plaine de la Chautang, les sites constituent des "anomalies" dans un paysage actuel créé par la mise en place d'un réseau d'irrigation pérenne qui ne remonte qu'à la seconde moitié du XIX^e siècle. Comme dans celle de la Hakra, la densité des installations apparaît sans commune mesure avec les ressources en eau actuellement disponibles. Dans un milieu caractérisé par des conditions climatiques semi-arides et arides, l'eau peut être en effet considérée comme un facteur déterminant pour l'agriculture. Celle fournie par les pluies n'est pas tous les ans suffisante pour porter à maturité les récoltes. Le problème se pose en particulier pour l'alimentation en eau des cultures d'hiver qui ne peuvent bénéficier que de maigres apports et qui constituaient néanmoins la base de l'économie agricole de la civilisation de l'Indus.

Ce problème fut soulevé dès la fin du siècle dernier par un certain nombre d'observateurs, géographes, archéologues, hydrologues, géologues, paléobotanistes notamment, qui tous s'efforcèrent de faire coïncider dans le temps la dynamique de l'occupation humaine marquée par des périodes d'occupation et des périodes de désertion, et la dynamique du milieu physique. L'eau étant considérée comme un facteur déterminant, les événements de l'histoire du milieu correspondaient à des périodes climatiquement plus ou moins humides, ou/et à des périodes de fonctionnement ou d'assèchement des rivières dont les traces avaient été repérées ponctuellement au sol ou sur les images satellitaires. La validité de leurs reconstructions fut remise en cause par des études géologiques récentes (Courty, 1990) et l'établissement d'une chronologie des événements hydrographiques plus fiable. Le cadre physique des actions humaines se trouvait ainsi dessiné mais à une échelle temporelle qui ne permettait pas d'induire les relations passées entretenues entre les populations et l'environnement. L'hypothèse de l'existence d'une irrigation remontant à la protohistoire fut aussi émise pour tenter d'expliquer la logique d'implantation des installations humaines.

La localisation des sites archéologiques, vestiges d'anciens villages, peut être considérée comme un indicateur des interactions passées entre Homme et Milieu. Elle résulte en effet d'un choix qui est une intégration de paramètres sociaux et naturels à une époque donnée. Une étude systématique de la localisation des sites devait donc permettre de confronter à une même échelle spatiale et temporelle et sans les dissocier, événements de l'histoire du peuplement et de l'évolution du milieu physique.

Toujours complexes les interactions entre les sociétés et leur environnement sont soumises à une variabilité particulièrement forte aux marges des déserts, régions de transition entre des milieux qui présentent un ensemble de ressources et de contraintes différentes. Les conditions de l'occupation humaine y sont particulièrement instables parce que les potentialités sont telles qu'elles ne l'excluent pas, sans offrir pour autant la sécurité nécessaire à une économie de subsistance reposant sur l'agriculture. De petites fluctuations d'ordre climatique et hydrologique -une crue inattendue, trop violente, des pluies trop peu abondantes pendant plusieurs années par exemple- peuvent avoir des conséquences dramatiques. Plus que dans les déserts, l'écart par rapport à une situation normale est important, obligeant les sociétés à faire face et à s'adapter rapidement à des situations nouvelles, ou bien à désertir des lieux devenus répulsifs compte tenu de la nature même de leur organisation sociale. L'équilibre peut aussi être rompu du fait de l'occupation humaine notamment dès qu'elle devient trop forte par rapport aux capacités de renouvellement des ressources naturelles. Formes figées d'une occupation ancienne d'un espace donné, les vestiges archéologiques, villages abandonnés, canaux d'irrigation par exemple, témoignent

dans ces milieux de la précarité, de l'instabilité de cette occupation, d'une évolution qui n'est pas linéaire, mais discontinue.

La spécificité de cette recherche impliquait l'élaboration d'une démarche particulière d'utilisation des images. On devait en effet parvenir à discerner au sein d'un état actuel de l'espace, les formes héritées d'états antérieurs. Les structures pérennes qui évoluent sur de longues périodes devaient être mises en évidence et individualisées aux dépens d'états et de formes plus instables. *L'analyse typologique*, démarche classique qui consiste à regrouper des pixels qui se ressemblent le plus selon un critère donné, a été utilisée à cette fin. Cela revenait à trouver également une méthode qui permette de rechercher et de définir les échelles d'observations pertinentes.

Nous avons également fait appel aux principes de *l'analyse d'image*. Parce qu'elle est globale, utilisant l'information contenue dans le voisinage du pixel, elle était adaptée à la mise en évidence des formes qui ne sont pas caractérisées par une signature spectrale spécifique et stable, cas fréquent sinon général des vestiges recherchés, paléo-chenaux ou anciens canaux d'irrigation par exemple. Nous avons donc été amenés à élaborer des procédures pour la mise en évidence et l'extraction des linéaments.

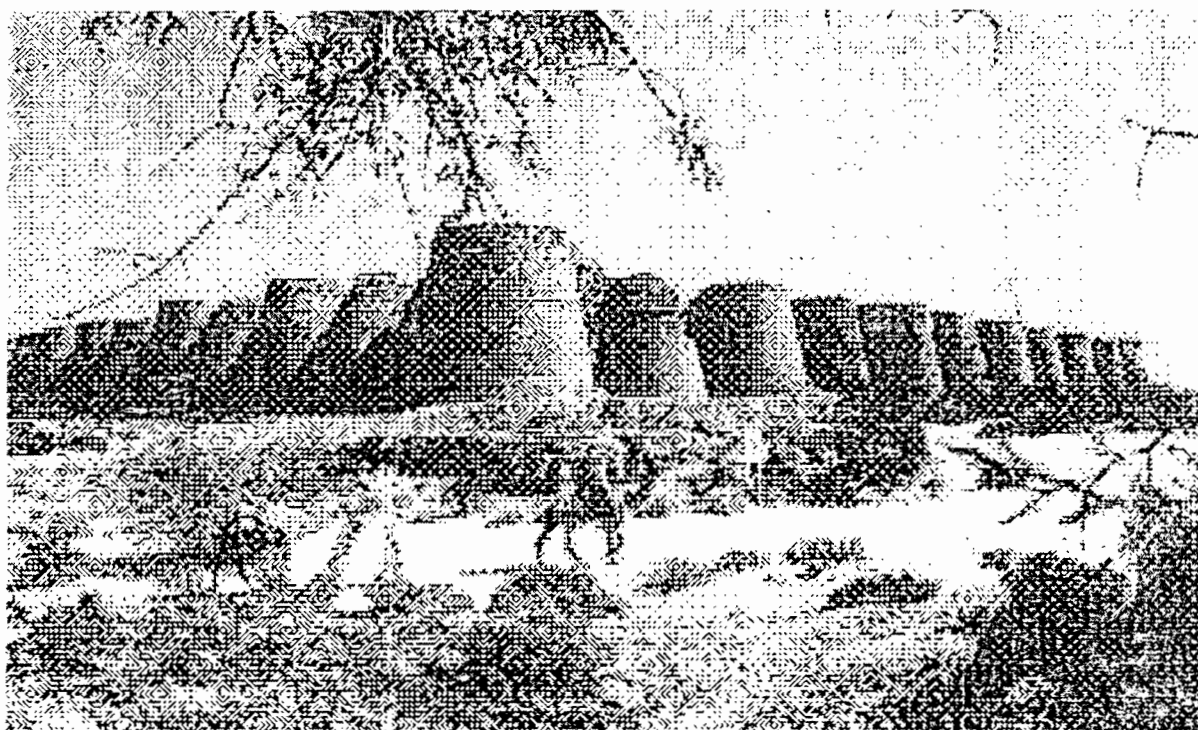
Le traitement des images devait permettre de montrer, de décrire et d'interpréter les indicateurs de la dynamique du milieu physique, puis d'étudier la localisation des sites archéologiques et leur distribution, au sein des unités spectrales ou morphologiques reconnues comme significatives, ou par rapport à elles. Elle devait permettre d'étudier sous un jour nouveau la question, maintes fois débattue mais non résolue, des conditions d'implantation des populations aux époques protohistorique, historique ancienne et médiévale, des raisons possibles de leur maintien dans cette région ou de leur départ.

Avant de faire le point sur les différentes hypothèses émises par ceux qui nous ont précédé, nous nous arrêterons au chapitre I de cet ouvrage, sur les paramètres indispensables à la compréhension des questions posées : les traits essentiels -climatiques en particulier- du milieu actuel et de l'occupation humaine ancienne à travers les empreintes qu'elle a laissées.

Nous exposerons au chapitre II la démarche envisagée, les méthodes et le détail des procédures utilisées pour la mise en évidence des paléoformes et des paléo-unités de paysage, ainsi que pour la superposition des données archéologiques aux données-images.

Les résultats obtenus seront développés au chapitre III : les images traitées, nouvelles représentations de l'espace étudié, conçues pour répondre à des questions précises seront décrites et interprétées à l'aide des données-images et de connaissances extrinsèques.

C'est dans un quatrième et dernier chapitre que nous tenterons de tirer de la superposition des sites aux unités précédemment individualisées des enseignements sur les interactions possibles, aux différentes périodes considérées, entre occupation humaine ancienne et paléoenvironnements.



Chapitre I

LE CADRE ET LA PROBLEMATIQUE

1. UN TRAIT ESSENTIEL : L'ARIDITE

Que l'on considère les formules fondées sur les précipitations et la température, comme l'indice d'aridité d'E. de Martonne (1926, 1935) ou le quotient pluviométrique de L. Emberger (1930), celles qui ont recours à l'évaporation ou à l'évapotranspiration, comme la méthode plus complexe de C. W. Thornthwaite (1931), l'ensemble de la région concernée par les problèmes posés apparaît comme aride.

Le tracé des limites entre ce que certains auteurs appellent l'hyper-aride, l'aride, le semi-aride, et d'autres le désertique, le subdésertique, ou encore, le "vrai désert" et "la steppe", varient en revanche selon les formules appliquées, comme le montrent les figures 2 à 5.

Selon W. Köppen (1936), l'ensemble de la région appartient au domaine désertique, l'aride vrai (BW) ; seule la partie orientale du Rajasthan, située à l'est de Jodhpur, appartient à celui de la steppe (BS) (Fig. 2). Les limites définies à partir de la formule de Thornthwaite sont assez comparables, celle (-40) entre l'aridité et la semi-aridité passant à l'est de Jodhpur. Les régions de la moyenne et basse vallée de l'Indus pourraient être cependant classées dans un domaine à aridité plus marquée (Multan : - 45, Bahawalpur : - 50) (Fig. 3). Selon E. de Martonne, seule la région située à l'ouest de Jaisalmer, le sud du Pakistan, le Cholistan et le Pendjab, seraient arides. Le Rajasthan jusqu'à Jodhpur serait seulement semi-aride et les régions plus orientales, subhumides (Fig. 4). Si l'on se fonde enfin enfin sur l'indice xérothermique de Gaussen et Bagnouls (1952), seules les stations pakistanaïses de la basse et moyenne vallée de l'Indus appartiennent, avec douze mois secs, au climat désertique (X6). Quant au Rajasthan dans sa totalité et à l'Etat d'Haryana, qui connaissent entre neuf et onze mois secs, ils appartiennent au climat sub-désertique (Fig. 5).

Sans chercher à choisir parmi ces différents découpages, élaborés à partir de formules qui ne peuvent que partiellement rendre compte de la complexité d'un phénomène résultant d'une combinaison de facteurs indissociables, on se bornera à remarquer, à cette échelle, l'existence de deux "régions climatiques", la plus occidentale (le Cholistan) étant la plus sèche. C'est par l'analyse des principaux paramètres que sont la pluviométrie d'une part, les températures, l'humidité relative et les vents, d'autre part, que nous tenterons, après un bref rappel des données disponibles, de dégager leurs caractères essentiels.

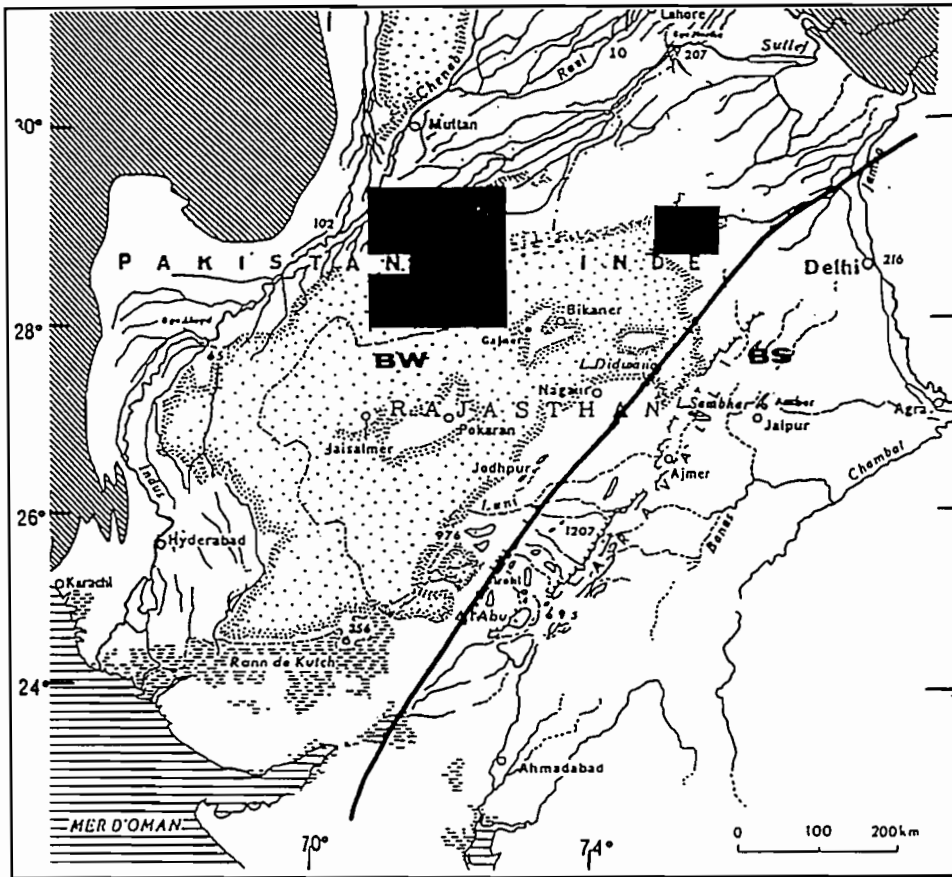


Fig. 2 : La limite entre le désert (BW) et la steppe (BS) selon W. Köppen

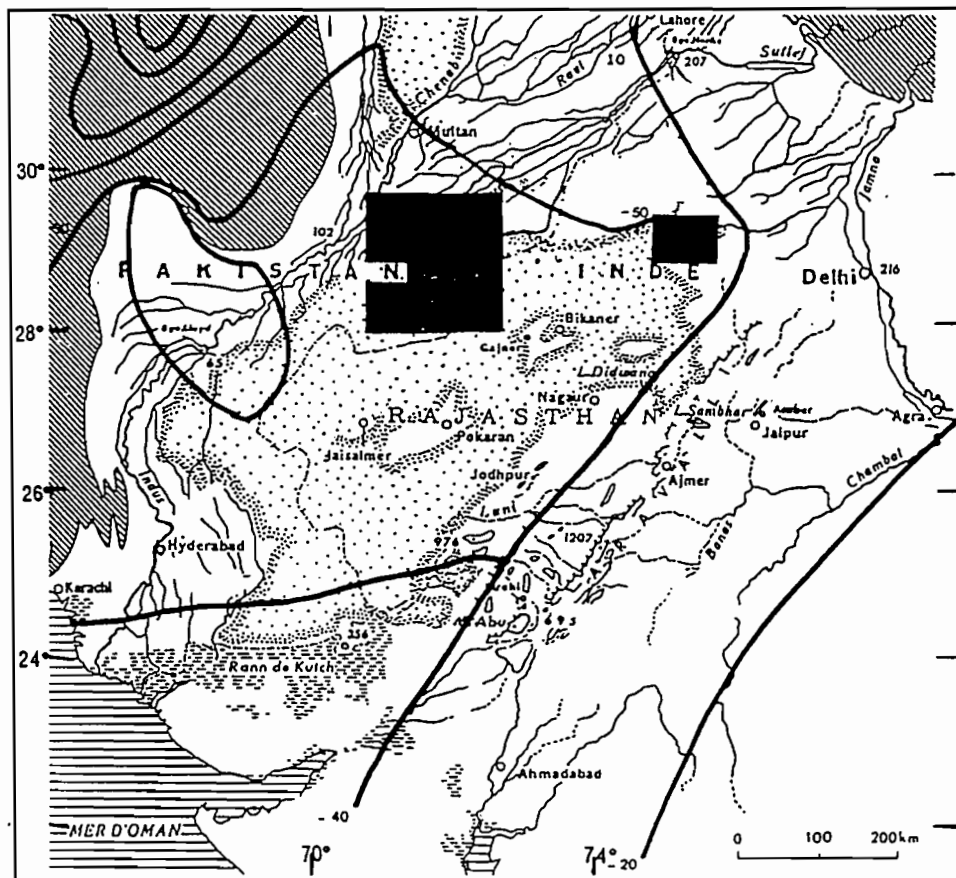


Fig. 3 : La limite (-40) entre le domaine aride et le semi-aride selon la formule de Thornthwaite

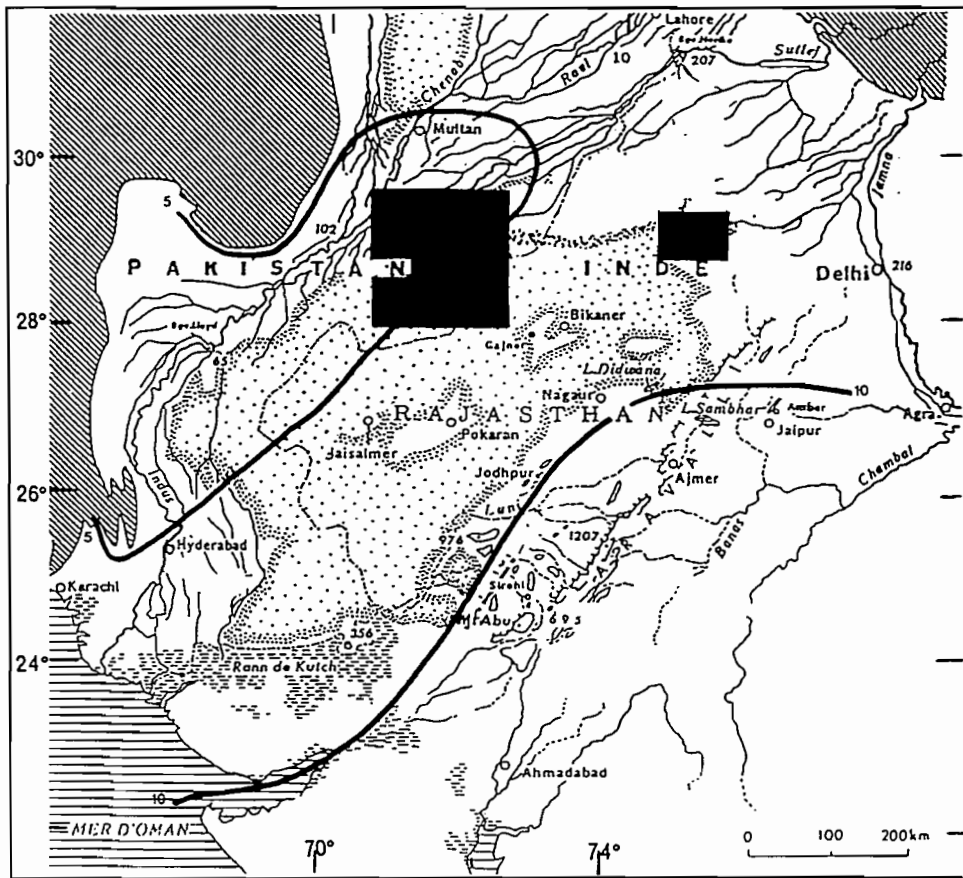


Fig. 4 : La limite (5) entre le domaine aride et le semi-aride selon la formule d'E. de Martonne

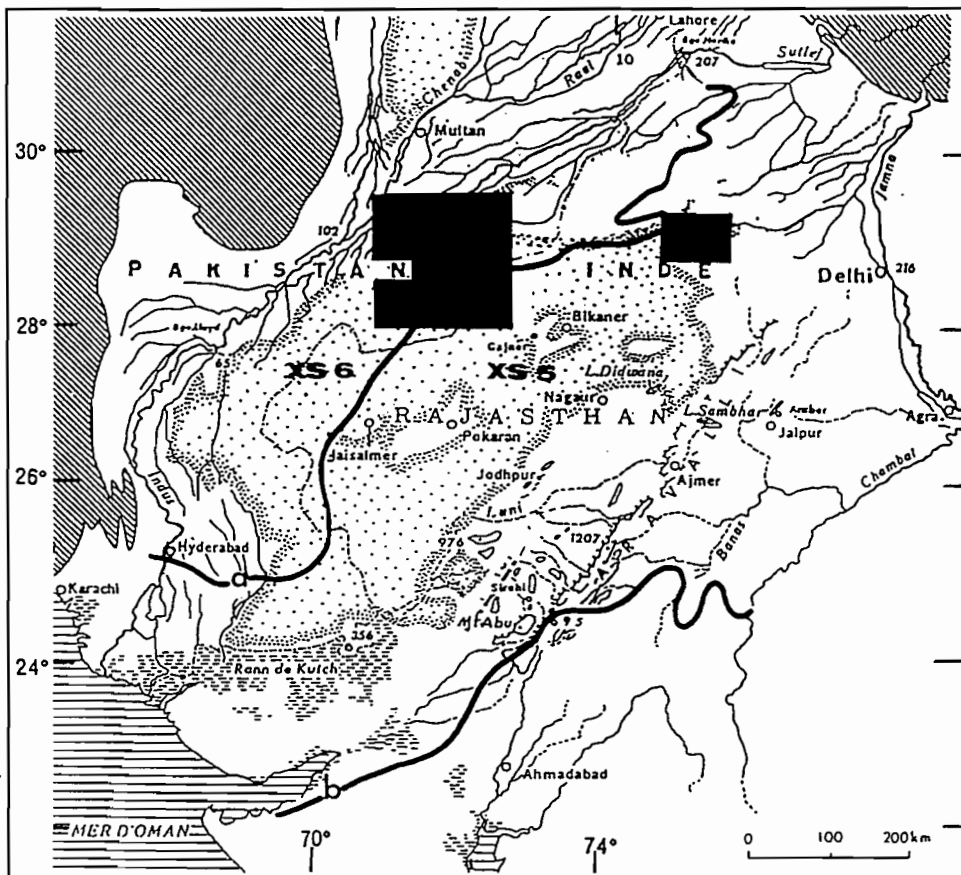


Fig. 5 : La limite entre les domaines désertique (XS6) et subdésertique (XS5) selon l'indice xérothermique de Gaussen et Bagnouls

1.1. La médiocrité des précipitations : causes et modalités

L'insuffisance des précipitations et l'irrégularité du régime des pluies d'une part, de fortes températures, des vents prolongés et l'évaporation intense qui en résulte d'autre part, sont à l'origine de déficits hydriques importants.

1.1.1. Les mécanismes climatiques

Les explications générales de la mousson ont été discutées par de nombreux auteurs (Pédelaborde, 1970 ; Chang, 1967 etc.). Parmi les facteurs étudiés, les pluies et les mécanismes de pluviogenèse sont les plus pertinents.

On reconnaît généralement dans le nord-ouest du sous-continent indo-pakistanaï, deux saisons principales bien marquées. L'hiver, assez frais, s'étend de décembre à mars et s'oppose nettement à l'été, qui commence en juin, se prolonge jusqu'en septembre et durant lequel souffle la mousson humide. Les mois d'avril et de mai, qui précèdent l'arrivée des pluies et connaissent une chaleur torride, d'une part, les mois d'octobre à décembre qui les suivent, d'autre part, peuvent être considérés comme des saisons intermédiaires.

Plus que les températures, rarement froides ou basses, les pluies, leur quantité, leur durée, leur répartition dans l'année constituent un critère essentiel de différenciation des espaces. Selon ce seul critère, l'année pourrait être divisée en trois périodes de pluviométrie croissante :

- octobre à décembre,
- janvier à mai,
- juin à septembre.

• L'hiver, une saison fraîche et peu arrosée

En hiver, l'Inde est envahie par un courant atmosphérique de secteur ouest (considérablement renforcé en altitude dans le nord de l'Inde), et se déplaçant vers le sud où il prend une courbure anticyclonique un peu au sud du Tropique, vers Bombay (Fig. 6).

Il est à noter que le flux de secteur nord, lié aux hautes pressions continentales d'Asie, particulièrement froid, est bloqué par la masse himalayenne, et ne pénètre donc pas en Inde où les froids ne sont jamais très rigoureux.

Le nord-ouest du sous-continent peut être affecté par des perturbations d'ouest, liées à la position du jet stream, installé depuis la mi-octobre au sud des chaînes himalayennes. Elles appartiennent au système des basses pressions d'origine méditerranéenne ou atlantique qui se déplacent vers l'est, apportant quelques pluies. Mais, peu fréquentes -on en compte en moyenne moins de cinq par mois, de janvier à avril- irrégulières, et d'une

activité modérée sur une faible durée (trois ou quatre jours) (Pédélaborde, 1970), ces ondes d'ouest, les *westerly waves*, n'apportent des pluies abondantes qu'au nord du 25^e parallèle et dans l'extrême nord du sous-continent, la région de Peshawar notamment (*North West Frontier Province*).

C'est pourquoi les précipitations, que certains auteurs qualifient de mousson d'hiver, décroissent rapidement du nord au sud et d'ouest en est, dépassent rarement 85° de longitude E., et sont finalement assez faibles sur le Pendjab et l'Haryana.

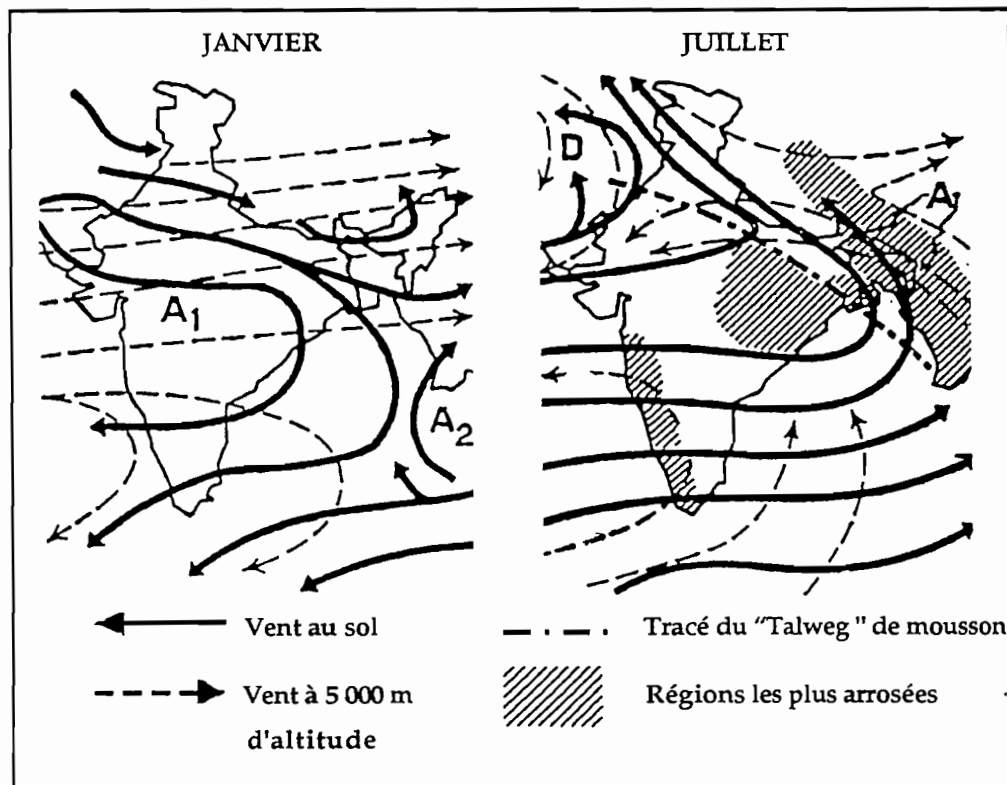


Fig. 6 : Régime des vents (Durand-Dastès, 1965)

• La saison des pluies

Alors que les régions situées au sud sont parcourues par des vents d'ouest à sud-ouest, ils sont de secteur est et sud-est dans le nord de la péninsule, ce qui représente un renversement radical du régime des vents par rapport à l'hiver. A 5000 m d'altitude, la mousson est coiffée dans le nord-ouest du sous-continent, par un air d'origine continentale, non seulement sec, mais aussi subsident, qui bloque le mécanisme des pluies. En cela, l'aridité du désert du Thar peut être qualifiée de zonale. Le désert et ses marges se trouvent toujours en position d'abri par rapport à "des éléments perturbateurs" tels que le relief, dont les effets se font sentir de façon très marquée sur les pentes himalayennes et le piémont, et les perturbations atmosphériques, "circulations cycloniques mobiles qui en général naissent dans la Baie du Bengale, se déplacent vers le Nord-Ouest, entraînant à leur suite une bande pluvieuse" et troublent l'écoulement de la mousson (Durand-Dastès, 1961).

L'air qui est entraîné dans la rotation cyclonique n'est généralement pas très humide. Il vient de l'ouest, mais d'Arabie plutôt que de l'océan indien, ou de l'est, mais il arrive très appauvri sur le Pendjab, après un long parcours sur la péninsule et la plaine du Gange.

- **Avant et après la mousson : chaleur et sécheresse**

La saison chaude de mars à mai, comme l'automne d'octobre à novembre, sont des saisons de transition qui conservent les caractéristiques atmosphériques des périodes précédentes, l'hiver et la mousson, et durant lesquelles s'amorcent les bouleversements caractéristiques des saisons suivantes (Durand-Dastès, 1965).

A l'abri des perturbations qui accompagnent ailleurs dans le nord-ouest de l'Inde, les vents de mousson, à l'abri des ondes d'ouest qui le traversent en hiver, le désert de Thar et ses marges connaissent des déficits hydriques importants. Ces conditions, exprimées par les données climatiques, sont encore aggravées par l'irrégularité du régime des pluies, irrégularité spatiale et temporelle.

1.1.2. Hauteur et régime des précipitations

Les déficits hydriques s'expriment différemment selon les lieux.

1.1.2.1. Les données climatiques

Le service international de la Météorologie Nationale à Paris (O.M.M.) dispose des normales climatologiques relatives à deux stations seulement : Bikaner, dans l'Etat du Rajasthan en Inde et Multan au Pendjab pakistanais, et ce pour une période de trente ans (1931-1960) pour les précipitations, et vingt ans (1941-60) pour les températures. Le désert du Cholistan est totalement dépourvu de stations météorologiques. Les données disponibles ne concernent que ses marges septentrionales et occidentales, c'est-à-dire la basse vallée de l'Indus et du Sutlej. Auprès du *Pakistan Council of Research in Water Ressources*, à Bahawalpur, nous avons obtenu des données concernant les trois stations de Bahawalpur, Fort Abbas et Khanpur, mais si les moyennes ont été établies pour des périodes d'une durée voisine, -respectivement 30 ans, 25 ans, 32 ans- les dates d'enregistrement, en revanche, ne sont pas connues.

Nous ne disposons pas, hormis quelques totaux pluviométriques annuels recueillis dans des ouvrages généraux, de données récentes relatives aux stations indiennes. Fort heureusement, les gazetteers ¹ constituent cependant, pour la période allant de 1879 à 1931, une source

¹ Entre recensement et chronique, les gazetteers, publiés pendant la période coloniale, fournissent sur les Etats et Districts de l'Inde des informations sur l'économie (agriculture, artisanat, industrie), l'irrigation, l'histoire, la démographie, les villes, notamment.

d'information non négligeable. Il fournissent en effet, pour un grand nombre de stations, provinciales et locales, les totaux pluviométriques annuels et les moyennes annuelles des températures.

Au total, vingt-sept stations, réparties dans les Etats du Rajasthan et d'Haryana en Inde, du Pendjab au Pakistan, ont été prises en considération (Fig. 7, Tabl. 1).

Tabl. 1 : Les données climatiques : stations (d'W. en E.) et sources

PAYS	ETAT / PROVINCE	STATION	SOURCES
INDE	HARYANA	Gohana Rohtak Bhiwani Hansi Tohana Hisar Budhalada Fatehabad Sirsa	Gazetteers, 1936: -Hisar: 1890-1931 -Rothak: 1890-1931 Allchin, Goudie, 1978 : 30 ans
	RAJASTHAN	Jaipur Sambhar Ajmer Didwana Nagaur Bikaner Jodhpur Jaisalmer	Gazetteers, 1908 -Rajputana: 1879-1905 Allchin, Goudie, 1978 : 30 ans OMM, 1970 : 1931-1960/1941-1960
PAKISTAN	PENDJAB	Minchinabad Bahawalnagar Fort Abbas Khairpur Bahawalpur Ahmadpur East Multan Allahabad Khanpur Ahmadpur Lamma	Meteorological Centre, Lahore, 1986: 32,30,25ans Gazetteers, 1913 -Bahawalpur, 1900-07

1.1.2.2. La répartition spatiale des pluies

• Les totaux pluviométriques annuels

La mousson parvenant sur l'Haryana, le Pendjab et le sud du Pakistan, moins convergente, moins épaisse ou plus sèche, ces trois caractères se combinant de façon variable, les totaux pluviométriques annuels décroissent rapidement et de façon sensible d'est en ouest (Fig. 7). Avec en moyenne un peu plus de 400 mm de pluies par an, la région de Hisar est ainsi deux fois et demi plus arrosée que celle de Bahawalpur, qui n'en reçoit que 160 mm (Tabl. 1A.¹). La pluviométrie décroît selon un gradient relativement régulier et assez rapide.

¹ Les tableaux référencés "A" sont en annexe.

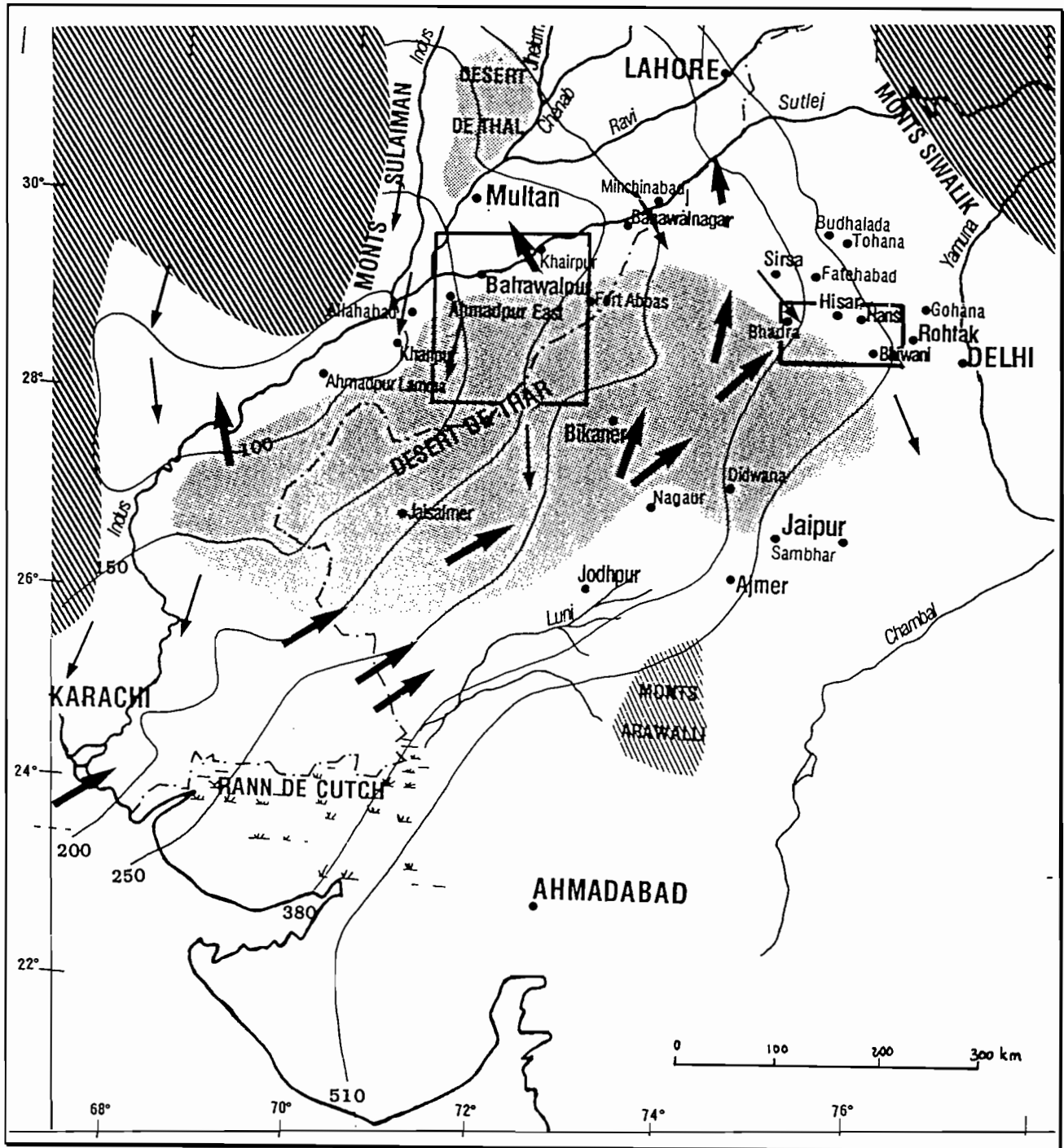
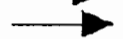


Fig. 7 : Les données climatiques : les stations étudiées, précipitations annuelles (d'après Seth, 1978), la direction des vents

 vents d'été
 vents d'hiver

Gohana, station la plus orientale, reçoit en moyenne 563 mm par an ; Sirsa, situé à 170 km à l'ouest, 313 mm. Les stations les plus sèches sont situées à l'ouest, le long de la basse vallée de l'Indus et du Sutlej, au Pendjab pakistanais où l'on observe également une décroissance des précipitations du nord au sud : ainsi, Minchinabad reçoit en moyenne 294 mm, Fort Abbas, bien que plus orientale, 194 mm, enfin Khanpur, dans le sud-ouest de la région, seulement 120 mm par an.

Dans le Rajasthan, du fait de l'influence des monts Arawalli, les pluies qui varient de 150 à 600 mm, traduisent un gradient différent : du sud-est au nord-ouest dans la partie méridionale et d'est en ouest dans la partie nord.

Nous savons cependant que les totaux pluviométriques annuels ne sont pas parmi les paramètres climatiques les plus représentatifs, ni les plus significatifs. La répartition saisonnière et mensuelle, la variabilité interannuelle des précipitations, le nombre d'années sèches, l'efficacité des précipitations "utiles" dans un sens très large, sont autant de facteurs qui influent également sur les modalités de l'occupation humaine, sur la végétation, le milieu en général.

- **La répartition moyenne saisonnière des précipitations**

Les pluies d'été représentent environ 80% des précipitations totales annuelles pour toutes les stations situées dans l'Etat d'Haryana. La proportion est encore supérieure, 80 à 90% à Bikaner et à Jodhpur. Elle est en revanche inférieure, 60 à 80%, pour les stations pakistanaises de la vallée de l'Indus, ce, au profit des précipitations d'hiver. *L'automne*, qui suit la mousson, est partout la saison proportionnellement la moins pluvieuse. Aucune station ne reçoit durant cette période plus de 6% de ses précipitations annuelles. Le pourcentage est plus important, 6 % à l'est, à Hansi, qu'au sud-ouest, 1,7% à Khanpur. *La part des pluies d'hiver* est au contraire supérieure à l'ouest. Elles représentent plus de 20% des précipitations annuelles dans les quatre stations situées le long de la vallée de l'Indus et seulement entre 12 et 16 % au Rajasthan et en Haryana. Mais en valeur absolue, la quantité des précipitations décroît en toutes saisons d'est en ouest. La région de Hisar reçoit en moyenne plus de 340 mm en été, c'est-à-dire davantage que les stations centrales de Bikaner et de Jodhpur (270 mm) et trois fois plus que la région de Bahawalpur (110 mm environ). Dans l'ensemble, il serait pourtant abusif de parler d'une véritable "saison des pluies". A la mi-juillet, les nuages annonciateurs de la mousson commencent à apparaître et le taux d'humidité de l'air augmente rapidement. Enfin, un orage éclate annonçant l'arrivée des pluies, mais celles-ci ne tombent pas de façon continue : quelques grosses averses fournissent en quelques heures la quasi-totalité des pluies d'été quand les nuages ne se dissipent pas, phénomène fréquent dans le désert du Cholistan, comme le souligne un proverbe indien selon lequel, lorsque la pluie arrive sur Bahawalpur, elle se transforme en bourrasques (Gazetteers, Bahawalpur, 1908).

L'automne qui suit la mousson, est partout la saison la plus sèche. On enregistre moins de 25 mm durant ces trois mois à l'est, moins de 10 mm à l'ouest. Bien qu'en proportion des pluies totales, les pluies d'hiver soient supérieures au Pendjab pakistanais à ce qu'elles sont en Haryana, en quantité absolue elles sont presque deux fois inférieures, ce qui met bien en évidence la situation d'abri du désert de Thar par rapport aux perturbations d'ouest (Tabl. 2A).

- **La répartition moyenne mensuelle des précipitations**

Considérant la répartition mensuelle des précipitations (Tabl. 3A. a, b et 4A.), on remarque que les pluies d'été sont essentiellement concentrées sur les deux mois de juillet et d'août (70 à 90 %) et qu'il pleut davantage en septembre qu'en juin. Khanpur, avec des pluies d'été presque également réparties sur les mois de juin, juillet et août et des pluies de septembre très faibles, fait exception. Parmi les trois mois d'automne, octobre et novembre sont les mois les moins arrosés. On compte enfin, un ou deux maxima secondaires durant l'hiver.

1.1.2.3. La variabilité des pluies dans le temps

- **Une "contrainte" : la variabilité intra-annuelle ou mensuelle des pluies**

Les variations de la répartition des pluies au cours de l'année sont fréquentes et peuvent avoir des conséquences parfois dramatiques. Plus que les pluies et leur quantité, c'est le moment de l'année où elles tombent qui est important dans une région où une part essentielle des ressources repose sur l'agriculture.

Misra (1962), dans une étude de la répartition mensuelle des pluies dans le district de Mathura (Rajasthan oriental) pour les années 1921 et 1950, illustre bien ce fait. Il n'a pas plu en janvier 1950, quand un apport d'eau était nécessaire pour la germination des cultures *rabi*, mais il a plu en mai lorsqu'elles étaient arrivées à maturation, ce qui endommagea les récoltes. Il n'a pas plu en juin période des semailles, ni en juillet, ce qui empêcha la germination des cultures *kharif*. Il ne plut pas davantage en août. En septembre des abats d'eau considérables ont provoqué des inondations. Il a plu en mars et en mai quand cela n'était plus utile. Et la quantité totale des précipitations est supérieure à celle enregistrée en 1920, qui sur le plan agricole, est cependant considérée comme une bonne année. En ces termes en effet, on ne peut pas dire que le déficit d'un mois soit compensé par l'excès du mois suivant.

Moins il pleut, et plus les pluies sont incertaines. La saison de plus grande incertitude est la plus sèche, l'automne. Les coefficients de variation sont alors supérieurs à 100% pour toutes les stations. Les pluies sur lesquelles les agriculteurs comptent le plus sont dues aux mécanismes de la mousson et tombent en été. Leur variabilité reste cependant importante,

supérieure à 35%, mais elle ne dépasse pas 55%. Les pluies d'hiver enfin, sont un peu plus aléatoires, les taux de variabilité étant supérieurs à 55%.

Dans l'espace, l'augmentation de la variabilité relative n'est pas aussi régulière que la diminution même des pluies ; ainsi, alors que des différences entre le sud du Pakistan et l'Haryana, à l'intérieur de chacune de ces régions, des stations plus arrosées, Gohana par exemple, peuvent avoir un coefficient de variation égal ou supérieur à celui de stations plus sèches comme Sirsa ou Bhiwani.

Considérée mois par mois, la variabilité relative des précipitations est pour les deux stations Hisar et Bahawalpur toujours supérieure à 100%, excepté à Hisar en juin (78%), juillet (59%) et août (82%).

• La variabilité interannuelle

Comme dans toutes les régions sèches, la variabilité interannuelle des précipitations est importante pour l'ensemble des stations étudiées. Ces graves irrégularités peuvent selon Demangeot (1981, p. 37) s'expliquer ici par une situation "en porte-à faux", "sur la marge d'interférence de deux mécanismes générateurs de pluie", puisque "d'une part elle reçoit les éclaboussures atténuées de la mousson d'été, d'autre part elle recueille en hiver quelques cyclones méditerranéens expirants".

La variabilité absolue, qui dépend beaucoup de la durée des observations, augmente avec le total annuel des précipitations. Ainsi l'écart-type que nous avons calculé est de 173 mm à Rothak, 132 mm à Bikaner, 46,5 mm à Bahawalpur (durée d'observation de 11 ans seulement) (Tabl. 1A.). Certaines stations peuvent connaître des années très pluvieuses : Gohana par exemple a reçu 935 mm en 1908, Hisar, 865 mm en 1917. Les minima absolus sont pour toutes les stations d'Haryana excepté Sirsa, supérieurs à 100 mm. Pour les autres stations, ils varient de 37 mm à Khanpur à 76 mm à Minchinabad mais les périodes d'observation y sont inférieures à 11 ans.

La variabilité relative des précipitations, c'est-à-dire l'écart type rapporté à la moyenne tend en revanche à être d'autant plus élevé que la station est faiblement arrosée. Le coefficient de variation calculé varie à l'est, de 28% à 41%. Il est d'environ 55 % à Bikaner et à Jodhpur au Rajasthan occidental, atteignant un maximum de 70% dans le district de Jaisalmer. Il varie de 35 à 115 % au Pendjab pakistanais, mais, calculé pour des périodes très courtes, il est là moins significatif.

Une forme de variabilité essentielle peut s'exprimer dans le nombre d'années sèches et dans la succession des années sèches et des années pluvieuses. Ces brusques variations de la pluviométrie rendent particulièrement précaires les formes de l'élevage et de l'agriculture, en particulier dans les zones où l'irrigation n'est pas pratiquée. Il est

difficile d'établir des cycles, les périodes de retour de ces années exceptionnelles, tant restent complexes et mal connus à cette échelle, les mécanismes des pluies dans ces régions.

Analysant les précipitations au Rajasthan, Jangannathan (1964) a montré que sur quatre-vingt-huit ans, huit années ont connu des pluies très largement supérieures à la normale (>150%) et 8 années des totaux très largement déficitaires (<50%). Ces valeurs sont respectivement de 3 et 4 années au Rajasthan oriental.

Sur trente-deux années, de 1900 à 1931 (Gazetteers, Hisar, 1936), nous avons compté à l'est de la région en moyenne six années sèches¹, entre trois et dix selon les stations (Tabl. 5A., Tabl. 2) et une année en moyenne de sécheresse très marquée. Sur une période de onze ans seulement, 1900 à 1910, la région de Bahawalpur a connu entre zéro et deux années très sèches (Gazetteers, Bahawalpur, 1936). Selon Mughal (1980), le Cholistan aurait souffert durant ces vingt dernières années (périodes non précisées), de sécheresses sévères de trois à sept ans entraînant la destruction du couvert végétal et d'une grande partie du cheptel.

Le nombre d'années pluvieuses -un peu plus de cinq en moyenne dans la région de Hisar, une à deux (sur huit) dans celle de Bahawalpur- entre 1900 et 1931, diffère peu du nombre d'années sèches. Les années de précipitations exceptionnellement abondantes sont en revanche plus nombreuses que les années de sécheresse très accentuée.

Tabl. 2 : Années sèches et années pluvieuses entre 1900 et 1931

00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
																																Gohana
																																Rohtak
																																Bhiwani
																																Hansi
																																Tohana
																																Hisar
																																Budhalada
																																Fatehabad
																																Sirsa
																																Minchinabad
																																Bahawalpur
																																Ahmadpur E.
																																Khanpur

■ Année pluvieuse¹
 ■■ Année sèche¹
 □ Année moyenne

On fera la distinction entre sécheresse et "humidité" locales, c'est-à-dire touchant moins de 50% des stations, et sécheresse et humidité régionales, moins fréquentes, touchant l'ensemble (>75%) de la région. On peut ainsi, à la variabilité des précipitations dans le temps pour un même lieu, ajouter la variabilité des pluies dans l'espace, pour une même période : 1913 est une année exceptionnellement pluvieuse à Sirsa, c'est une année sèche à Hisar, Tohana, Hansi, Rohtak. De même, en 1894-95 par exemple, il est tombé 686 mm à Bhiwani et seulement 406 mm à Hisar distant de 39 km. Dans les Gazetteers, on note qu'il

¹Conventionnellement, nous avons considéré comme "sèches" les années dont le total pluviométrique est inférieur d'un écart-type à la moyenne. Des années de "sécheresse très accentuée" ont été également définies comme recevant des pluies inférieures de 60% à la moyenne. Les années pluvieuses ont été définies selon le même principe.

n'est pas rare qu'une partie d'un village reçoive davantage de pluies que l'autre et ait ainsi de bien meilleures récoltes, ce que les villageois expriment ainsi : "*sometimes only the horn of the cow lies within the rainy zone and other without*" (Gazetteers Rajputana, 1909).

La variabilité relative des précipitations, annuelles, saisonnières, mensuelles, dans le temps comme dans l'espace, résulte en fait en grande partie, à la fois du très faible nombre de jours de pluie et de la forte intensité des précipitations. Le nombre de jours pluvieux ($P > 1$ mm) est de 25,9 à Hisar, 19 à Bikaner, 12, 5 à Jaisalmer, 12 à Multan. Il est supérieur à 30 au Rajasthan méridional (Tabl. 6A.).

Le rapport entre la moyenne annuelle des précipitations et le nombre de jours pluvieux (soit l'intensité moyenne journalière des pluies) montre qu'en moyenne, les abats sont de l'ordre de 14 à 17 mm. Mais toutes les stations peuvent enregistrer des pluies d'une intensité exceptionnelle dans un court laps de temps. Le tableau 8 montre que des pluies de 346 mm sont tombées à Hisar en 24 h, 135,4 mm à Jaisalmer. Jaipur et Jodhpur ont reçu respectivement 50 et 40 mm en une heure. De telles pluies, relativement rares, sont loin d'être bénéfiques et entraînent des inondations considérables.

En résumé, le nombre de jours pluvieux est faible et l'intensité des pluies peut être forte. Il faut donc peu de choses, qu'une de ces averses se produise ou non, pour que le total annuel passe de la normale à un extrême ou à un autre.

1.2. Les termes du déficit hydrique

Le déficit hydrique que connaissent au moins 10 mois de l'année, les régions de Hisar et de Bahawalpur est dû, nous venons de le voir, à l'insuffisance des précipitations, mais aussi à une évaporation intense, la région étant soumise à de fortes températures et parcourue par des vents fréquents et parfois violents.

1.2.1. Les températures : chaleur torride et fraîcheur

La moyenne annuelle des températures est supérieure à 24°C pour les six stations considérées (Tabl. 7A.). Elle augmente vers l'ouest et atteint 27,4°C à Multan, 26,4°C à Khanpur.

La saison chaude de mars à mi-juin s'oppose nettement à l'hiver, d'octobre à février, frais en général, rarement froid. On enregistre également après le maximum de juin, une légère baisse, de 1 à 2°C, avec l'arrivée des pluies de mousson en juillet. Durant la saison chaude, les températures sont partout très hautes, surtout en mai: 31°C en moyenne à Hisar, les maxima moyens atteignant plus de 40°C. (Tabl. 8A.). Extrêmement élevées le jour, 48°C à

Hisar, 49,4°C à Bikaner, les températures diminuent la nuit avec des minima moyens d'environ 24 à 27°C en mai.

La baisse des températures, qui commence à se faire sentir en juillet, se poursuit après la mousson, et les mois de novembre à février peuvent être qualifiés, sinon "d'hiver thermique au sens où nous l'entendons aux latitudes tempérées", du moins de saison "fraîche" (Pagney, 1976). La moyenne mensuelle des mois les plus froids, décembre et janvier, varie de 10,6°C à Hisar à 13,6°C à Bikaner et Khanpur. Les minima journaliers moyens, en particulier en janvier, tombent souvent en dessous de 0°C, -4,4°C à Jaisalmer, -2,3°C à Jodhpur par exemple (Tabl. 9A.).

1.2.2. Les vents

La figure 7 et le tableau 10A. montrent la direction des vents pour les trois stations de Bahawalpur, Fort Abbas et Khanpur au Pakistan : sud-ouest et sud-est pendant l'été et plus généralement de mai à octobre, nord, nord-est, est-nord-est durant les mois d'hiver, de novembre à avril.

Les vents d'été, les *South Westerlies*, sont plus violents que les vents d'hiver. En moyenne, ils dépassent 20 km/h en juillet à Jodhpur (Tabl. 11A.,a/b). Ils atteignent couramment 10 km/heure et peuvent dépasser 50-60 km/heure en mai et juin qui sont les mois les plus chauds, et sont ainsi à l'origine de déficits hydriques importants.

1.2.3. Humidité relative et évaporation

Comme dans l'ensemble des régions sèches, l'humidité relative de l'air est inférieure en moyenne à 70%. Ce faible pourcentage rend encore plus incertains les mécanismes de la pluie et constitue un des facteurs aggravant le phénomène d'irrégularité des précipitations (De Planhol *et al.*, 1970, p.36). L'apport d'humidité par la rosée, toujours bénéfique pour la végétation, peut être important dans les régions orientales -l'apport annuel est de l'ordre de 22,5 mm à Hisar (Courty, 1990, p. 28). Il est négligeable en revanche aux marges des régions arides du Cholistan. La faiblesse de l'humidité relative se traduit également par une intense et rapide évaporation à laquelle sont soumises les eaux superficielles et les eaux qui s'infiltrent dans le sol mais restent près de la surface. Le pouvoir d'évaporation (la tranche d'eau évaporée) peut varier à Hisar de 12 mm par jour en mai et juin à 6,8 mm par jour en décembre et janvier ainsi que durant la saison des pluies (Courty, *ibid.*). L'évapotranspiration potentielle est partout supérieure à 1500 mm par an, 70 mm en janvier, 370 mm en juin (*in* Gentelle, 1985). Le déficit d'humidité dans le sol est donc élevé, en particulier durant l'hiver.

1.3. Aridité et irrigation

Dans les secteurs qui peuvent être reliés aux réseaux d'irrigation, le climat, tel que nous en avons présenté les traits principaux, ne constitue pas une contrainte pour l'agriculture et les plus hauts rendements peuvent être obtenus dans la région de Hisar, semi-aride, comme dans celle, plus sèche, de Bahawalpur. L'irrigation pérenne pallie en effet la médiocrité des précipitations, en particulier celles d'hiver, et la variabilité des pluies dans le temps et dans l'espace.

L'irrigation, dans l'Etat d'Haryana est assurée actuellement par un réseau de canaux pérennes prenant leur eau à partir de la rive droite de la Yamuna, réseau que complète une grande densité de puits (Fig. 8). Excepté les secteurs dunaires, situés au sud et au sud-ouest, la quasi totalité de la région étudiée est atteinte par ce réseau.

Sur la rive gauche du Sutlej également, des canaux d'irrigation pérennes remplacent depuis la réalisation du *Sutlej Valley Project* de 1920 à 1933, d'anciens canaux d'inondation (Fig. 8). Il était prévu que les canaux se greffant sur la *Desert Branch* et le *Dahri distributary*, eux même diffuant du grand *Sutlej canal*, irriguent l'ensemble de la région de Derawar jusqu'à environ 16 km à l'ouest du fort (Fig. 9). Mais l'alimentation n'étant pas suffisante, la *Derawar branch*, comme tous les canaux terminaux de la *desert branch* et de la *Hakra branch*, fut abandonnée à quelque distance en aval de Marot, dès sa création en 1932 (Photo 4). Une surface de 324000 hectares fut ainsi laissée aux activités pastorales.

En revanche, lorsque les terres ne peuvent être irriguées, les nuances climatiques se font sentir dans le mode d'utilisation du sol.

Dans la région de Hisar, l'irrigation n'est pas actuellement une condition *sine qua non* de l'agriculture. L'agriculture pluviale est pratiquée, même lorsque les sols sont pauvres, si les plantes présentent une bonne résistance à des sécheresses prolongées. C'est le cas du *bajra* (millet), des haricots, en culture d'été notamment, ou du *gram* (pois chiche) qui possède un système racinaire très développé et se cultive sur les terrains sableux, comme les dunes, en hiver. C'est aussi le cas de l'orge, plus rustique que le blé. La culture du blé, bien qu'elle soit en général réservée aux terres irriguées du fait de la médiocrité des pluies d'hiver, est également pratiquée sans recours à l'irrigation artificielle, dans les dépressions interdunaires, par exemple dans la région de Sidmukh au sud de Bhadra (Fig. 99). Les facteurs pédologiques sont alors généralement à l'origine de conditions favorables autorisant malgré tout les cultures. Une ou deux grosses pluies d'hiver sont, au dire des paysans, suffisantes pour permettre une récolte convenable. Si les pluies font totalement défaut, la récolte est perdue et les villageois comptent sur les cultures d'été.

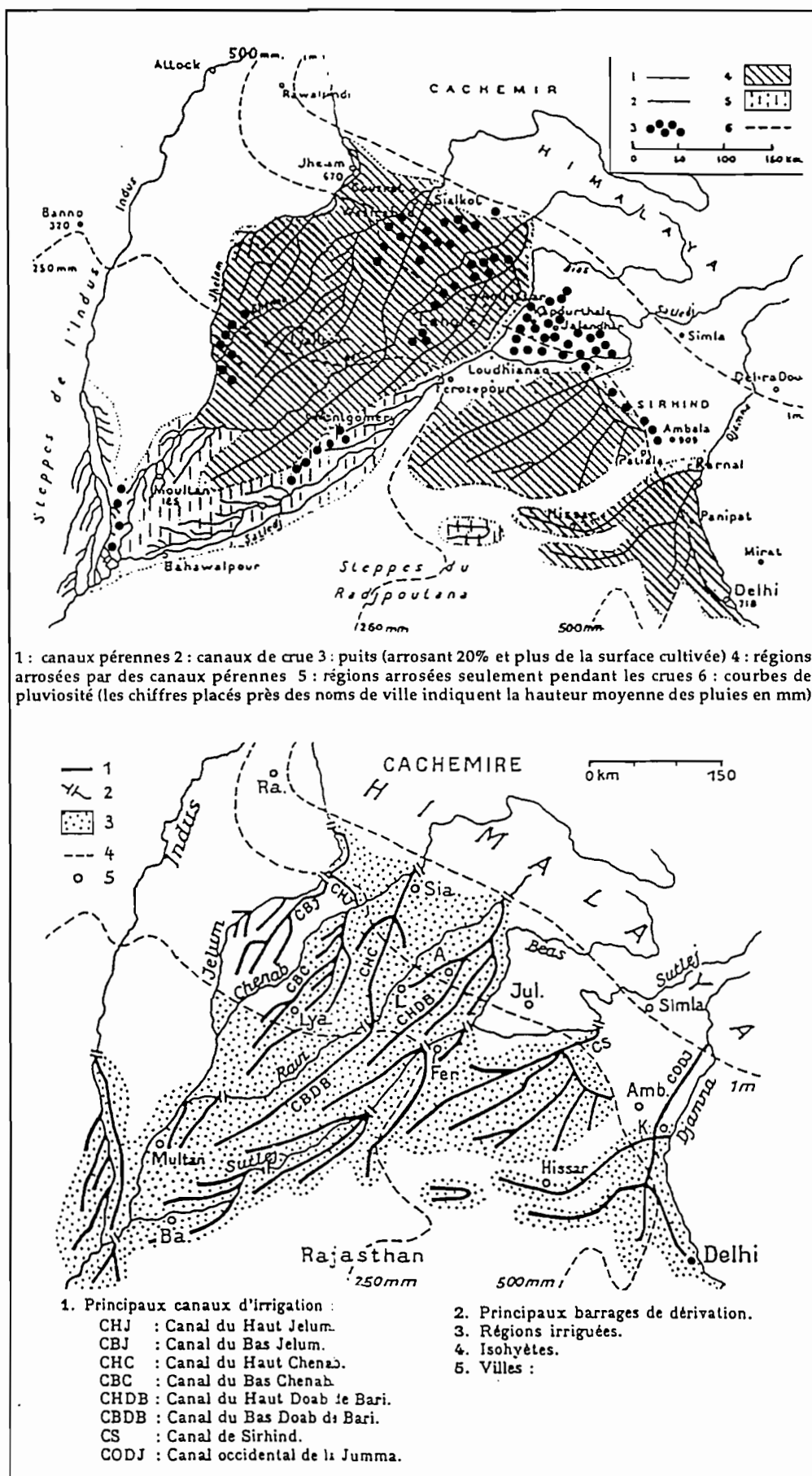


Fig. 8 : L'évolution du réseau d'irrigation entre 1929 (d'après Sion) et 1960 (In Leloup) : le remplacement des canaux de crue par des canaux pérennes

milieu du XIX^e siècle à l'origine de bien des interrogations et de nombreuses hypothèses explicatives.

Dans la région de Hisar, la présence de villages anciens correspondant aux mêmes périodes d'occupation, et situés au coeur des zones actuellement irriguées grâce à un réseau moderne qui amène l'eau de la Yamuna, située à plus de 100 km, fit l'objet des mêmes questions.

Avant de nous pencher sur les hypothèses qui ont été émises pour expliquer les conditions d'implantation de ces établissements, nous nous arrêterons sur les vestiges eux mêmes, qui constituent la base de données sur laquelle repose cette étude, sur leur forme, leur âge et leur signification.

2. LES TRACES DE L'OCCUPATION HUMAINE ANCIENNE

2.1. Les sites archéologiques

Dans la zone concernée, toute surface recouverte d'une forte densité de tessons de poterie, de céramique est appelée "site" (Francfort, 1985, p. 55) et témoigne de l'existence passée en un lieu donné, d'un village ou d'installations humaines temporaires (Photos 1 et 2).

D'étendue fort variable, de quelques centaines de mètres carrés à plus de cent hectares, ces *thers* comme on les appelle localement, plus ou moins circulaires, résultent de la destruction et de l'accumulation des matériaux ayant servi à la construction des habitats. Certains sont totalement nivelés (Photo 2), d'autres se présentent sous la forme d'une butte qui peut atteindre plusieurs mètres de hauteur (Photo 3), certaines plus de quinze mètres. Ces caractères morphologiques doivent leur diversité à la combinaison de nombreux facteurs, tels que la durée des phases d'occupation et leur nombre, la forme de cette occupation, village ou campement temporaire par exemple, ainsi qu'à l'action plus ou moins puissante de processus de météorisation divers et aux modalités plus ou moins destructrices de l'occupation humaine aux époques qui ont suivi l'abandon du site.

Photo 1 : A la surface des sites archéologiques : une forte densité de tessons de poterie, de céramique.

Photo 2 : Aux limites du village actuel (Hajampur, Haryana, Inde), un site archéologique (n°247 - historique) nivelé, facilement identifiable par sa couverture de tessons de poterie, de couleur rouge (7/3/1990).

Photo 3 : Entouré de champs de blé, le site protohistorique de Siswal (n°11) (Haryana, Inde) au second plan, forme une butte de quelques mètres, au dessus de la plaine. Au loin la bordure continue d'arbres signale la présence d'un canal d'irrigation : le *Hisar distributary*, abandonné entre 1937 et 1975 (18/2/1988).



Photo 1



Photo 2



Photo 3

Les milliers de tessons de poterie, et les autres vestiges qui jonchent la surface des sites les rendent repérables et identifiables dans le paysage, surtout dans un environnement désertique comme celui du Cholistan. En Haryana, où le milieu a été davantage perturbé par les mises en culture, ils sont souvent recherchés à proximité des villages actuels et parfois signalés par les habitants qui en connaissent bien l'emplacement ; certaines buttes plus élevées que les autres peuvent aussi être indiquées sur les cartes topographiques au 1/50 000^e.

2.2. Les différentes phases de l'occupation humaine

2.2.1. Datations : principes, moyens

Les niveaux les plus anciens sont les plus profondément enfouis. Pourtant, les sites n'évoluant pas de façon homogène, sur toute leur étendue, on retrouve très fréquemment en surface, par un phénomène "d'érosion différentielle", dont les causes peuvent être anthropiques comme naturelles, des vestiges (principalement des tessons de céramiques) des différentes périodes d'occupation qu'ils ont connu, et qu'il appartient aux archéologues de dater.

En l'absence de données stratigraphiques, cette datation repose en grande partie sur l'étude des tessons que l'on collecte en très grand nombre, et qui permettent d'affecter à chaque site une séquence culturelle. Décrites par un ensemble de caractères jugés significatifs et représentatifs : forme, taille, mode de fabrication, matière, couleur, décors, les céramiques peuvent en effet, dans la plupart des cas, être classées par comparaison à des profils types ou profils de référence. Ces derniers sont situés dans le temps grâce au recoupement d'une série de datations absolues (C14 ou thermoluminescence) obtenues à partir des matériaux prélevés lors des fouilles dans les niveaux correspondant à ces profils. Les sites où les caractéristiques d'un type ou d'une période sont les mieux représentées, ou simplement ceux où ils ont été observés et identifiés pour la première fois, ont souvent donné leur nom à la phase culturelle à laquelle ils correspondent. La période harappéenne est ainsi subdivisée en phases elles-mêmes numérotées, Mohenjo-Daro, Kot Diji, Kalibangan, Siswal par exemple.

C'est par l'ensemble de ces procédés qu'ont été datées les données sur lesquelles s'appuie cette recherche. Les vestiges archéologiques découverts dans la paléovallée de la Chautang (voir § 2.4.) ont ainsi été attribués à neuf phases culturelles et ceux du Cholistan (voir § 2.3), à six phases (Tabl. 3).

L'étude des vestiges archéologiques, auxquels s'ajoutent, pour les périodes les plus récentes, d'autres sources d'information, telles que des documents écrits, est à l'origine d'un certain nombre de connaissances sur l'histoire technologique, sociale, politique, de ces deux secteurs bien que beaucoup de lacunes et d'incertitudes subsistent, notamment quant à la protohistoire et à l'histoire ancienne de l'Inde. Nous en rappellerons brièvement les traits principaux.

Tabl. 3 : Les différentes phases culturelles reconnues en Haryana et au Cholistan

HARYANA		CHOLISTAN	
Période	Datation	Période	Datation
PROTOHARAPPEENNE	Avant 2500 av. J.-C. (ca.3000-2500 av. J.-C.)	HAKRA WARE	ca . 3500-3000 av. J.-C .
		HARAPPEENNE ANCIENNE	3100/3000 - 2500 av. J.-C.
HARAPPEENNE	2500 - 1800 av. J.-C.	HARAPPEENNE MURE	2500/2000 - 1900 av. J.-C.
HARAPPEENNE TARDIVE	1800 - 1500 av. J.-C.	HARAPPEENNE TARDIVE	2000/1900 - 1500 av. J.-C.
PGW (Painted Grey Ware : céramique grise peinte)	1500 - 1000 av. J.-C.	PGW	1100/1000 - 600/500 av. J.-C.
NBPW (Northern Black Polished Ware : céramique noire polie du Nord)	V ^e - III ^e siècles av. J.-C.	HISTORIQUE ANCIENNE et MEDIEVALE	I ^{er} - XVIII ^e siècle
KUSHANE	I ^r - IV ^e siècles apr. J.-C.		
RANG MAHAL	III ^e - VI ^e siècle		
MEDIEVALE ANCIENNE	VIII ^e - XII ^e /XIII ^e s.		
MEDIEVALE RECENTE	XV ^e - XVIII ^e siècle		

2.2.2. Quelques jalons

2.2.2.1. La protohistoire

• La période de la civilisation de l'Indus

La période protohistorique (ca. 3000-1000 av. J.-C.) comporte plusieurs phases. La plus brillante est celle de la civilisation de l'Indus ou civilisation harappéenne (ca. 3000-1500 av. J.-C.), du nom de Harappa, première grande cité mise au jour au début des années vingt sur la rive gauche de la Ravi, affluent du Jhelum, lui-même affluent de l'Indus. Cette civilisation connut un développement considérable, comparable à celui de la Mésopotamie, et s'étendit à son apogée, que l'on a coutume d'appeler l'Harappéen mûr ou le *Mature Harappan*, entre environ 2500 et 1800 avant J.-C., de l'actuel sud-ouest

pakistanaï (Baloutchistan, côte du Makran) au Pendjab, à la Narmada (sud du Gujarat), sur plus d'un million de kilomètres carrés (Agrawal, 1986) (Fig. 10).

L'un des traits caractéristiques de la civilisation de l'Indus est l'existence de nombreux centres urbains, dynamiques et prospères, reposant sur une économie agricole basée sur la culture du blé. Les plus célèbres d'entre eux sont Harappa, Mohenjo-Daro (le plus grand) distant de 600 km, situé sur la rive droite de l'Indus, Chanhudaro, à 130 km au sud, Ganweriwala au Cholistan, Kalibangan au Rajasthan, Rakhi Garhi en Haryana. (Fig. 10).

L'uniformité de cette civilisation est également sans équivalent. Elle apparaît aussi bien dans l'unification du système de poids et mesures que dans la fabrication des céramiques, dans l'urbanisme et l'architecture, ou dans la spécialisation de l'artisanat (Agrawal, 1986, p. 164). Cette uniformité n'exclurait pas cependant un grand nombre de variations régionales, la tradition harappéenne classique ayant intégré divers caractères locaux dans les régions éloignées de l'Indus, la péninsule du Gujarat ou la vallée de la Ghaggar-Hakra par exemple (*op. cit.*).

Deux sites, Harappa et Mohenjo-Daro constituent les éléments représentatifs de la pleine phase d'urbanisation et de développement de la civilisation de l'Indus, datée par les niveaux supérieurs de Mohenjo-Daro entre 2500 et 2060 av. J.-C., période dans laquelle s'inscrivent aussi les sites harappéens de la région de Bahawalpur (*ca.* 2500 et 2000 av. J.-C.). Sur certains sites comme Kalibangan au Rajasthan, cette phase se prolonge cependant encore un siècle, jusqu'aux environs de 1900 avant notre ère.

• La période pré-harappéenne ou harappéenne ancienne

La période harappéenne, telle qu'elle apparaît dans sa forme la plus évoluée à Harappa ou à Mohenjo-Daro, est précédée d'une phase qualifiée de pré-harappéenne, proto-harappéenne ou bien harappéenne ancienne (Mughal, 1981), en fonction du degré de filiation reconnu entre les deux périodes. Cette phase est représentée notamment par les cultures dites d'Amri dans la basse vallée de l'Indus au sud de Mohenjo-Daro et de Kot Diji sur la rive gauche du fleuve, deux sites où fut mise au jour, sous les niveaux de la civilisation harappéenne classique, une couche culturelle plus ancienne, datée entre 3000 et 2500 avant notre ère.

Certaines datations C14 recouvrent toutefois en partie celles de l'Harappen. On peut donc supposer que les deux ensembles culturels ont pu coexister au moins partiellement et constituer ce que certains qualifient de "manifestations urbaines et rurales d'un même phénomène culturel" (*op. cit.*, p. 170). Les vestiges de sites comme Amri, Kot Diji ou Kalibangan-I, montrent d'ailleurs que dans bien des domaines, fabrication de la céramique, architecture, urbanisme, ou transports, les pré-harappéens ont contribué à la formation de la culture de Harappa. Suivant cette hypothèse, celle-ci n'aurait donc pas "supplanté les

cultures pré-harappéennes, sauf là où elle construisit des villes, mais /.../ entretenu avec elle des relations réciproques... /qui ont pu se traduire/ par la prise de possession d'un village par une corporation citadine en vue de l'urbaniser" (*ibid.*). Les traits caractéristiques des deux phases tendent d'ailleurs, comme le souligne D.P. Agrawal (*op. cit.*, p. 218), à être confondus dans la région périphérique du Pendjab oriental, de l'Haryana, notamment à Mitathal.

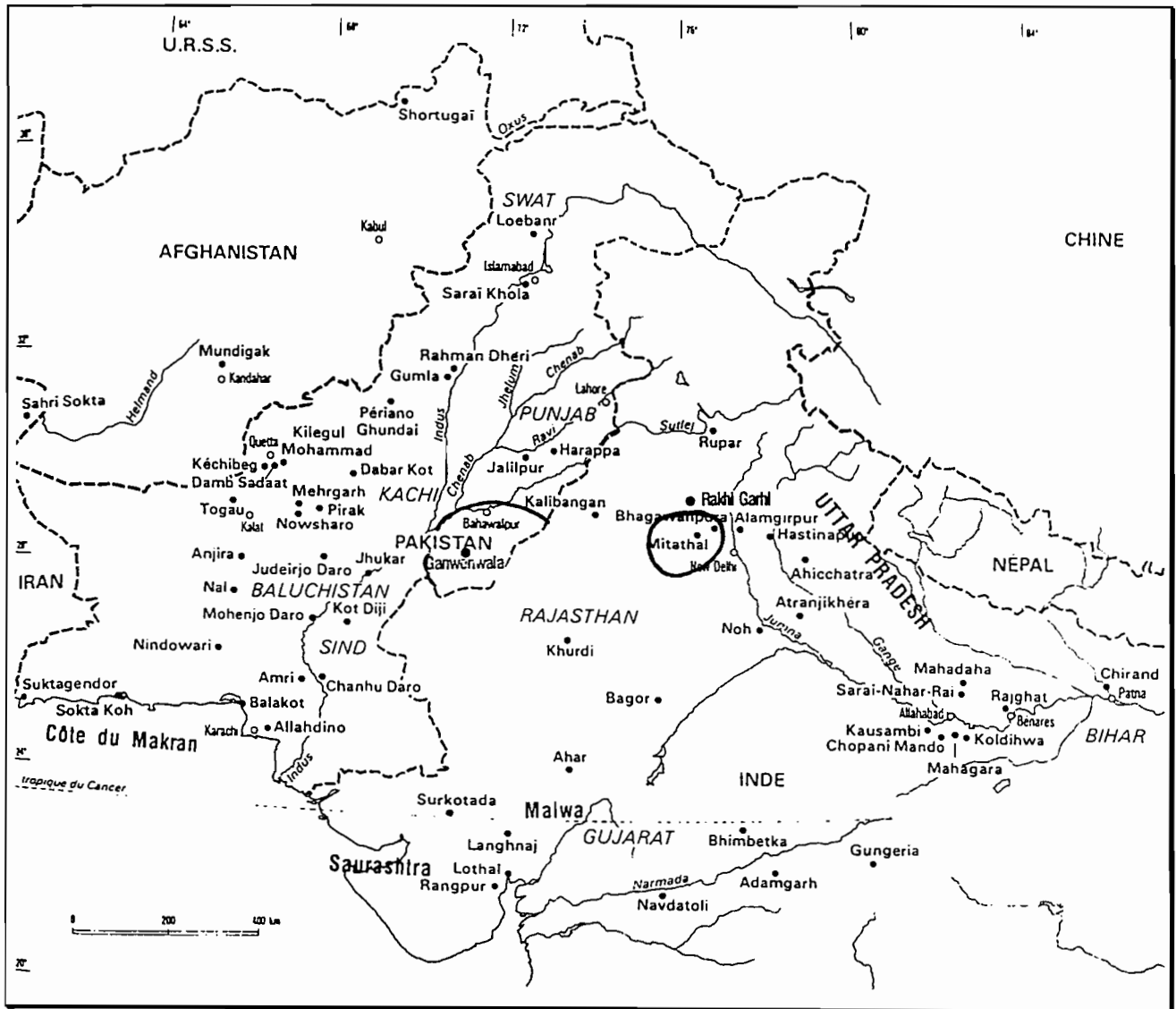


Fig. 10 : Principaux sites archéologiques au nord-ouest du sous-continent indo-pakistanaï et secteurs étudiés.
(D'après *Encyclopédia Universalis*)

- La période dite de la céramique Hakra (Hakra Ware)

M.R. Mughal (1980, 1981, 1982) distingue encore de la période harappéenne ancienne la phase dite de la "céramique Hakra", du nom d'un assemblage de céramique particulièrement bien représenté dans ce qu'il identifie comme la vallée asséchée de la Hakra. Il y caractériserait selon lui les plus anciennes installations humaines actuellement connues, datées par le C14 depuis environ 3500 jusqu'à 3000 avant J.-C. Les

porteurs de cette céramique auraient donc précédé ceux de la phase préharappéenne ou harappéenne ancienne, sans que l'on connaisse les liens ayant existé entre les deux cultures.

Grâce aux recherches de ces dernières années, il apparaît désormais que la plupart des composantes de la civilisation de l'Indus classique trouvent leur origine dans un contexte beaucoup plus ancien. Le site de Mehrgarh, fouillé au Pakistan sous la direction de J.-F. Jarrige, en est un bon exemple, qui présente une succession de cultures depuis 6000 avant J.-C. jusqu'à la période précédant immédiatement le début de la civilisation de l'Indus, vers 2500 avant J.-C.

- **Une phase tardive**

Après sa phase d'apogée, la grande tradition harappéenne d'occupation urbaine semble avoir connu vers 2000 av. J.-C., diverses transformations qui sont les signes de son déclin. C'est pourquoi l'on distingue au sein de la protohistoire une troisième phase, dite harappéenne tardive, et caractérisée selon J.-F. Jarrige (1977), par un appauvrissement de la culture matérielle, sensible dans les décors, les formes et les modes de fabrication des objets et par la disparition des règles d'urbanisme des périodes précédentes.

Les siècles qui suivent la fin de la civilisation de l'Indus et précèdent les temps historiques sont assez mal connus, en particulier, ceux du deuxième millénaire, et ceci malgré l'existence de données littéraires datant de cette époque. Les *védas* par exemple, textes sacrés transmis par tradition orale pendant des siècles avant d'avoir été transcrits, sont en effet d'une interprétation souvent difficile et ne fournissent pas d'indications historiques très sûres (Jarrige, 1977). Les données archéologiques sont lacunaires également, au point que les anglo-saxons parlent d'âge sombre.

- **La période de la céramique grise peinte (PGW : Painted Grey Ware)**

L'âge du fer est attesté dans la vallée du Gange à partir début du I^{er} millénaire avant J.C. Dans le bassin de la Ghaggar-Hakra, le fer le plus ancien est associé à la culture dite de la céramique grise peinte. Une série de datations C14 des niveaux d'occupation PGW de deux sites au Rajasthan et de six autres dans l'Uttar Pradesh permettent de la situer entre 1150 et 400 avant J.-C. Les sites du Pakistan, proches du Rajasthan septentrional, représenteraient une phase "ancienne" datant de la fin du II^e millénaire ou du début du I^{er} millénaire avant notre ère. Elle serait apparue dans la région de Bahawalpur entre 1100/1000 et 600/500 avant J.-C. et entre 1500 et 1000 av. J.-C. dans le bassin de la Chautang. Les sites ayant livré de la céramique grise peinte, sont au nombre de 320 en Inde, concentrés dans les actuels Etats du Pendjab, d'Haryana, du nord du Rajasthan et des parties occidentales de l'Uttar Pradesh. La découverte de sites de ce type au Pakistan a étendu les limites de l'aire d'extension de cette culture vers l'ouest.

La connaissance du fer permit aux hommes porteurs de cette culture de coloniser à grande échelle la région forestière du Doab. "La vallée du Gange se substitue /ainsi/ à la vallée de l'Indus comme centre de l'histoire culturelle de ces régions" (Jarrige, 1977). Cette période de colonisation semble s'être achevée aux environs de 500 av. J.-C. On voit alors émerger une nouvelle tradition, la Northern Black Polished Ware, poterie noire polie de la région nord.

2.2.2.2. La période historique ancienne

Bien que plus proches de nous, les différentes phases qui marquèrent l'histoire ancienne de la région n'en restent pas moins mal connues. Si certaines ont pu être reconstituées à l'aide des données archéologiques, auxquelles s'ajoutent des témoignages indirects tels que des récits de voyageurs ou des textes à caractère plus ou moins religieux, de nombreuses incertitudes demeurent.

Après la fin des grandes cités de l'Indus, la vie urbaine ne réapparut que quelque mille ans plus tard, dans la vallée du Gange. Le village, "constitué de quelques cabanes groupées autour d'un puits ou d'un étang, au voisinage d'un espace dégagé", fut donc "durant deux millénaires au moins, le seul type d'habitat permanent" (Basham, 1976, p. 207 et 209).

La période qui s'étend du IV^e au III^e siècle avant notre ère est dominée par la dynastie Maurya dont la puissance était principalement fondée sur la découverte des énormes mines de fer du Bihar, qui allait transformer la vallée du Gange en "une grande artère commerciale" (Jarrige, 1977, p. 252). Cette dynastie fut ainsi à la tête de l'empire le plus grand que l'Inde classique ait connue (Basham, 1976). La mort d'Açoka qui en fut l'un des principaux artisans, en 232 avant J.-C., marque les débuts de son démantèlement.

L'Inde s'affaiblit alors, perdant "son unité politique sinon son unité culturelle pour près de 2000 ans" (*op. cit.*, p. 69), et sut mal résister à différentes vagues d'envahisseurs qui, arrivant par le nord-ouest du sous-continent, finirent par contrôler l'actuel Pakistan, le Malwa et le Saurashtra, ainsi qu'une grande partie de l'Uttar Pradesh et du Rajasthan. Les premiers de ces envahisseurs furent les Grecs installés en Bactriane. Les petits royaumes qu'ils édifièrent furent ensuite balayés par le déferlement des Saka ou Scythes, originaires d'Asie centrale et qui, vers le milieu du I^{er} siècle avant notre ère, se répandirent dans la vallée de l'Indus puis dans celle du Gange où ils fondèrent plusieurs dynasties. Ils furent repoussés à leur tour par plusieurs tribus Yuezhi (Yueh-Tchi), elles aussi venues d'Asie centrale, qui comptaient dans leur rang celle des Kushan.

Période mal connue, celle qui suivit le déclin des Kushan dans le nord-ouest de l'Inde, semble caractérisée par des désordres politiques qui paraissent cependant ne pas avoir affecté les activités agricoles, commerciales et culturelles. Parmi ces dynastes locaux,

Chandra Gupta Ier, qui accéda au trône vers 320 après J.-C., fut le fondateur de la dynastie des Gupta qui régna sur l'Inde du Nord jusqu'au milieu du VI^e siècle. Sans posséder l'envergure des Maurya, l'emprise territoriale qu'ils consolidèrent peu à peu et qui s'étendit à la presque totalité de l'Inde septentrionale, est remarquable. Cette période, dont la prospérité est attestée notamment par les récits de voyageurs étrangers, correspond à la phase culturelle dite de Rang Mahal (site éponyme situé au Rajasthan). Cette phase est la plus représentée sur les sites archéologiques retrouvés dans le secteur de Hisar. L'empire Gupta semble avoir connu son apogée autour de 376-415 après J.-C. Son déclin s'amorça à partir de 467, sous la pression de nouveaux envahisseurs venus d'Asie centrale, des Huns. Ces derniers, qui occupaient la Bactriane, après avoir été repoussés une première fois, finirent en effet, à la fin du V^e siècle, par envahir l'Inde occidentale où ils exercèrent leur domination pendant une trentaine d'années (*op. cit.*).

2.2.2.3. L'ère médiévale

Le Moyen Âge peut être divisé en deux périodes. La première, parfois qualifiée de *médiévale ancienne*, s'étend du VIII^e siècle au XII-XIII^e siècles de notre ère et est marquée par une nouvelle instabilité politique, aggravée par les attaques d'envahisseurs arabes, qui dans l'ensemble, restèrent contenus dans le Sind et sur les bords de l'Indus, puis au début du XI^e siècle, par des invasions turques (les Gazhnévides), plus violentes (Basham, 1976). La seconde période, dite *médiévale récente*, et qui dure jusqu'au XVIII^e siècle, voit l'instauration, au XVI^e siècle, de la dynastie des Moghol. Parallèlement au développement des activités artisanales et commerciales, l'agriculture, toujours à la base de l'économie, fut marquée à cette époque par des progrès technologiques importants, par le développement de l'irrigation et l'amélioration des rendements. L'Inde du Nord fut ainsi, à l'apogée de l'Empire moghol, l'une des régions les plus prospères et l'un des centres économiques les plus actifs du monde (*op. cit.*).

Ainsi, de la protohistoire à la fin du XVIII^e siècle, la région qui nous intéresse a toujours été peuplée. L'occupation n'a cependant pas été continue. Les sites, villages abandonnés temporairement ou définitivement, en sont la preuve. L'occupation n'a pas été non plus uniforme dans le temps, si l'on en juge par les écarts de densités de sites d'une époque à l'autre, comme on le verra plus loin. A quels facteurs peuvent être attribuées de telles discontinuités ? Les troubles politiques, les incursions d'envahisseurs, les changements économiques qui viennent d'être évoqués en sont-ils la cause, ou faut-il invoquer des ruptures d'équilibres d'ordre naturel ? Les sites archéologiques sont les indicateurs de l'évolution du peuplement dans le temps et dans l'espace, à partir desquels nous tenterons d'apporter des éléments de réponse à ces questions. C'est au chapitre IV que nous aborderons l'aspect spatial de l'occupation humaine ; nous nous bornerons ci-dessous à un exposé des principales découvertes.

2.3. L'occupation humaine ancienne dans le désert du Cholistan (Pakistan)

2.3.1. A propos des prospections archéologiques

Le désert du Cholistan n'a pas fait l'objet, depuis le début du XX^e siècle, de nombreuses prospections archéologiques, contrairement aux régions de Bikaner au Rajasthan ou à celles, plus orientales, qui correspondent aux paléovallées de la Ghaggar ou de la Chautang.

Le géographe Aurel Stein, dont la totalité des travaux relatifs au Cholistan, n'est publiée que depuis 1989, l'explora entre décembre 1940 et mars 1941. Il découvrit une centaine de sites, datés depuis de la période historique, le long et à proximité de ce qu'il identifiait comme l'ancien cours de la Hakra, entre Fort Abbas, près de la frontière indo-pakistanaise, et les environs de Fort Derawar, laissant inexplorée la région peu accessible des hautes dunes du grand Cholistan, au sud-ouest (Fig. 11) (Stein, 1942).

Aucune autre expédition de ce type ne fut entreprise jusqu'à une période récente. La prospection de l'archéologue Henry Field entre le 18 et le 20 avril 1955, fut limitée à la collecte d'échantillons de céramiques sur quelques sites entre Dera Nawab Sahib et Derawar, puis vers l'est, entre Fort Abbas et la frontière.

Le recensement systématique des sites archéologiques et des monuments situés dans l'actuelle division de Bahawalpur, qui devait servir de base à une reconstitution diachronique du peuplement de la région, et sur lequel s'appuie notre étude, a été mené de 1974 à 1977 par le *Federal Department of Archaeology and Museums* du Pakistan sous la direction de M. R. Mughal (Mughal, 1980, 1981, 1982, 1984). Une fois encore, une attention particulière fut portée à ce qui avait été antérieurement défini comme "le cours asséché de la rivière Hakra". M. R. Mughal précise (1982) que les prospections furent concentrées le long du lit de ce cours d'eau sur 483 km depuis la frontière indo-pakistanaise, en direction du sud-ouest, et sur 16 à 24 km de large. Cet espace, transition entre le désert proprement dit et la frange des terres irriguées à partir de la rive gauche du Sutlej, n'ayant pas encore été perturbé par de récentes mises en culture, offrait en effet aux vestiges archéologiques de bonnes conditions de conservation.

Si, du fait de l'étendue de l'aire prospectée (34 000 km²) et du nombre important de sites recensés (414), l'on admet avec Mughal que les données obtenues peuvent être considérées comme représentatives des différentes phases culturelles caractérisant l'occupation de la région, il est toutefois permis d'émettre quelques réserves quant à leur représentativité sur le plan spatial. Deux secteurs en effet ont été négligés, celui des dunes situé au sud du "lit

de la Hakra" et celui des terres irriguées au nord. Comme le fait remarquer Mughal (1980), ils ont probablement été *aussi* le lieu d'un certain nombre, non estimé, d'installations humaines aux époques anciennes, même si leurs traces peuvent avoir disparu, ensevelies sous les sables dont la mobilité est observée sur le terrain, ou détruites à la suite des mises en culture récentes. Or, sur la carte des sites réalisée par Mughal (1982) (Fig. 12) et par suite, dans l'interprétation qu'il en donne, ces zones apparaissent non comme des espaces de sites potentiels, mais comme des espaces vides. Le secteur de Derawar, où l'on enregistre une forte densité de sites, serait ainsi de ce fait, un lieu privilégié d'implantations humaines. Mughal ne met en doute ni ne discute la signification de cette distribution.

On peut se demander s'il n'est pas hasardeux d'émettre des hypothèses sur la répartition spatiale d'établissements humains et finalement sur les conditions qui ont présidé à leur mise en place, dans un espace au sein duquel les modalités prises par ce phénomène ne sont pas uniformément connues. Ainsi, bien que des liens puissent être mis en évidence entre des sites et les divers éléments d'une paléohydrographie, il paraît abusif d'en déduire, comme le fait Mughal, que les populations se sont installées prioritairement en un lieu lorsqu'on ignore les conditions d'occupation des espaces voisins.

Nous ne considérerons donc les données fournies par Mughal que dans le cadre spatial à l'intérieur duquel leur représentativité ne semble pas devoir être mise en cause, celui qui a été effectivement très finement prospecté.

2.3.2. Les données archéologiques de la "vallée de la Hakra"

Le peuplement ancien de la région, tel qu'il ressort de l'étude publiée par Mughal (1982), des 414 sites recensés¹ est presque exclusivement (91%) protohistorique. La majorité de ces sites (64%) appartient à la période harappéenne proprement dite, à l'intérieur de laquelle ils se répartissent comme suit :

- 42% des sites (174) ont été attribués à la phase mûre,
- 10 % (40) à la période harappéenne ancienne et
- 12 % (50) à la phase tardive.

Les installations les plus anciennes, qui correspondent à la phase dite de la céramique Hakra, représentent 24% des sites (99). Enfin, 14 soit 3% seulement du total, ont été attribués à la phase culturelle de la "céramique grise peinte" (PGW). Les périodes antique et médiévale sont représentées par 37 sites (7%).

¹ Sur les 414 sites, nous avons exclu les sites "non identifiés" par Mughal ; ne sont donc pris en compte que 396 sites.

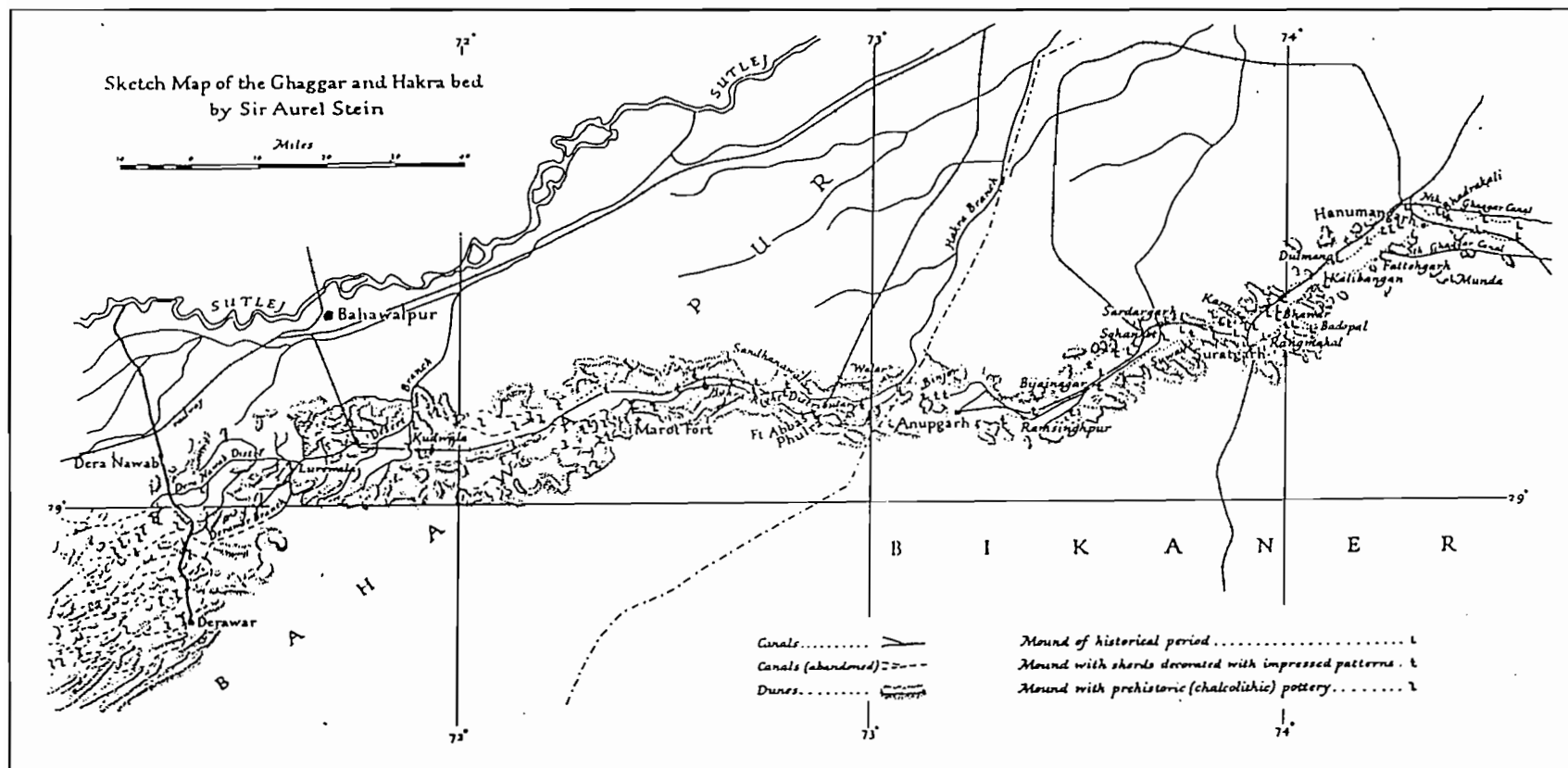


Fig. 11 : La prospection géo-archéologique d'Aurel Stein au Cholistan, entre Hanumangarh et Derawar (1942)

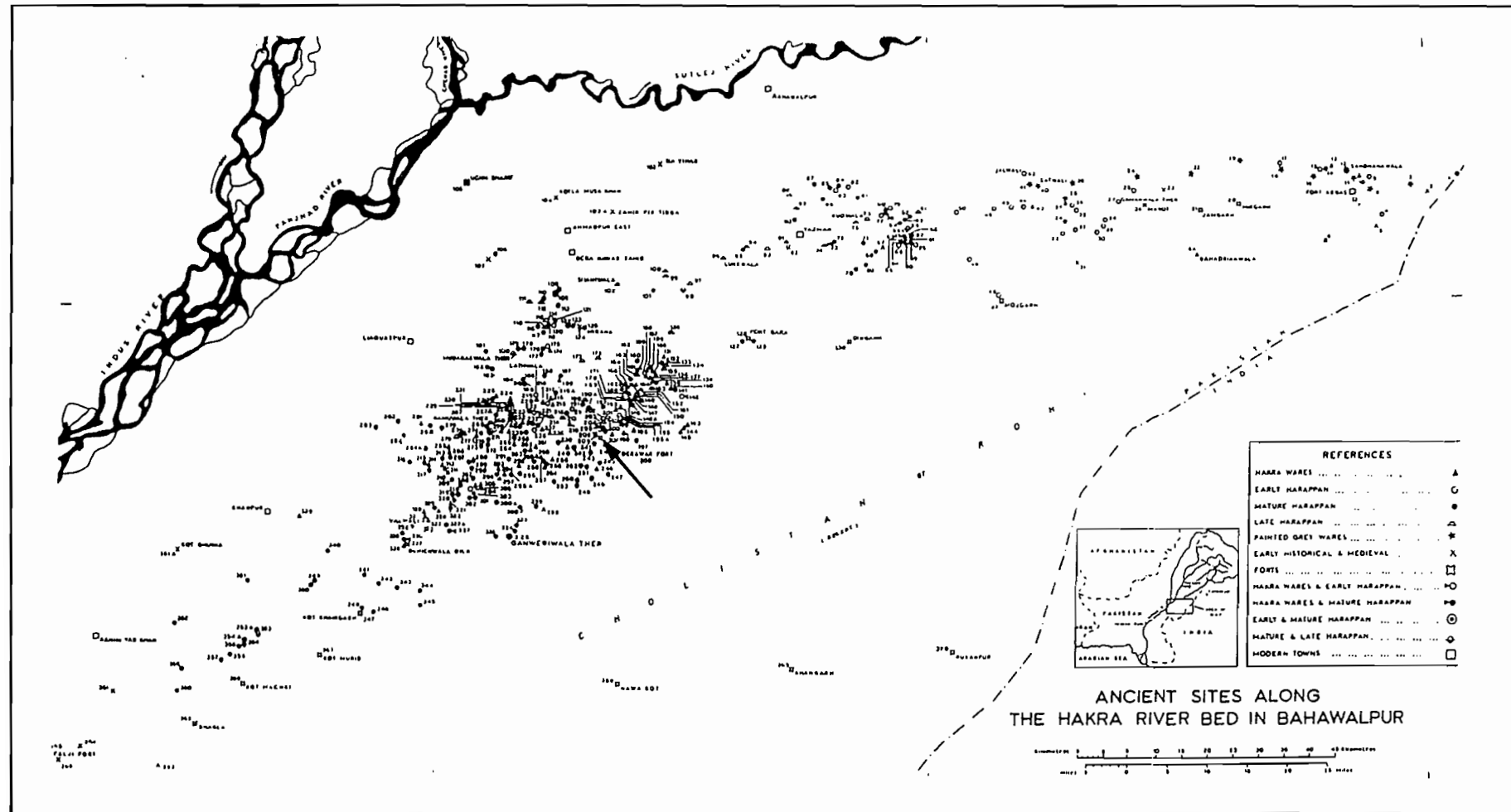


Fig. 12 : La prospection archéologique de M. R. Mughal au Cholistan, entre Fort Abbas et Rahimyar Khan (1982).
La flèche indique la situation de Fort Derawar

A partir de l'étude de M. R. Mughal, nous pouvons répartir l'ensemble des sites en cinq classes de superficie (Tabl. 4).

Tabl. 4 : Superficie des sites du Cholistan

Superficie (hectares)	Nombre de sites ¹
0 - 5	109
5 - 10	39
10 - 15	12
15 - 20	13
> 20	8

2.4. L'occupation humaine ancienne dans "la vallée de la Chautang"

A l'est, notre étude repose sur la prospection effectuée en 1984 par la Mission Archéologique Française en Inde (M.A.F.I.), fondée en 1982, et à laquelle ont coopéré sous la direction d'H.-P. Francfort, des chercheurs appartenant à l'*Archaeological Survey of India* et à l'UPR n°315 du CNRS ("Archéologie de l'Asie centrale : milieux, peuplement, techniques"). Son objectif était de "dresser une carte des aires de peuplement", sans pour autant ignorer les aires qui n'ont pas été occupées (Francfort, 1985, p. 55). Le territoire concerné par notre étude est celui d'une portion de la paléovallée dite de la Chautang, comprise dans un triangle entre Hisar au nord, Bhadra à l'ouest et Bhiwani au sud-est (Fig. 13 et 14). Cette région auparavant en partie visitée par d'autres archéologues, tels que Bhan en 1968 et 1973, Ghosh en 1952, a fait l'objet en 1983 et en 1984 d'une exploration "intensive et systématique" (*ibid.*). En 1988, une campagne de sondages permet d'associer une étude stratigraphique aux collectes et aux déterminations à partir des vestiges de surface. Un certain nombre de sites, comme Mangali ou Mithatal, choisis parce que leur localisation posait problème ou risquait de préciser nos connaissances sur l'environnement des sites, ont fait l'objet de prélèvements en profondeur. L'analyse archéologique finale des vestiges mis au jour n'ayant pas encore été publiée, nous avons travaillé sur des résultats préliminaires (Francfort éd. 1985) et sur les données brutes .

• Les données

Notre étude porte sur un ensemble de 218 sites. Le matériel retrouvé en surface lors des prospections ou en profondeur lors des fouilles et des sondages, a permis aux archéologues l'identification d'une ou, pour 65% d'entre eux, de plusieurs, phases culturelles. Nous savons ainsi qu'un même lieu a pu être occupé à plusieurs reprises après des périodes d'abandon plus ou moins longues ou de façon apparemment continue, phénomènes assez rarement observés au Cholistan.

¹Sont exclus du comptage les sites pour lesquels l'information n'est pas disponible.

Tabl. 5 : Différentes séquences chronologiques et culturelles repérées sur les sites mis au jour en Haryana (secteur de Hisar) et nombre de sites correspondant.

Phases culturelles :

PH : protoharappéenne ; NBP : de la poterie noire polie du Nord ;

H : harappéenne mûre ; K : Kushane ;

LH : harappéenne tardive ; RM : Rang Mahal ;

PGW : de la céramique grise peinte ; EMA : médiévale ancienne ;

LMA : médiévale récente

[illegible]

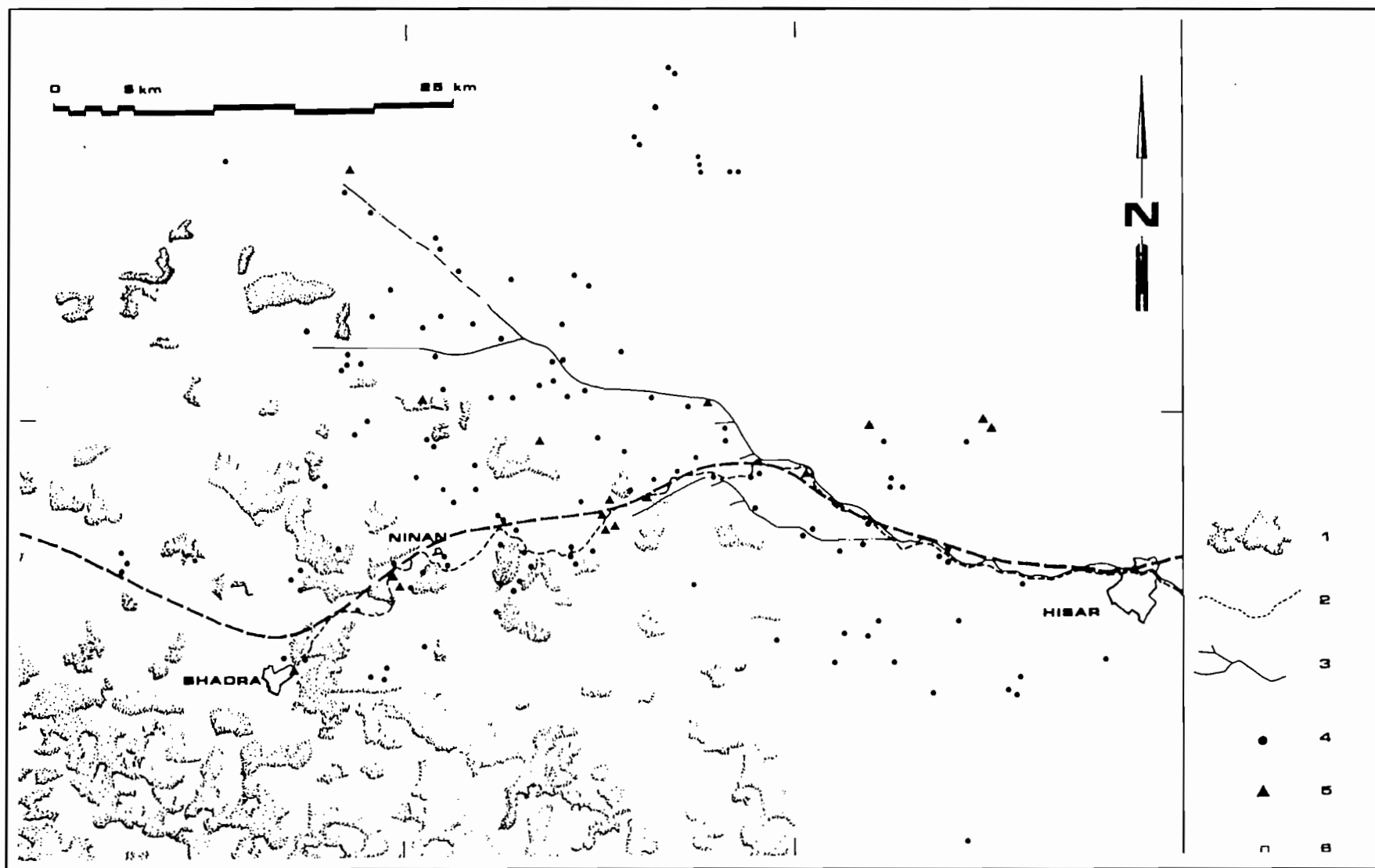


Fig. 13 : Prospection archéologique de la M.A.F.I. en Haryana. Distribution des sites entre Bhadra et Hisar.

1- dunes de sable 2- canal du XIX^e siècle 3- canal médiéval 4- sites historiques et médiévaux 5- sites protohistoriques 6- puits visités (Francfort éd. 1985)

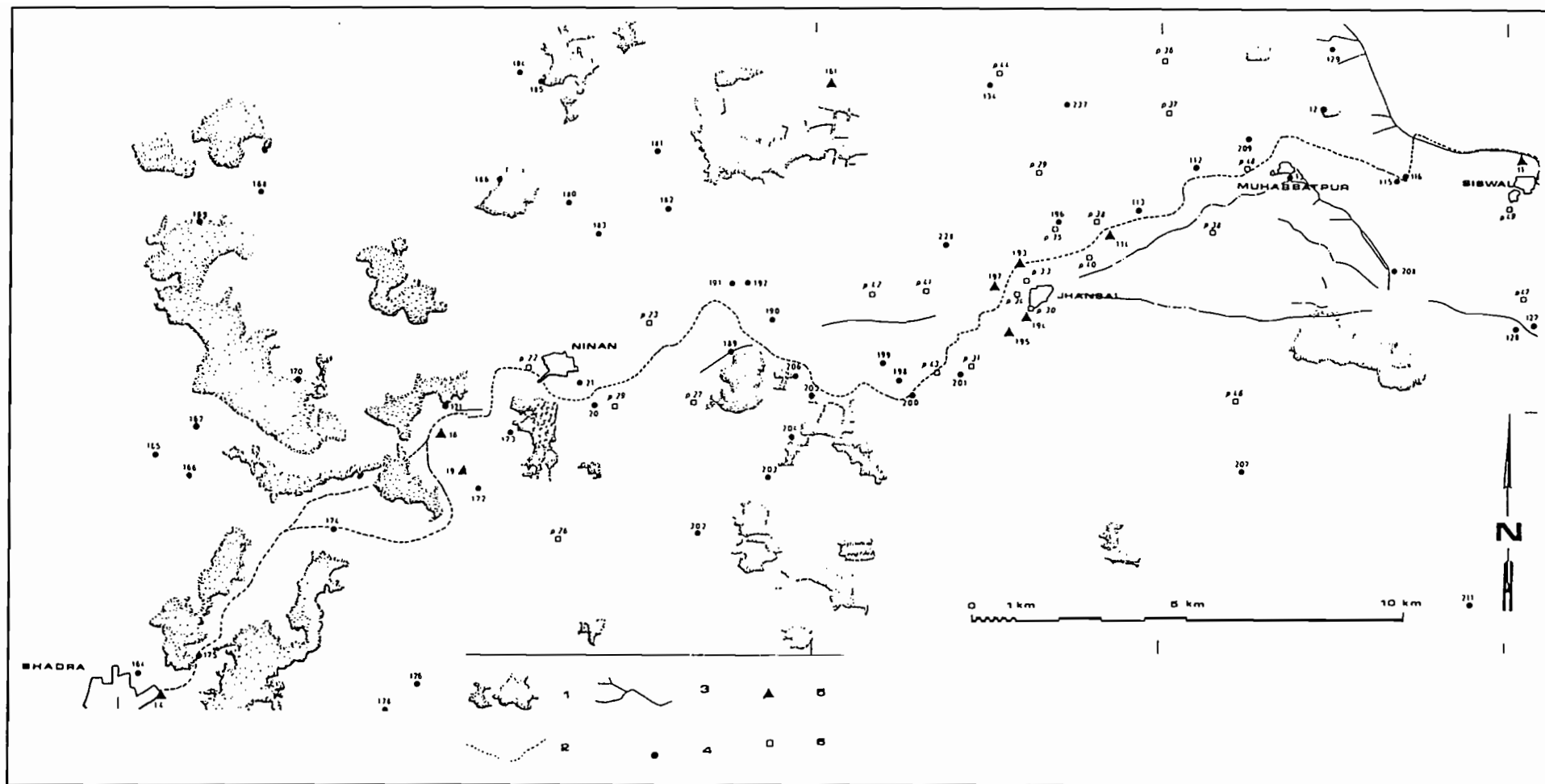


Fig. 14 : Prospection archéologique de la M.A.F.I. en Haryana. Distribution des sites entre Bhadra et Siswal.

1- dunes de sable 2- canal du XIX^e siècle 3- canal médiéval 4- sites historiques et médiévaux 5- sites protohistoriques 6- puits visités (Francfort éd. 1985)

Quarante-six séquences chronologiques et culturelles différentes, que nous avons représentées dans le tableau 5, peuvent être ainsi identifiées sur l'ensemble des sites. Beaucoup ne constituent qu'un cas de figure exceptionnel puisque sept de ces "profils" regroupent à eux seuls 69 % des sites.

Sans nous attarder sur les cas particuliers nous retiendrons les traits principaux de la structure temporelle du peuplement dans ce secteur. On remarquera en premier lieu que sur 195 sites datés -avec différents degrés de certitude-, 50 seulement remontent à la période harappéenne (Tabl. 5). Le peuplement de cette région est donc historique pour une proportion de 74% des sites (soit 145), ce qui constitue encore un trait original par rapport au secteur de Bahawalpur au Cholistan.

82% des sites occupés durant la période harappéenne le seront ultérieurement, pour plus de 60% d'entre eux, quelques 1800 ans plus tard, au cours de la phase dite Rang Mahal. On peut remarquer également la légère prééminence du peuplement protoharappéen, 11 à 35 sites -selon le degré de certitude accordé aux datations- par rapport à celui des périodes harappéennes mûre -8 à 31 sites- et tardive -13 à 30 sites (Tabl. 6). Rappelons en effet que au Cholistan, 66% des sites harappéens ont été datés de la phase mûre.

Tabl. 6 : Nombre de sites par époque (trois degrés de certitude sont attachés aux datations, sûre (I), probable (II), Incertaine (III)).

PERIODE D'OCCUPATION	NOMBRE DE SITES		
	I	II	III
PROTOHARAPPEENNE (PH)	11	19	5
HARAPPEENNE (H)	8	18	5
HARAPPEENNE TARDIVE (LH)	13	11	5
CERAMIQUE GRISE PEINTE (PGW)	5		
CERAMIQUE NOIRE POLIE (NBP)	2		
KUSHANE (K)	23		
RANG MAHAL (RM)	99	68	
MEDIEVALE ANCIENNE (EMA)	14	41	12
MEDIEVALE RECENTE (LMA)	55	25	12

Autre trait caractéristique du peuplement de cette région, la représentation de la phase culturelle Rang Mahal dans 86 % des sites (Fig. 15).

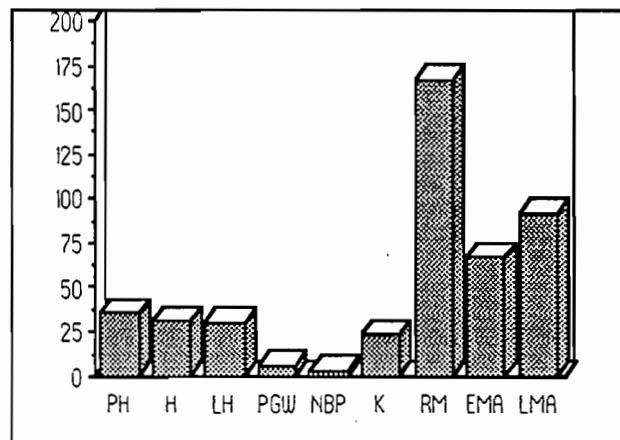


Fig. 15 : Nombre de sites par époque (degré I, II, III confondus)

La figure 16 donne une idée de la dynamique du peuplement. Deux périodes sont marquées par l'apparition d'un grand nombre de nouveaux sites, les phases protoharappéenne et Rang Mahal. Dans une moindre mesure, la période kushane est aussi une phase de croissance.

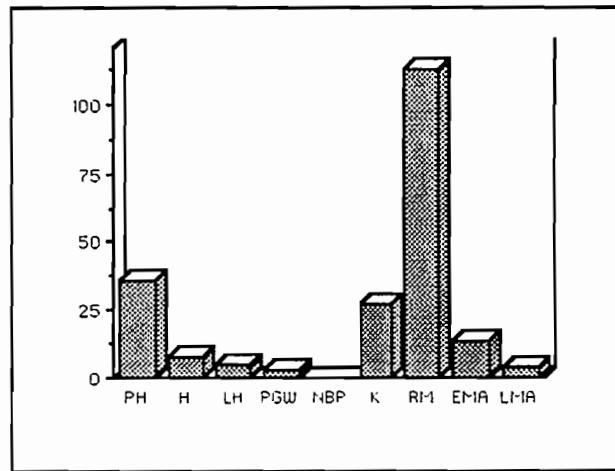


Fig. 16 : Nombre de nouveaux sites pour chaque époque (degré I, II, III confondus)

Sur le plan de la continuité du peuplement en un même lieu, on remarquera sur les figures 17a et 17b que les ruptures majeures se situent après les périodes harappéenne tardive et Rang Mahal.

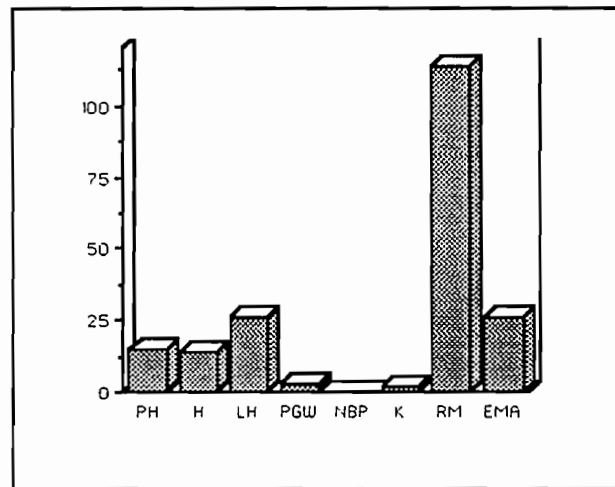


Fig. 17a : Nombre de sites abandonnés après chacune des périodes (degrés I, II, III)

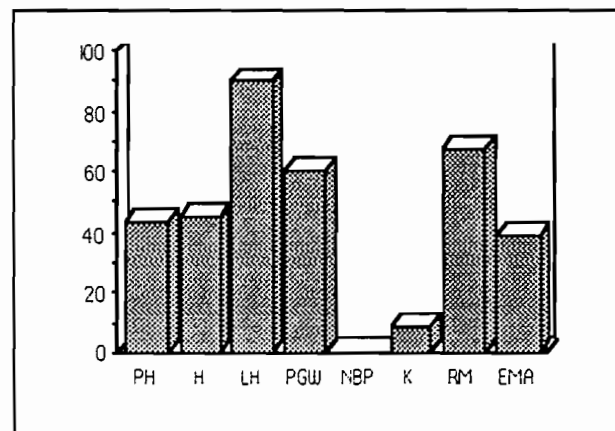


Fig. 17b : Nombre de sites abandonnés après chacune des périodes (degrés I, II, III) en pourcentage du nombre de sites par époque

Ce phénomène est confirmé par la figure 18 qui représente le nombre de sites ayant connu une occupation continue d'une période à la suivante.

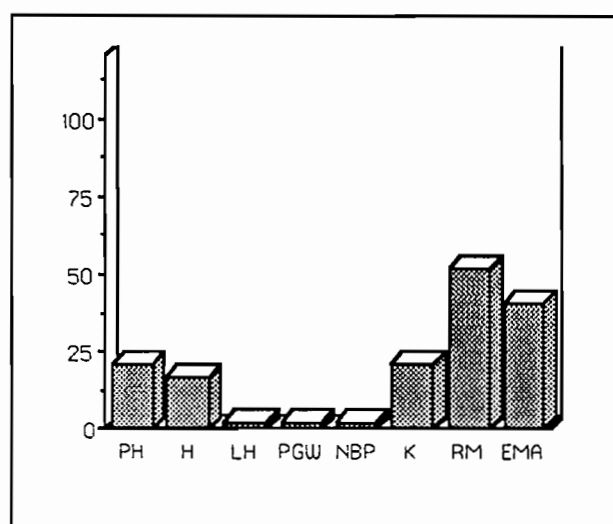


Fig. 18 : Nombre de sites ayant connu une occupation continue d'une période à la suivante

La superficie des sites a été évaluée approximativement au cours des prospections. Quatre classes ont été retenues (Tabl. 7).

Tabl. 7: Superficie des sites dans le secteur de Hisar

Superficie (ha)	Nombre de sites
0 - 0,1	77
0,1- 1	71
1 - 2	36
2 - 10	29
>10	2

Pour les époques les plus anciennes, la protohistoire en particulier, c'est à partir des vestiges trouvés en surface ou en profondeur, vaisselle, outil, etc., qu'ont été approchées les modalités de l'occupation. Les graines présentes dans les niveaux archéologiques fournissent par ailleurs des informations essentielles. Témoins de l'existence d'une agriculture, elles constituent un maillon-clé dès que sont envisagées les relations entre les activités humaines et l'environnement.

2.5. Les plantes cultivées aux époques anciennes

Les textes anciens et les archives de l'époque coloniale, comme les gazetteers ou les censuses, nous renseignent assez bien sur les espèces cultivées et sur les pratiques agricoles durant la période historique, du moins pour les phases les plus récentes. Le matériel archéologique, ainsi que les recherches archéobotaniques menées sur les sites ont permis par ailleurs

d'esquisser une histoire de l'agriculture, dont les débuts sont certainement antérieurs à la période harappéenne datée rappelons-le, de 2500 à 1800 av. J.-C. Nous pensons par exemple au sol labouré préharappéen découvert par Thapar à Kalibangan (Rajasthan) (Hutchinson, 1974), ou aux restes de blé et d'orge "domestiqués" trouvés dans les niveaux "early Neolithic" de Mehrgarh au Baloutchistan qui font remonter la culture de ces plantes au VII^e millénaire au moins avant J.-C. (Weber 1991, p.29). Mais bien des inconnues subsistent, en particulier au sujet des superficies cultivées, des rendements, et des pratiques culturelles.

Aucune étude archéobotanique n'a été menée dans les niveaux archéologiques des sites du Cholistan. Ne possédant pas d'information sur cette région, nous nous appuyerons donc sur celles recueillies dans des secteurs proches. A l'est en revanche, dans la région de Hisar des restes de graines ont été recherchés sur cinq sites, Mangali, Siswal, Mitathal, Tigrana et Burthana (Willcox, 1989).

Le cortège des plantes cultivées pendant la protohistoire était plus restreint qu'actuellement et composé principalement de plantes importées originaires du Proche-Orient. L'économie de subsistance reposait sur la culture des céréales, le blé et l'orge, tandis que les millets d'origine africaine qui prirent par la suite une importance croissante dans l'agriculture étaient absents ou rares.

On retrouve ainsi des traces de culture du blé sur des sites harappéens (Allchin, 1971), comme Mohenjo-Daro autour de 1750 av. J.-C. (Vishnu-Mittre, 1974) ou Mitathal en Haryana (Willcox, 1989). *Triticum sphaerococcum* est l'espèce la plus anciennement cultivée et on trouve également *Triticum aestivum* (*vulgare*), l'espèce actuelle.

L'orge (*Hordeum vulgare*), plus résistant à la sécheresse que le blé, était cultivé dès 2300 av. J.-C. et durant toute la protohistoire. On en retrouve des graines à Harappa, à Mohenjo-Daro, à Kalibangan au Rajasthan au cours de la période qui s'étend de 2090 à 2075 av. J.-C. (Agrawal, 1986) et en abondance sur les cinq sites étudiés en Haryana.

Les céréales dites secondaires, les "petits mils" comme le mil pénicillaire ou *bajra* (*Pennisetum typhoides*), l'éleusine ou *ragi* (*Eleusine coracana*) ou comme le sorgho ou *jowar* (*Sorghum vulgare*), mieux adaptés que le maïs ou le riz à des conditions pluviométriques insuffisantes, soit par un cycle de végétation court, soit par une utilisation économique de l'eau, et pour ces raisons, typiques des régions sèches à très sèches, semblent de tradition moins ancienne. Ils apparaissent en effet plus tardivement dans les niveaux archéologiques. Le sorgho aurait été importé plus anciennement que les autres et diffusé progressivement au Rajasthan ; on en retrouve dès 1550 av. J.-C. sur le site d'Ahar et il est abondant durant la période kushane (150 - 50 av. J.-C.) (Agrawal, 1986).

D'origine indienne, le riz est peu répandu à l'époque harappéenne. Il apparaît peu dans la vallée de l'Indus, davantage au Bihar et au Gujarat. On en retrouve des fragments dans les échantillons de sédiments prélevés dans le site de Mitathal en Haryana. Il est assez exigeant vis-à-vis de l'approvisionnement en eau. C'est pourquoi l'irrigation est indispensable à sa culture dans des milieux semi-arides, et il restait au siècle dernier encore, limité à quelques secteurs favorables.

Les légumineuses d'hiver, lentilles (*Lens culinaris*), pois (*Pisum arvense*) et ambérique ou chana (*Vigna radiata*), sont présentes dans les sites harappéens de la vallée de l'Indus (Vishnu-Mittre, 1974 b). On n'en a trouvé aucune trace en revanche sur les cinq sites étudiés en Haryana -absence qui, comme le souligne Willcox (1989) ne peut cependant pas être considérée comme significative en raison du petit nombre de sites étudiés-. Sur ceux-ci, ils semblent être remplacés par des espèces indigènes, d'été, le gram noir (*Vigna mungo*) et le horse gram (*Dolchis biflorus*), que l'on rencontre aussi dans des niveaux pré-harappéens au Pendjab (Saraswat, 1985 in Willcox, 1989) et fréquemment dans les sites chalcolitiques, plus tardifs (Kajale, 1988 in Willcox, 1989).

Les plantes oléagineuses sont relativement rares dans les niveaux archéologiques. Le sésame ou til (*Sesamum orientale*), cultivé en hiver, pour les graines, et la moutarde ou le colza (Brassica), en été pour l'huile uniquement, étaient connues durant la protohistoire (Allchin, 1971).

Actuellement culture commerciale, le coton enfin, était déjà cultivé dans la vallée de l'Indus durant toute la période harappéenne (*ibid.*).

• Utilisation

Les plantes cultivées sont destinées en premier lieu à l'alimentation des hommes, qu'il s'agisse de cultures vivrières de base comme celle du blé, du *bajra*, du *gram*, et des lentilles ou secondaires comme le *moth* (*Phaseolus aconitifolius*), une sorte de haricot. Beaucoup d'entre elles, le blé, les millets ou le *gram* par exemple, ont une double utilisation, une partie de la plante servant aussi de fourrage. D'autres espèces, comme le *methi* (*Trigonella foenum-graecum*), la luzerne, le *gowar* (*Cyanopsis tetragonoloba*), et l'orge, sont strictement réservées à l'alimentation des troupeaux de vaches, buffles, chèvres, moutons, chameaux et chevaux. Enfin, certaines cultures sont pratiquées à des fins commerciales, qu'elles soient très anciennes comme celle du coton et du colza ou plus récentes comme celle du tabac, introduit à la fin du siècle dernier par les Britanniques.

- **Le calendrier agricole**

Le calendrier agricole est déterminé par les exigences écologiques des plantes, exigences qui varient selon leur origine. Elles se répartissent ainsi en deux groupes distincts (Willcox, 1989). Les plantes tropicales, plantes indigènes domestiquées ou africaines, dont la période végétative correspond à la saison des pluies, sont des cultures d'été, dites *kharif*. Ces plantes (sorgho, *bajra*, éleusine ou coton notamment), ont une croissance très rapide de trois ou quatre mois. A l'opposé, les plantes originaires de milieux tempérés, du Proche Orient, introduites dans des régions climatiquement hostiles, sont des cultures d'hiver, leur germination ayant lieu à l'automne et leur floraison au printemps. Ces cultures, le blé, l'orge, le *gram*, les pois ou les lentilles, sont dites *rabi*.

Kharif ou *rabi*, la date des travaux agricoles est traditionnellement étroitement liée à la répartition des pluies dans l'année et à la quantité des pluies d'une année sur l'autre. C'est pourquoi elle varie aussi beaucoup localement. Ainsi, le calendrier est plus fluctuant dans la région de Bahawalpur que dans celle de Hisar, ce qui constitue peut-être une forme d'adaptation à une sécheresse plus marquée. La période des semailles des cultures *kharif* s'y étend parfois sur quatre à cinq mois, alors qu'elle est concentrée sur deux mois seulement, dans la région de Hisar. Dans le Rajasthan sec, (Bose *et al.*, 1965), les champs sont débroussaillés et désherbés durant les mois de mai et juin, pour recevoir les cultures *kharif*. Ils sont labourés dès les premières pluies en juillet, une à trois fois selon les espèces semées. Dans l'Haryana, plus humide, les labours ont lieu en règle générale trois semaines avant l'arrivée des pluies, en juin ; les semailles avec les premières pluies, début juillet (fin avril, début mai pour le coton), et les récoltes à l'automne, entre septembre et décembre (Tabl. 8).

Les champs qui recevront des cultures *rabi*, cultures d'hiver, sont préparés en septembre et labourés en octobre. Les semailles ont lieu après les pluies, en octobre ou novembre, et les récoltes en mars-avril.

- **Double récolte**

Une double récolte, *kharif* et *rabi*, sur un même champ, n'est possible que si les rythmes de croissance des plantes sont compatibles et les conditions climatiques favorables. Elle n'est généralement pratiquée que sur les terres irriguées. En effet, les semailles des cultures *rabi*, conditionnées par la nécessité d'un sol encore humide, ont lieu avant que les cultures *kharif* ne soient récoltées. Or la période de croissance des plantes diminue d'environ deux mois lorsque les terres sont irriguées. Une double récolte est dans ce cas possible.

Tabl. 8 : Le calendrier agricole dans la région de Hisar et dans celle de Bahawalpur

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Hisar (Précipitations)	16	13	13	9	16	39	110	112	66	10	3	12
Bhadra (Précipitations)	12	10	9	5	9	33	130	102	58	8	2	5
Blé												
Orge												
Barsem												
Gram												
Methi												
Colza												
Moutarde												
China												
Sorgho												
Bajra												
Riz												
Maïs												
Gowar												
Sésame												

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Bahawalpur (Précipitations)	6	6	11	6	5	6	49	38	8	2	2	3
Blé												
Orge												
Gram												
Pois												
Moutarde												
Tabac												
China												
Navet												
Concombre												
Sorgho												
Bajra												
Riz												
Maïs												
Gowar												
China												
Sésame												
Canne à sucre												
Coton												

 Semaillages
  Maturation
  Récoltes

• La rotation des cultures

Traditionnellement, on ne porte que très peu d'attention à la rotation des cultures et aux jachères ; on prend peu soin du sol. Les superficies mises en repos chaque année dépendent uniquement des pluies et des besoins des agriculteurs, c'est pourquoi les situations peuvent être différentes d'un village à un autre. S'il pleut, les terres sont cultivées de façon continue, en général jusqu'à épuisement, puis abandonnées (*Gazetteers*, 1884, 1908, 1909, 1916). On ne dispose d'aucune donnée sur ce point pour la protohistoire.

De même, les terres sont peu ou pas engraisées, exceptés les jardins ou quelques terres irriguées, le plus souvent celles où sont semées les cultures *rabi*. Aucune preuve de l'utilisation d'engrais durant la période harappéenne n'a pu être mise en évidence sur les sites (Weber 1991, p. 31).

2.6. Les limites des enseignements donnés par l'archéologie

• Une agriculture productive ?

D'après les données archéologiques dont on dispose actuellement, rien ne permet d'affirmer que l'agriculture était sûre et productive aux époques anciennes et en particulier durant la protohistoire. Rien n'indique non plus réellement qu'elle ait dû l'être.

Le nombre de sites ne témoigne que d'un certain type d'occupation de l'espace, il n'est pas significatif de l'importance ni de la densité de la population. Il est reconnu par ailleurs (Thapar, 1982, p. 12) qu'aucun critère ne permet de différencier, parmi les sites harappéens, les villes des villages, excepté peut-être la superficie et l'existence de monuments tels qu'une citadelle ou des fortifications. Le matériel archéologique n'offre aucune indication sur ce point et comme l'écrit Thapar (*op. cit.*), "les différences se situent davantage sur le plan de la quantité que de la qualité". Or, nous soulignerons que moins de 5% des sites ont fait l'objet de sondages et encore moins nombreux sont ceux qui ont été fouillés. Aucune donnée ne nous permet donc d'évaluer les besoins des populations installées dans les deux secteurs étudiés.

D'après les données paléobotaniques obtenues sur un certain nombre de sites, les cultures d'hiver et en particulier le blé et l'orge auraient constitué la base de l'économie agricole durant la protohistoire. Ce fait n'a pu être vérifié dans le secteur de la paléo-Hakra où, nous l'avons dit, aucune recherche paléobotanique n'a encore été effectuée. Il l'a été en revanche dans la région de Hisar, en dépit de la pauvreté du matériel étudié (Willcox, 1989). Selon G. Willcox, étant donné les conditions climatiques, ce type de culture ne pouvait être qu'associé à la pratique de l'irrigation. Nous analyserons plus loin ce point, mais nous pouvons déjà souligner que cette affirmation ne paraît confirmée ni par les l'examen des conditions climatiques, ni par celui des pratiques culturelles actuelles. Nous l'avons vu, la culture des céréales d'hiver, y compris celle du blé, est en effet non seulement possible, mais actuellement également pratiquée sans que l'on ait recours à l'irrigation artificielle. Les conditions climatiques dans la régions de Hisar ne sont pas telles que cette culture soit impossible, une à deux pluies d'hiver étant souvent suffisantes. Nous avons vu qu'elles peuvent être abondantes certaines années ; tout au plus peut-on dire que les récoltes ne sont pas sûres. Il resterait à définir jusqu'à quel point elles doivent l'être, ce qui dépend des besoins des populations et par conséquent de leur importance et de leur capacité à stocker les récoltes. On manque par ailleurs d'information concernant les variétés cultivées

aux époques anciennes, leur résistance à la sécheresse, leurs rendements, si ce n'est que *Triticum sphaerococcum*, retrouvé sur les sites, est un blé primitif, endémique du Pendjab, à épi court et résistant (on ne sait dans quelles proportions) aux déficits hydriques (Haudricourt *et al.*, 1943). Il ne faut pas non plus négliger le rôle des autres espèces qui constituaient le cortège des plantes cultivées, ni celui de celles qui sans être cultivées, étaient néanmoins utilisées (Weber 1991, p. 29)

Les informations dont on dispose pour la période historique récente donnent l'image d'une agriculture plutôt archaïque, tant sur le plan de l'outillage, que sur celui des pratiques culturelles et de la production.

Il nous semble -ce travail s'attachera à le montrer- que l'histoire de l'occupation humaine de la région a été envisagée sur des bases dont la signification a été un peu surestimée. C'est sous le jour de beaucoup *d'a priori* qu'ont été émises nombre d'hypothèses.

• Hypothèses

Plusieurs schémas, que nous examinerons tour à tour dans les sections suivantes, ont été proposés. 1/ Les pluies, en particulier celles d'hiver, auraient été à l'époque protohistorique plus abondantes qu'elles ne le sont actuellement. Les variations temporelles de la densité des sites dépendraient des phases d'humidité ou au contraire d'aridité marquées. 2/ Le peuplement aurait été riverain de grands fleuves ou rivières alimentés par des pluies très abondantes ou par la fonte saisonnière des neiges himalayennes. L'assèchement brutal ou progressif de ces cours d'eau, dont l'existence est attestée par celle de paléovallées, serait à l'origine de migrations de populations (marquées par l'abandon temporaire ou définitif de certains sites) vers des secteurs plus accueillants. Les variations spatiales et temporelles du peuplement seraient ainsi liées à l'assèchement de ces cours d'eau. 3/ Sous un climat peu différent de l'actuel, l'occupation protohistorique de la région aurait été rendue possible par le recours à l'irrigation, comme en Mésopotamie ou en Asie centrale à la même époque. Les canaux, dont l'alimentation aurait été assurée par la Yamuna à l'est ou le Sutlej à l'ouest, auraient été les ancêtres du réseau actuel et le peuplement associé à de grands travaux de mise en valeur de la région.

3. LA QUESTION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

La première hypothèse formulée en 1931 par Aurel Stein, puis la même année par John Marshall, pour tenter d'expliquer les conditions dans lesquelles s'étaient développées les villes et villages dont les vestiges venaient d'être mis au jour dans la vallée de l'Indus, supposait que le climat était alors, il y a quatre mille ans, plus humide qu'il ne l'est actuellement. Le déclin de la civilisation de l'Indus fut mis en relation avec une

aridification du climat. Cette théorie fut approuvée par d'autres archéologues, Stuart Pigott (1950) et Mortimer Wheeler (1953), pour qui les animaux (buffles, crocodiles, éléphants, tigres ou rhinocéros) représentés sur les sceaux harappéens, la quantité considérable de bois qui avait été nécessaire à la cuisson des briques, le système de drainage qui fut mis au jour et les traces d'une agriculture extensive témoignaient d'un environnement marqué par des conditions climatiques plus humides (Meher-Homji, 1973).

En 1961, l'hydrologue L. Raikes et l'archéologue R. H. Dyson, ainsi que l'anthropologue W. A. Fairervis, reprirent un à un ces arguments pour conclure qu'aucun d'eux n'attestaient des conditions plus humides durant la période harappéenne. Les ripisylves d'acacia, *prosopis* ou *tamarix* qui bordent l'Indus et que l'on rencontre aussi dans les régions où les précipitations sont maigres, pouvaient, selon eux, fournir, comme c'est le cas actuellement, le combustible nécessaire à la cuisson des briques. Les plantes fossiles n'étaient pas par ailleurs typiques d'une forêt humide (Chowdhury et Ghosh, 1951). Selon Agrawal (1971 *in* Meher-Homji, 1973), les animaux représentés sur les sceaux sont caractéristiques des régions de savane ou de forêt claire et non forcément des régions humides. Enfin, selon Raikes et Dyson (1961), le système de drainage retrouvé à Mohenjo-Daro ne serait même pas suffisant pour faire face à une courte période de pluies intenses, et ne constituerait donc pas non plus un argument en faveur des changements climatiques.

En 1971, Gurdip Singh (Singh, 1971 puis Singh *et al.*, 1972) relança le débat en apportant de nouveaux arguments en faveur de la théorie des changements climatiques, fondés non plus cette fois sur les seules données archéologiques, mais sur des analyses polliniques de sédiments prélevés dans trois lacs salés situés au Rajasthan, à Sambhar (27°N 75°E), Didwana (27°20N 74°35E) et Lunkaransar (28°30N 73°47E). G. Singh identifie ainsi quatre phases climatiques durant l'Holocène.

I - Avant 8000 av. J.-C : Aridité très marquée.

II - ca. 8000 - 7500 av. J.-C : Phase humide. Les précipitations sont supérieures d'au moins 250 mm à ce qu'elles sont actuellement au Rajasthan occidental.

III - ca. 7500 - ca. 3000 av. J.-C. : Une légère baisse des précipitations est indiquée au début de la phase III. La sécheresse est cependant moins importante qu'actuellement.

IVa - ca. 3000 - ca. 1800 av. J.-C. : Augmentation soudaine et considérable de l'humidité. Les précipitations moyennes annuelles seraient alors supérieures d'au moins 500 mm aux actuelles dans la zone la plus sèche.

IVb - ca. 1800 - ca. 1500 av. J.-C. : Courte période sèche. Non synchrone d'un lac à l'autre: elle apparaît autour de 2000 av. J.-C. à Lunkaransar, autour de 1000 av. J.-C. à Sambhar.

IVc - ca. 1500 - ca. 1000 av. J.-C. : Période caractérisée par un léger retour à une tendance plus humide.

V - Des premiers siècles apr. J.-C. à nos jours : Les formations sont datées, en l'absence de datations C14, par l'estimation du taux de sédimentation.

L'assemblage pollinique reflète plus ou moins les conditions actuelles, "a typical sand formation".

Ainsi, selon G. Singh, l'essor de la civilisation de l'Indus et sa prospérité auraient été contemporains d'une phase climatique caractérisée par des conditions nettement plus humides qu'actuellement (phase IVa). De même, la mise en place de conditions plus arides autour de 1800 av. J.-C. (phase IVb), aurait participé à l'affaiblissement de la culture harappéenne dans les secteurs arides et semi-arides. La période sèche entre 2000 et 1000 av. J.-C. serait "responsable du large vide culturel entre le déclin de la culture harappéenne et le début de celle de la céramique grise peinte (PGW) généralement situé entre 1000 et 600 av. J.-C."¹ (Singh *et al.*, 1974, p. 498-99).

Les analyses de G. Singh donnèrent lieu à de nombreux débats. Elles furent tout d'abord contestées avec vigueur par Vishnu Mittre (1974a), qui souligne que les plantes -*Cyperaceae* et *Artemisia*- prises en compte par Singh comme des indicateurs d'humidité, sont au contraire, significatives de conditions arides, de même *Mimosa rubiculis*, et la presque totalité des arbres et arbustes représentés dans le spectre pollinique, *Acacia*, *Prosopis*, *Capparis* et *Tamarix*. Les données actuellement disponibles témoigneraient plutôt selon lui en faveur de l'absence de changements climatiques majeurs depuis 5000 ans.

De la même façon, V. M. Meher-Homji (1980) remarque que les espèces utilisées par Singh ne sont pas réellement de bons marqueurs de conditions arides ou humides. Il note qu'il est paradoxal de trouver associées au même endroit *Calligonum*, ou *Prosopis cineraria*, typiques de la zone aride, et *Syzygium*, typique de la zone humide, dans le spectre pollinique du lac de Lunkaransar. Aucune des plantes identifiées ne pourrait être considérée selon lui comme caractéristique de conditions climatiques humides : *Artemisia*, *Maytenus*, *Mimosa*, *Oldenlandia*, *Cyperus*, seraient plutôt de bons indicateurs de conditions marginales, le développement des *Cyperaceae* par exemple, pouvant être particulièrement bon dans les régions sèches les années de pluies abondantes. Enfin, si la phase humide avait duré deux millénaires, comme le suggère G. Singh, les espèces de la forêt décidue des Arawalli auraient dû faire leur apparition dans la région de Sambhar, alors qu'elles sont inconnues dans son spectre pollinique (Meher-Homji, 1980).

Sans prendre en compte ces critiques, sans même y répondre, R. A. Bryson et A. M. Swain (1981) prolongèrent les travaux de G. Singh, en appliquant aux assemblages polliniques fossiles obtenus dans deux carottes prélevées dans le fond des lacs de Lunkaransar et de Didwana, une fonction de transfert qui met en relation pluies polliniques et conditions climatiques actuelles. Leur reconstitution de l'histoire des précipitations dans les environs du lac de Lunkaransar, "ne suggère pas seulement des précipitations d'été beaucoup plus

¹ "responsible for the wide cultural gap between the decline of the harappan culture and the beginning of the succeeding Painted Grey Ware Culture, generally put between 1000 et 600 B. C. "

abondantes qu'actuellement, mais met aussi en évidence des précipitations d'hiver maximales durant la période harappéenne entre 5000 et 3500 ans B. P." ¹ (*op. cit.*, p. 138) : 5000 - 3500 ans B. P. : Précipitations d'été doubles des actuelles ; précipitations d'hiver maximales.

Autour de 3500 ans B. P. ; 3600-2000 ans B. P. : Période sèche.

Les précipitations d'été auraient ainsi été deux fois plus importantes durant la période harappéenne qu'actuellement. Rien ne prouverait cependant selon eux que cette augmentation ait été soudaine et significative comme l'avait suggéré G. Singh (phase IVa). Les taxons *Syzygium*, *Pinus* et *Artemisia*, considérés par ce dernier comme représentatives d'un environnement relativement humide étant, selon Bryson et Swain, corrélés positivement avec les pluies d'hiver davantage qu'avec celles d'été, cette période aurait connu, sinon une augmentation globale des pluies annuelles, du moins des pluies d'hiver -les plus importantes dans une économie reposant sur les cultures *rabi*- bien supérieures à ce qu'elles sont actuellement.

La rapide salinisation des lacs autour de 3700 B. P. , puis leur assèchement, la réactivation des dunes suggérant une réduction significative du couvert végétal, auraient coïncidé avec la disparition de la culture harappéenne. Celle-ci serait donc bien liée à la ruine d'une économie reposant sur l'agriculture, ruine dont un changement climatique serait la cause. Les conditions seraient restées ensuite pendant longtemps défavorables à l'occupation humaine, la culture de la céramique grise peinte n'apparaissant que quelques sept siècles plus tard, et en général hors des sites harappéens.

Cette longue période sèche aurait pris fin aux alentours de 2000 B. P. Les pluies polliniques enregistrées dans le lac indiquant alors, après traduction en quantités de pluies saisonnières, une mousson d'été moins abondante de moitié par rapport à ce qu'elles étaient avant la période de sécheresse, et des pluies d'hiver négligeables, les quantités maximales étant enregistrées entre 700 et 1100 ans B. P., plus ou moins les erreurs d'interpolations entre les datations (Bryson et Swain, 1981).

Les travaux de R. J. Wasson, G. I. Smith et D. P. Agrawal (1984), fondés sur les données géochimiques fournies par deux nouvelles carottes prélevées dans le lac de Didwana, semblent confirmer le schéma paléoclimatique proposé par Bryson et Swain. Aux alentours de 6000 ans B. P., les données indiqueraient une augmentation des pluies d'hiver. L'apparition de conditions plus salines témoignerait d'une réduction des précipitations : de celles d'été à partir de 5000 ans B. P., de celles d'hiver, à partir de 4000 ans B. P.

Selon M.-A. Courty (1990, p. 284) pourtant, les interprétations sédimentologiques qui sous-tendent les déductions paléoclimatiques de Wasson *et al.*, "apparaissent tendancieuses"

¹ "suggest not only far more summer rainfall than the present but maximum winter precipitation as well during the Indus Culture interval of 5000 - 3500 yr B.P."

"en l'absence d'une étude approfondie restituant l'évolution morphologique de la dépression de Didwana". L'examen détaillé des caractères des formations superficielles dans le bassin de la Ghaggar (Haryana) permettrait ainsi plutôt, selon Courty (*ibid.*), --nous y reviendrons plus loin- de conclure, non pas à "une augmentation considérable des précipitations régionales", mais à une "humidité micro-régionale plus importante que l'actuelle."

Cette brève synthèse des principales théories émises à propos de l'évolution climatique holocène dans cette région du nord-ouest de l'Inde témoigne de la difficulté qu'il peut y avoir à trouver des indicateurs fiables et réellement significatifs des variations, à les resituer dans le temps, et à évaluer leur ampleur.

Les critiques formulées par V. Mittre ou par V. M. Meher-Homji quant à la représentativité des taxons considérés par G. Singh, puis par Bryson et Swain, comme diagnostiques, peuvent être renforcées à l'aide d'autres travaux palynologiques dans d'autres régions, travaux dans lesquels *Artemisia* notamment est toujours considérée comme un indicateur de sécheresse (voir notamment Van Campo (M.), 1984 ; Bottema *et al.*, 1981 ; Rossignol-Strick *et al.*, 1989). Quoi qu'il en soit, et étant donnée la grande variabilité des précipitations dans l'espace (cf. § I.1.), la représentativité des données issues d'échantillons prélevés en deux ou trois lieux peut être mise en doute. On émettra aussi quelques réserves quant à la signification même des données palynologiques dans la région étudiée alors que ne sont pas connus et surtout que ne sont pas quantifiés les effets possibles des périodes de sécheresses prolongées (§ I.1.) sur la composition des pluies polliniques. Quels sont les seuils à partir desquels une plante est sur- ou sous-représentée ? Combien de temps les plantes mettent-elles à répondre à des variations climatiques ? A partir de quels seuils de représentation de certaines espèces peut-on parler d'une aridification et d'un véritable changement climatique ? Ces problèmes ne sont pas évoqués.

Si, par ailleurs, les enregistrements polliniques sont considérés comme révélateurs de la quantité des précipitations tombées en un lieu, nous avons vu (§ I.1.) que cette quantité moyenne n'est pas, elle, réellement représentative des conditions climatiques régnant en ce point. Comme le remarque Meher-Homji (1980), la variabilité interannuelle des précipitations étant élevée dans les milieux arides et semi-arides, l'évaluation des phases arides et humides en termes de moyennes pluviométriques tels que pratiquées par Singh *et al.* ou par Bryson et Swain, n'est pas vraiment significative. De plus, la même quantité de précipitations tombées en un jour ou deux ou bien répartie sur plusieurs mois n'aura pas le même effet. "*It would be interesting to know the amount and duration of precipitation needed to bring about a geomorphological change corresponding to a humid phase*". La quantité des précipitations enregistrées en un point n'est pas forcément significative de leur impact sur l'environnement ou sur les modalités de l'occupation humaine.

Il semble donc, d'après Vishnu-Mittre (1974 a), Pande (1977), Thapar (1977), Sharma (1977), Lal (1977), Meher-Homji (1980), Misra (1984), Courty (1990), sur la base d'arguments archéologiques, palynologiques, géomorphologiques, géologiques ou pédologiques, que l'hypothèse d'une brusque et forte augmentation des précipitations durant la période harappéenne ne puisse être attestée, aucun de ces auteurs n'excluant par ailleurs des fluctuations climatiques mineures. Les données archéologiques elles-mêmes ne s'accorderaient pas avec la théorie du déterminisme climatique. Misra (1984) notamment, remarque que la culture harappéenne ne s'est pas développée uniformément sur les 800 000 km² sur lesquelles elle a laissé des traces, pas plus que sur le millier d'années qu'a duré son histoire. La civilisation de l'Indus, son essor, son déclin, ont pris selon les lieux des formes quelque peu différentes, ce que Singh ou Bryson et Swain ne prennent pas en compte dans leurs conclusions. Selon Misra, l'absence de sites harappéens sur les plaines fertiles du Rajasthan occidental ou du nord du Gujarat montre que même si, effectivement, cette région avait connu une augmentation des précipitations autour de 3000 av. J.-C., cela n'aurait pas constitué un facteur déterminant pour rendre ces terres attractives. Il faut donc se tourner vers d'autres facteurs pour expliquer la répartition des installations humaines dans le nord-ouest du sous-continent indien à l'époque harappéenne. De même, la thèse climatique n'est plus considérée comme suffisante pour expliquer le déclin de la civilisation de l'Indus (Jarrige, 1977).

Il est de toute façon difficile de savoir à partir de quels seuils, les variations climatiques ont une incidence sur l'occupation humaine.

La plupart de ceux qui ne prêtent pas foi aux hypothèses mettant en jeu d'importants changements climatiques, ainsi qu'une partie de ceux qui y croient, voient dans la présence de grandes rivières -maintenant asséchées- l'explication incontestable de la présence d'établissements humains aux époques anciennes dans la région de Hisar comme dans celle de Bahawalpur.

4. LA QUESTION DE L'HYDROGRAPHIE

4.1. Rivières pérennes himalayennes

L'Indus et ses affluents, alimentés comme la Yamuna -affluent du Gange- par un haut bassin humide, les glaciers himalayens puis le piémont, et arrivant dans des régions sèches, sont des fleuves et rivières allogènes (Fig. 19). Ils ne sont que partiellement modifiés par les conditions de sécheresse. Celle-ci se manifeste surtout par une diminution du débit, des collines des Siwalik aux plaines semi-arides et arides, les pertes par évaporation et

infiltration étant importantes et les apports affluents plus faibles. Ces paramètres sont difficilement mesurables dans la mesure où le régime et le fonctionnement de ces cours d'eau ont été modifiés par les nombreux aménagements qui visent à régulariser le flux, réduire les crues, et fournir davantage d'eau à l'irrigation.

Ces rivières, bien que pérennes car alimentées à la fois par la fonte des neiges au cœur de la chaîne himalayenne et par des précipitations particulièrement abondantes sur le piémont (> 1500 mm), n'en ont pas moins un débit sujet à d'importantes fluctuations saisonnières et mensuelles:

- 62 % des eaux du Sutlej sont concentrées sur les trois mois pluvieux (juillet à septembre),
- 23% entre avril et juin,
- 9% entre octobre et décembre, et
- 6% de janvier à mars.

Le débit est faible en hiver et augmente progressivement à mesure que l'on s'approche de l'été, moment de la fonte des neiges dans la partie supérieure du bassin : le premier pic est enregistré à partir de mai. Le début de la saison des pluies, fin juin ou début juillet, est marqué par un second pic. Les crues s'achèvent en octobre. Même les mois caractérisés par un débit moyen élevé sont soumis à de fortes variations des débits journaliers.

4.2. Cours d'eau saisonniers de piémont

Allogènes, les cours d'eau de piémont, comme la Ghaggar, ou la Markanda et son affluent la Saraswati ou la Chautang, de moindre importance encore, le sont aussi, mais leur dynamique est beaucoup plus considérablement modifiée par la sécheresse. Par suite de la combinaison d'un débit insuffisant, qui chute considérablement au sortir de la zone des collines, et d'un long parcours en région sèche, ces rivières, situées entre le Sutlej et la Yamuna, n'arrivent pas à atteindre la mer et ont un écoulement saisonnier (Fig. 19).

La Ghaggar par exemple, prend sa source dans les Siwalik et traverse le district d'Ambala (en Inde). A une centaine de kilomètres en aval, ayant reçu les eaux de tous ses affluents, elle entre dans le territoire de Patiala ; c'est déjà alors un cours d'eau saisonnier. A Otu, à proximité de Bikaner (Rajasthan), un barrage fut construit à la fin du XIX^e siècle pour collecter ses eaux de crue et les redistribuer dans les canaux d'irrigation. Mais les eaux de la Ghaggar ne permirent alors d'irriguer qu'une mince bande de terre proche de la rivière et s'étendant sur environ 50 km à l'ouest, car l'eau disponible chaque année variait énormément avec les pluies de mousson (Stein, 1942, p. 173). Comme les autres cours d'eau de ce type, nombreux entre le Sutlej et la Yamuna, la limite extrême de son écoulement n'est pas fixe. Elle dépasse rarement la ville d'Hanumangarh, actuellement à la frontière indo-pakistanaise. La Chautang est un autre de ces cours d'eau inondant largement la plaine environnante lors de la saison des pluies, mais elle ne dépasse pas Dhatrut dans le district de Jind (Haryana). Il en va de même de l'actuelle Saraswati ou de la Markanda, issues du

piémont qui sont largement utilisés à leur débouché des Siwalik pour l'irrigation des cultures *kharif*. Comme le signalait H. Frere en 1870, les cours d'eau qui descendent des collines étant situés à des altitudes très voisines, la plupart sont reliés entre eux par des chenaux artificiels ou naturels.

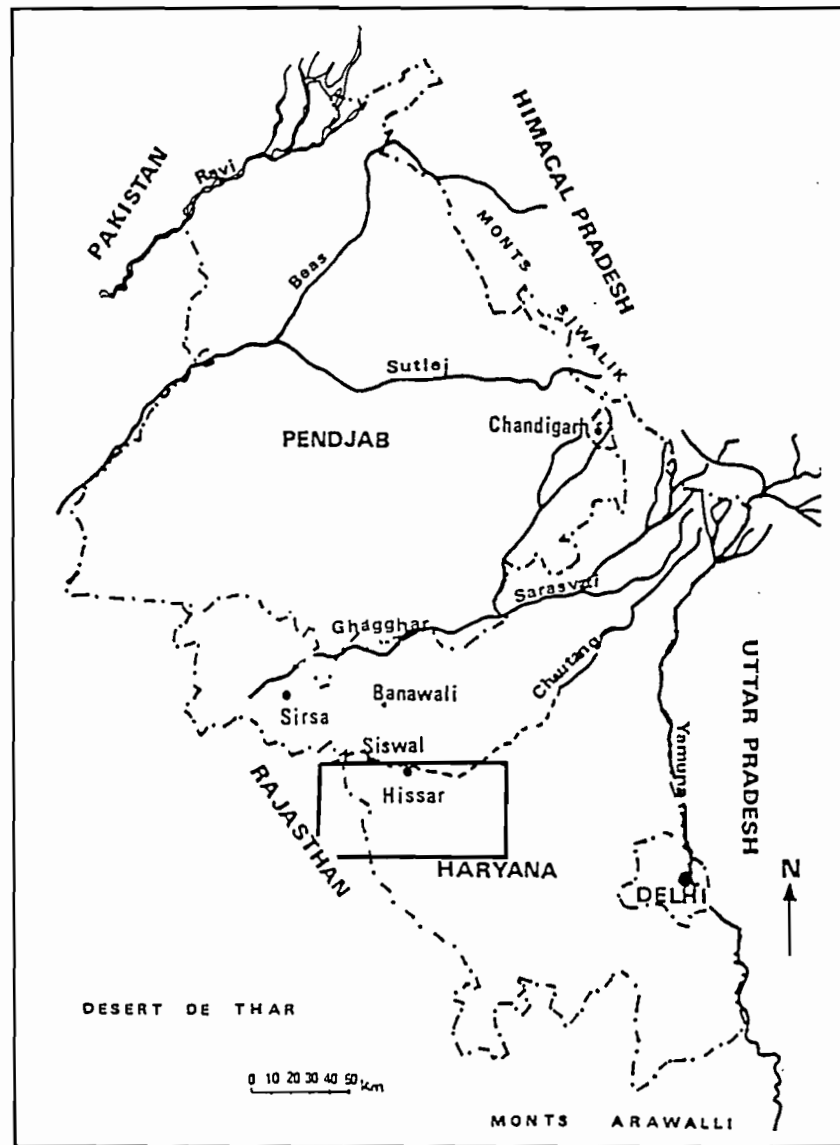


Fig. 19 : Le réseau hydrographique

Qu'ils soient originaires de la zone interne de l'Himalaya ou des collines des Siwalik, ces cours d'eau de piémont n'atteignent pas les secteurs étudiés. Quant aux écoulements locaux ou indigènes, ils sont rares. On ne peut confondre en effet avec un véritable écoulement fluvial, un possible ruissellement, même de grande ampleur, ou bien la stagnation des eaux après quelque grosse averse sur les surfaces argileuses, comme on a pu le voir au Cholistan (Photos 17 et 18) -rarement dans la région de Hisar-. Avec ce type d'écoulement, toute distinction topographique entre versants et talweg tend à s'effacer. La faiblesse des pentes (moins de 0,1%) ne permet en général aucune forme de concentration, sauf au pied des dunes où les eaux n'échappent pas longtemps à l'infiltration et à l'évaporation.

Les lits-reliques sont souvent trop anciens et leurs formes trop peu marquées pour véritablement servir de guide à l'écoulement actuel des eaux. Mais en raison d'une surface à texture souvent argileuse, les pertes par infiltration y sont retardées.

Cette quasi-absence d'eau en surface est apparue incompatible avec la présence pourtant réelle des sites archéologiques. Pour l'expliquer, on a donc mis leur histoire en relation avec celle des paléorivières.

4.3. Paléohydrographie et peuplement ancien

4.3.1. "Le roman de la Saraswati perdue" : une histoire ancienne

L'existence de paléovallées entre le Sutlej et la Yamuna -région qui constituait le Pendjab avant la partition de l'Inde- fut remarquée dès le XIX^e siècle par un certain nombre d'observateurs : ingénieurs britanniques du service de l'irrigation (Baker, 1840 ; Barns, 1872 ; Colvin, 1833), géographes (Reclus, 1883), membres du Geological Survey of India (Oldham R. D., 1886 ; Pascoe, 1919), agents politiques (Frere, 1870) ou militaires devenus historiens (Todd, 1829 ; MacLagan, 1885 ; Raverty, 1892 ; Oldham C. F., 1874, 1893). On lit ainsi dans E. Reclus (1883, p. 211) :

"toute la contrée du Pandjab est sillonnée du nord-est au sud-ouest de lits fluviaux, les uns emplis, les autres vidés complètement ou en partie, auxquels se mêlent çà et là des canaux artificiels que les crues ont transformés en courants vifs. Telle rivière a successivement appartenu à deux bassins différents ; telle autre, après avoir été la branche principale, s'est trouvée réduite en simple affluent".

Deux éléments de cette paléohydrographie retiennent plus particulièrement l'attention. L'une fut identifiée comme l'*ancien lit de la rivière Ghaggar* et l'autre, la *Hakra*, malgré les discontinuités du tracé, comme la partie aval de ce cours d'eau :

"bien que leur jonction n'ait pas été encore repérée (...), il n'y a pas de doute que ces deux lits ont été à l'origine continus (...)." (Oldham (R. D.), 1886)¹

Au sud de la Ghaggar, la dépression dite de la *Chautang* -du nom du petit cours d'eau qu'elle semble prolonger vers l'aval et dont elle serait l'ancienne vallée- était à cette époque plus rarement étudiée. Son existence était cependant reconnue et l'on signalait que le canal construit par Firuz Shah au XIV^e siècle (§ 5.1.) en empruntait le lit asséché (Colvin, 1833).

¹ *"although the connection of these two river beds has not yet been traced (...), there can be but little doubt that the two were originally continuous (...)"*

Sur les cartes topographiques du *Punjab Revenue Survey*¹ (*Bhawulpoor State*) à l'échelle du *one inch to one mile* (1/63360) publiées entre 1869 et 1875, les limites de la paléovallée, mentionnée comme *the old bed of the Hakra river*, sont tracées depuis Phoolra (actuellement Pulchra) à quelques kilomètres à l'est de l'actuelle frontière indo-pakistanaise, jusqu'à Derawar (Fig. 20 et 84 à 88). Ce tracé, qui sera étudié de façon détaillée au chapitre III, est reporté sur l'édition au *quarter inch -one inch to four miles* (1/253440)- publiée par le *Survey of India* en 1884-1915. A partir de Marot, il prend le nom de "*dry bed of Ghaggar river*" et on le suit dans l'Etat de Bikaner jusqu'à Sirsa. Sur les cartes plus récentes, publiées par l'*U. S. Army map service* en 1955, au 1/250 000, le cours de la Hakra est signalé, entre Dingarh et Derawar, mais non délimité. Aucune mention n'est faite en revanche de la "paléo-Ghaggar" sur les cartes indiennes (*Survey of India*) au 1/250 000 et au 1/ 50 000 de 1965-77. Le tracé de la Chautang n'apparaît quant à lui sur aucune de ces cartes, anciennes ou plus récentes.

Sur les rives de ces cours d'eau asséchés, les mêmes observateurs remarquèrent la présence de nombreux villages abandonnés -certains parlent de villes-, de buttes recouvertes de tessons de poteries, et de forts. Ils associèrent aussitôt l'histoire de ces vestiges à celles des cours d'eau : on considéra que l'existence même de ces établissements humains avait été déterminée par celle de la rivière, et leur ruine concomitante de son assèchement. Ils témoignaient, en des lieux arides, actuellement désertés et dont la mise en valeur reposait sur un système d'irrigation moderne, d'une époque où le peuplement était dense et sédentaire, et où l'agriculture étant pratiquée, l'eau devait être abondante et régulière. Une eau qui ne pouvait être fournie que par les rivières maintenant asséchées, dont les traces étaient visibles dans le paysage (voir par exemple : Frere, 1870 ; Barns, 1872 ; Login, 1872 ; Maclagan, 1885 ; Oldham (C. F.), 1893 ; *Gazetteers of Bahawalpur*, 1908 ; Ali, 1941 ; Pal *et al.*, 1980 ; Mughal, 1980 ; Agrawal, 1984). La sélection de tels sites pour l'implantation des villages ou des villes sembla même suggérer pour certains que la rivière était pérenne et navigable (Login, 1872 ; Deshmukh, 1872 : p. 13). On lit ainsi dans *la Géographie Universelle* de J. Sion (1929) :

"le Nord du désert était traversé par une route directe de Delhi à Moultan, bordée de villes prospères. Il paraît bien établi que cette prospérité était liée au passage d'une rivière capable d'atteindre la mer, sans doute vers le Rann de Catch, jusque vers le XIV^e siècle" (p. 301).

Par la suite, les "rivières se sont desséchées, "perdues", suivant l'expression populaire ; de vastes territoires, jadis peuplés, se sont changés en désert ; des dunes de sable, poussées

¹On trouvera les références des cartes en annexe.

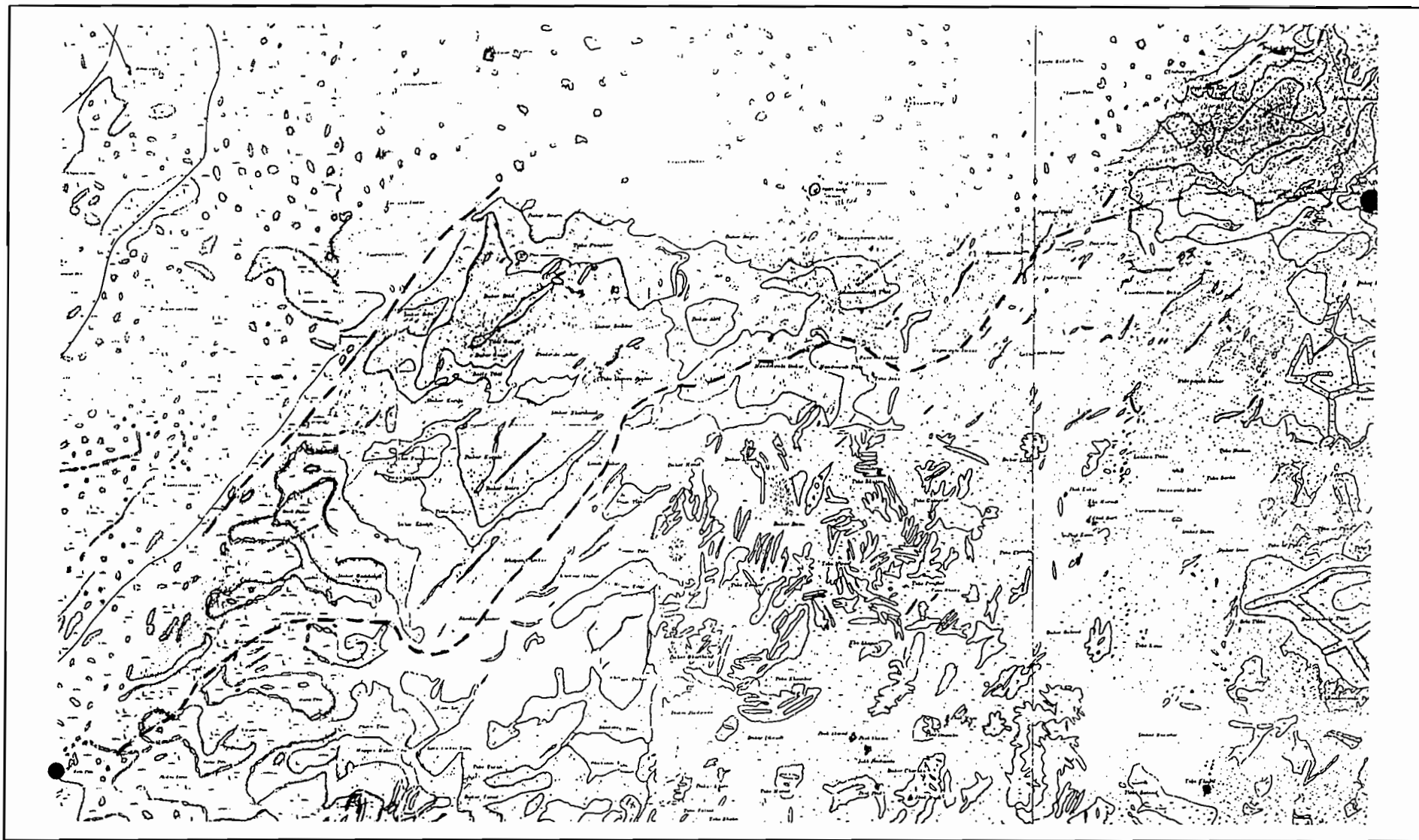


Fig. 20 : Les limites de "l'ancien lit de la rivière Hakra" entre Fort Derawar (● ouest) et fort Dingarh (● est) telles que représentées sur les cartes du Punjab Revenue Survey (Bhawulpoor State, 1876) au one inch to one mile. Extrait réduit : 1cm = 2,6 km)

par le vent ont englouti mainte cité dont on retrouve maintenant les édifices" (Reclus, 1883, p. 207). On ne connaissait pas encore l'ancienneté de ces vestiges et l'on fit ainsi remonter ce "tragique événement" à l'époque historique. On en rechercha les traces dans les sources littéraires, notamment les récits de voyageurs comme le chinois Xuanzang (VII^e s.), dans les livres d'histoire, la relation des conquêtes, celles d'Alexandre, dans les autobiographies ou encore dans les hymnes poétiques tels que le *Rig Veda* (ca. 1000 av. J.-C.) ou le *Mahabharata* (achevé vers le IV^e s.). A force de traductions, d'interprétations, de déductions, beaucoup d'auteurs, partant des mêmes textes parvinrent à des hypothèses totalement contradictoires.

Discutant des informations fournies par le *Rig Veda*, A. B. Keith écrit "*conclusions can be drawn only with much caution. It is easy to frame and support by plausible evidence various hypotheses, to which the only effective objection is that other hypothesis are equally legitimate, and that facts are too imperfect to allow of conclusions being drawn*" (The Cambridge History of India, 1922, vol. I : p. 78, in Woolner, 1931).

C'est cependant à partir de ces sources -celles qu'ils avaient à leur disposition- que la majorité des auteurs, H. G. Raverty (1892) en est un bon exemple, ont élaboré des théories pour expliquer la nature des changements hydrographiques, leurs causes et l'époque à laquelle ils s'était produits. La validité des conclusions qui découlent de ces analyses dépend alors de la version du récit dont dispose l'historien, mais aussi de son sens critique, de l'interprétation qu'il fera de noms de personnes ou de lieux maintes fois traduits, de la possibilité qu'il aura de distinguer l'impression subjective d'un voyageur de l'information géographique -impression qui, comme le souligne R. B. Whitehead (1932), dépend souvent simplement de la saison ou de l'année durant laquelle la région est visitée.

Nombreux sont ceux qui reconnaissent dans la paléovallée de la Ghaggar-Hakra, celle de la rivière *Saraswati*, mentionnée à plusieurs reprises dans les hymnes du *Rig Veda* ou dans le *Mahabharata*, et célébrée comme la plus sainte et "la plus belle des sept soeurs". *Pendjab* qui signifie les "cinq rivières" aurait succédé dans les écrits au nom de "*sapta sindhawah*", ou "sept cours d'eau". La *Saraswati* aujourd'hui "perdue" aurait donc coulé autrefois des montagnes à la mer, aux côtés de l'Indus et de ses cinq affluents, Chenab, Ravi, Sutlej, Jhelum et Beas, les surpassant par la taille et la rapidité. L'hypothèse d'une mauvaise identification fut rarement émise. Ainsi, pour C. F. Oldham (1893), il était tout à fait invraisemblable que la rivière sacrée ait perdu son identité ou que son nom et son caractère sacré ait été transféré sur un autre cours d'eau. Tout au plus s'interrogea-t-on sur l'exagération possible de certains qualificatifs, Maclagan (1885) par exemple, souligne qu'il s'agit après tout d'hymnes poétiques et non de rapports scientifiques. L'homonymie entre cette rivière puissante et le modeste cours d'eau qui, au sortir des collines des

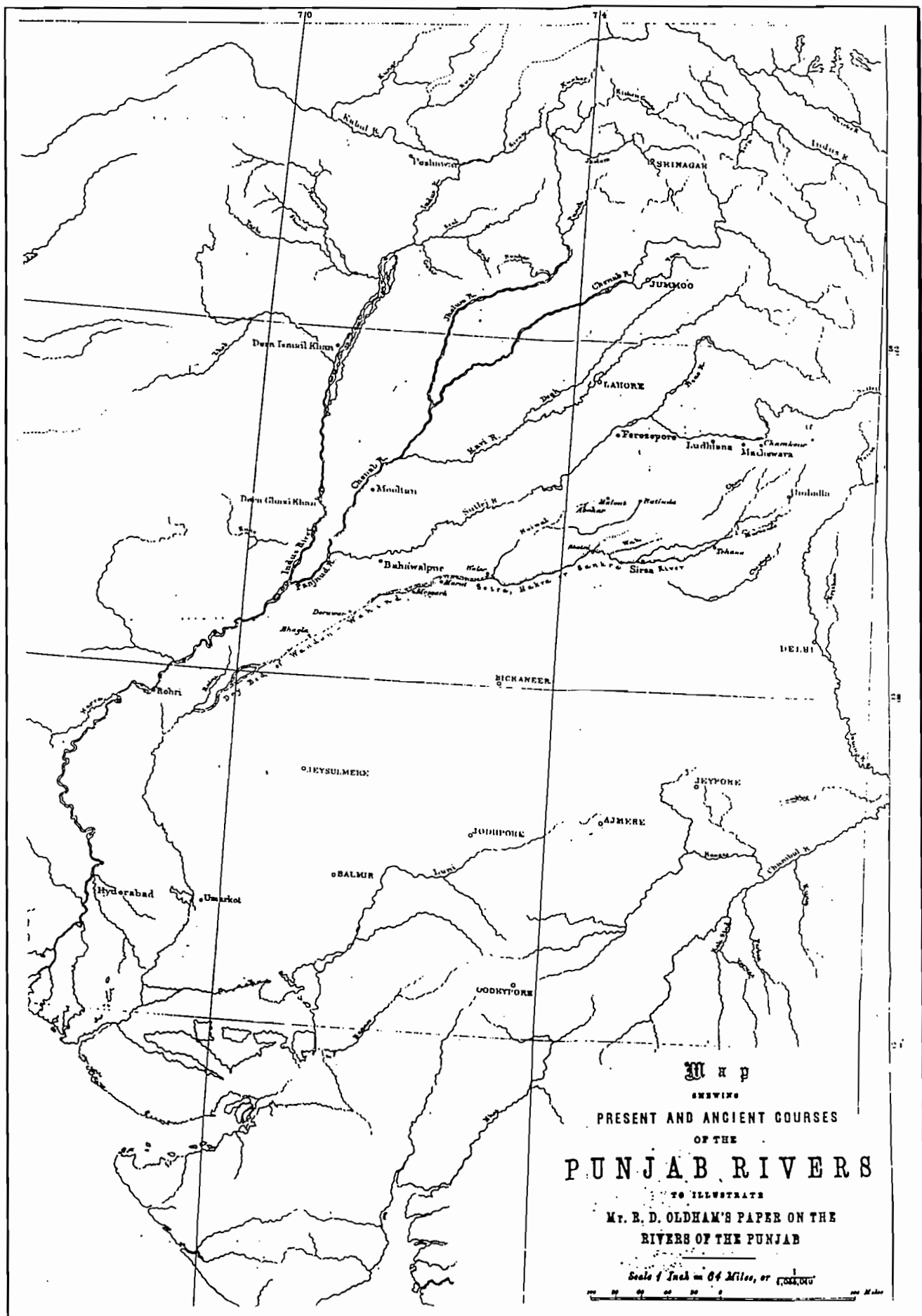


Fig. 21 : Les cours actuels et anciens des rivières du Pendjab selon R. D. Oldham (1886)

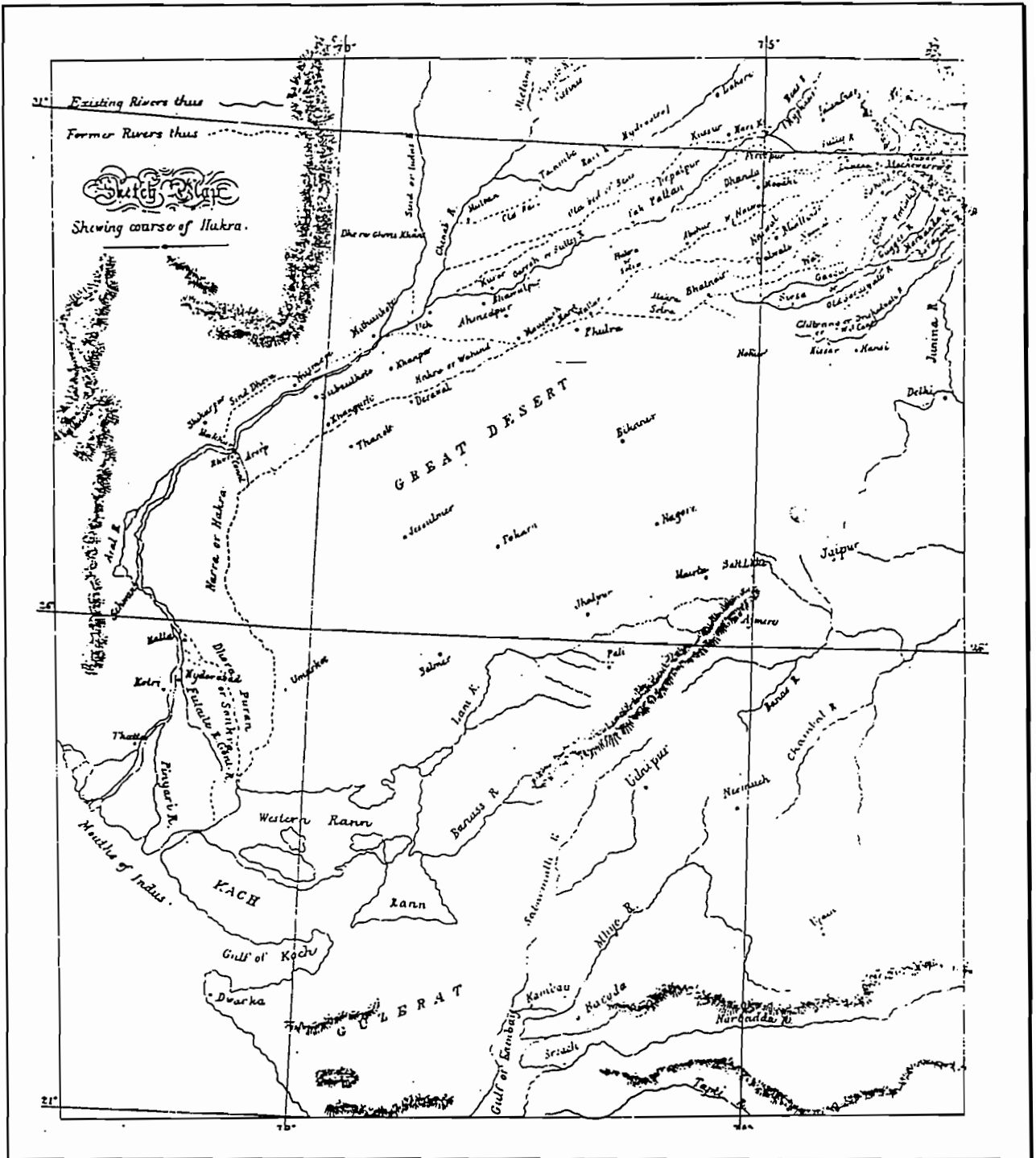


Fig. 22 : Les cours de la Hakra selon C. F. Oldham (1893)

Siwalik, se jette dans l'actuelle Ghaggar, fut considérée par certains comme un argument prouvant les liens qui existaient autrefois entre les deux cours d'eau. Mais pour beaucoup, la disproportion de taille existant entre ces actuelles rivières saisonnières, dont aucune n'atteint le Sutlej ou la Yamuna, et la vallée asséchée ou les descriptions de la Saraswati dans les textes anciens posait problème : comment expliquer une telle réduction du débit ? (Voir Oldham (R. D.), 1886 ; Dey, 1927, Law, 1963 ; Sharma, 1974 ; Spate *et al.*, 1967 ; Deshmukh, 1982 : p. 172-176.)

Qu'ils aient ou non identifié la Ghaggar-Hakra à la Saraswati des textes, beaucoup d'auteurs s'interrogèrent sur *les causes* de son assèchement.

L'hypothèse fut émise qu'un *changement climatique*, une importante diminution des précipitations, aurait entraîné l'assèchement de la rivière (Login, 1872). Mais on manqua d'arguments pour l'étayer. Ses détracteurs firent remarquer qu'une telle aridification aurait dû toucher aussi les autres rivières du Pendjab, ce dont on ne trouvait trace dans le paysage, et qu'aucun indice, hormis les vallées sèches, ne témoignait d'une phase climatique très humide antérieure à la période aride (Barns, 1872 ; Oldham (C. F.), 1893). Les textes anciens donnèrent lieu sur ce point à des interprétations contradictoires. C. F. Oldham (1893), trouva dans les *Veda* des références à des conditions climatiques sèches. Nearchus (1875) citant Cunningham (1871) conclut quant à lui, d'après un passage du *Mahabharata*, que la région de Hisar, de Bikaner et Jaisalmer aurait connu des pluies plus abondantes qu'actuellement. Les textes anciens et le *Mahabharata* signaleraient, selon Ghosh (1952), que la région était déjà un désert aux premiers siècles de notre ère.

Si la rivière ne s'était pas asséchée, si elle ne s'était pas perdue, elle ne pouvait alors, qu'avoir abandonné ce lit pour un autre. Ainsi, selon C. F. Oldham (1893), l'actuelle Saraswati, alimentée tout comme l'actuelle Ghaggar, par les seules pluies -certainement comparables aux actuelles durant toute la période historique- n'aurait pu être une grande rivière pérenne. Même en acceptant l'hypothèse d'une certaine diminution du débit due à des prélèvements pour l'irrigation par exemple, les eaux de la Saraswati et de la Ghaggar n'avaient jamais été suffisantes pour alimenter une aussi large vallée. Celle-ci sans aucun doute, avait donc été empruntée par l'une des grandes rivières pérennes, himalayennes : la Yamuna selon certains, le Sutlej pour d'autres, ou encore par l'une et l'autre.

C. F. Oldham (1874, 1893), qui fut l'un des premiers à s'intéresser de près à ces rivières, considérant les deux premières possibilités et la grande proximité des deux vallées, conclut que l'hypothèse la plus probable était que le *Sutlej* avait un jour emprunté le lit de la Hakra. Selon son analyse, la Yamuna appartenait quant à elle déjà au système du Gange à l'époque où furent composés le *Rig Veda* et le *Mahabharata*, (voir également: Oldham (R. D.), 1886 ; R. Raverty, 1886 ; Whitehead, 1932). Si cependant la Yamuna avait un jour alimenté la Hakra, cela aurait été selon lui par le chenal de la Chautang, la confluence entre les deux cours d'eau étant située près de Bhatnair (Fig. 22).

Ainsi, le Sutlej aurait été un fleuve indépendant, qui aurait reçu les eaux de deux affluents, la Ghaggar et la Saraswati (Oldham (C. F.), 1874, 1893), et se serait écoulé jusqu'à la mer (Oldham (R. D.), 1886 (Fig. 21)) ou se serait jeté dans la paléovallée appelée localement *Nara*, un ancien cours de l'Indus (Nearchus, 1875). La Ghaggar-Hakra se serait asséchée quand le Sutlej bifurqua vers l'ouest pour rejoindre le Beas. Cette hypothèse fut cependant

mise en doute, notamment par R. Maclagan (1885) pour qui de tels changements hydrographiques bien que possibles, n'étaient pas prouvés.

Certains, comme Chhibber (1949), ont discerné dans la présence des lits abandonnés une tendance générale des rivières du Pendjab à se déplacer vers l'ouest. Pour d'autres, comme Pascoe (1919), l'assèchement de la rivière aurait été provoqué par la capture, probablement durant la période historique, de la Yamuna par le Gange dans la partie supérieure du bassin, et du Sutlej par l'Indus dans sa partie inférieure.

"Sa situation entre deux grands bassins fluviaux, alors que son cours inférieur était gêné par les sables, l'exposait à des captures. (La Djamna, ou le Bias qui paraît avoir capturé la Satledj). Appauvrie, elle ne put conserver son cours à travers le désert" (Sion, 1929, p. 301).

D'autres encore n'y ont vu que la forme extrême d'un phénomène commun à toutes les grandes plaines alluviales, la défluviation des cours d'eau lors des crues (Maclagan, 1885).

La date de l'assèchement de la Ghaggar-Hakra a été située entre la période védique et celle du *Mahabharata* où l'on entend parler pour la première fois de la disparition de la Saraswati dans les sables (Oldham (R. D.), 1886 ; Oldham (C. F.), 1893 ; Seth, 1978 ; Ghose *et al.*, 1979).

Selon J. Todd (1829 *in* Gazetteers 1908, Bahawalpur), la dernière mention relevée dans les textes, d'une rivière en eau, remonterait au XI^e siècle apr. J.-C. La grande famine qui sévit dans la région au XII^e siècle aurait été consécutive à l'assèchement de la rivière, un siècle plus tôt, vers 1044. C. F. Oldham (1874), situe cet événement dans la première moitié du XIII^e siècle. Selon R. Raverty (1892) et R. B. Whitehead (1932), la Hakra, alimentée par le Sutlej, était encore une grande rivière en 1245, au moment de l'invasion mongole.

Sion (1929), fait par ailleurs remarquer qu'au début du XX^e siècle "l'évolution du réseau hydrographique n'est encore esquissée que par de rares historiens ou géologues et ceux-ci ne s'aident presque jamais des méthodes morphologiques."

4.3.2. De nouvelles bases, pour d'anciennes théories

La fouille des cités de l'Indus, de Mohenjo-Daro et de Harappa, en 1921 par John Marshall, puis de Kalibangan, notamment, et la datation des vestiges qu'elles livrèrent, fit remonter de plusieurs milliers d'année l'histoire de l'occupation humaine de la région, et par là même celle de son environnement. Les données archéologiques devinrent alors une nouvelle source d'information qui se substitua en partie aux documents écrits d'interprétation difficile et controversée. Elles furent complétées par d'autres, photographies aériennes, images satellitaires ou pollens anciens. Cependant, si ces nouvelles données modifièrent la

chronologie des événements telle qu'elle était proposée depuis plus de soixante ans, elles ne remirent pas fondamentalement en cause les anciennes théories. Elles y apportèrent plutôt de nouveaux arguments. L'ensemble des reconstitutions auxquelles archéologues et géographes se livrèrent reposait toujours en effet sur les mêmes postulats :

- 1/ La présence des sites archéologiques et autres vestiges anciens témoignait d'une occupation humaine très dense.
- 2/ Des apports d'eau réguliers et abondants étaient indispensables au maintien de ces villes et villages.
- 3/ L'eau était fournie, directement ou indirectement (irrigation) par les rivières dont les traces subsistent à proximité des sites.
- 4/ L'assèchement de tout ou partie de ces rivières avait entraîné la ruine et l'abandon de ces établissements humains.

Le géographe et archéologue Aurel Stein explora de décembre à mars 1941 le lit asséché de la Ghaggar-Hakra entre Hanumangarh et Derawar (Fig. 11). Il fut l'un des premiers à utiliser les données archéologiques pour dater les événements ayant marqué l'histoire de leur environnement, en particulier l'assèchement des rivières, et à étudier la répartition spatiale et temporelle des sites. D'après ses analyses, la rivière ne se serait pas asséchée d'un seul coup. Le Sutlej aurait alimenté le lit de la Hakra avant d'adopter son cours actuel, après la période harappéenne. Il identifia le chenal emprunté aujourd'hui par le *Hakra Branch canal* comme l'un des bras du Sutlej rejoignant la Hakra entre Walar et Binjor. De la même façon, le *desert branch canal* suivrait un chenal naturel reliant Sutlej et Hakra entre Kudwala et Lurewala. Stein crut déceler une concentration de sites harappéens à proximité et en aval de Fort Abbas. Il en déduisit que le peuplement avait été plus tardif en amont de ce point. Hormis cette dernière conclusion qui ne fut pas confirmée par les recherches ultérieures, Ghosh (1952) ayant découvert des sites harappéens à l'est de Fort Abbas, les analyses de Stein ne furent dans leur ensemble pas mises en doute.

Selon A. Ghosh (1952), les données archéologiques apporteraient la preuve de l'alternance, au cours des 3000 dernières années, de phases d'assèchement partiel des cours d'eau (à l'une d'elles aurait correspondu la culture de "la céramique grise peinte" peu représentée), et de périodes où les apports en eau étaient abondants, comme celle qui vit l'épanouissement des cultures harappéenne et Rang Mahal. Il écrit à propos de cette dernière : "il n'est pas invraisemblable (...) que la rivière ait à nouveau fonctionné dans la première moitié du 1er millénaire après J.-C."¹

K. N. Dikshit (1977) partage cet avis, l'alternance étant due selon lui à des mouvements tectoniques survenus dans le bassin du cours d'eau ou dans l'Himalaya. Malheureusement, aucun argument ne vient étayer cette hypothèse dont la base archéologique est en tout cas infirmée par B. M. Pande (1977) pour qui la configuration des sites dans la région, en

¹ it is not unlikely (...) that there was a partial resuscitation of the river-system in the first half of the first millennium A.D."

particulier près des rivières Saraswati/Ghaggar et Drishadwati/Chautang, ne met en évidence aucun changement majeur du réseau hydrographique, au moins depuis le III^e millénaire avant J.-C.

S'appuyant essentiellement sur l'examen des théories antérieures et des textes, H. Wilhelmy proposa en 1969 une reconstitution de l'histoire du bassin de la Ghaggar-Hakra-Saraswati (Fig. 23) selon laquelle une Yamuna et un Sutlej primitifs auraient utilisé l'un après l'autre le lit de la Hakra. Par capture ou déviation des cours supérieurs de la Yamuna et du Sutlej alimentés par les eaux de fonte de l'Himalaya, le système Hakra-Nara aurait perdu son autonomie à partir du VI^e siècle av. J.-C. Ayant cessé d'être un fleuve pérenne, il aurait continué d'être alimenté par les débordements de crue du Sutlej, abondants et réguliers. Cet apport aurait commencé à diminuer vers le milieu du XIII^e siècle et le chenal serait à sec depuis le début du XVI^e siècle. Ce schéma, qui ne s'appuyait sur aucune observation de terrain, fut discuté et Mughal remit en cause (1980), sinon les faits, du moins la chronologie des événements qu'il proposait.

B. Ghose, A. Kar et Z. Husain (1979) furent les premiers à s'appuyer sur l'interprétation d'images satellitaires. Il s'agissait d'images Landsat MSS (1972 - noir et blanc). Selon eux, la Saraswati aurait emprunté différents chenaux (Fig. 24), et la Luni rivière qui s'écoule au sud-est du Rajasthan, aurait été autrefois l'un de ses affluents (Ghose *et al.*, 1980). S'en étant séparée, elle aurait ensuite adopté un cours plus occidental à travers le district de Jaisalmer. Un nouveau mouvement vers l'ouest aurait amené le cours d'eau à l'emplacement de la Hakra. A la suite d'un autre déplacement vers l'ouest, elle ne déboucha plus dans le Rann de Kutch, mais dans le Sutlej près d'Amadphur East. Ce déplacement graduel de la rivière vers l'ouest serait essentiellement dû à l'avancée des sables et à l'aridité. Ces auteurs n'écartent toutefois pas non plus la possibilité de mouvements tectoniques de faible intensité.

L'article de Ghose *et al.* (1980) est selon Pal, Sahai, Sood, Agrawal (1980) plein de conjectures et d'hypothèses dont il est difficile, d'après leurs seuls arguments, d'évaluer la validité. Ces quatre auteurs ont utilisé eux aussi les données satellitaires (Landsat MSS, 1972-1977), mais arrivent à des conclusions différentes (voir également Sood and Sahai (1983), Agrawal (1984)). Pour eux, l'étude des images n'apporte pas la preuve de l'existence d'un paléochenal rejoignant la Luni. Un soulèvement d'origine tectonique aurait par ailleurs, selon leur analyse, forcé le Sutlej à abandonner son ancien cours, vers le sud, et à couler vers l'ouest, comme le suggère le tracé même de la rivière, marqué par un coude à angle droit. Cet événement aurait entraîné l'assèchement de la Ghaggar dont il était l'un des principaux affluents. Selon eux, les grandes rivières ayant leur tracé guidé par des lignes de faille, des mouvements tectoniques, même de faible ampleur, peuvent provoquer des changements majeurs dans le réseau hydrographique.

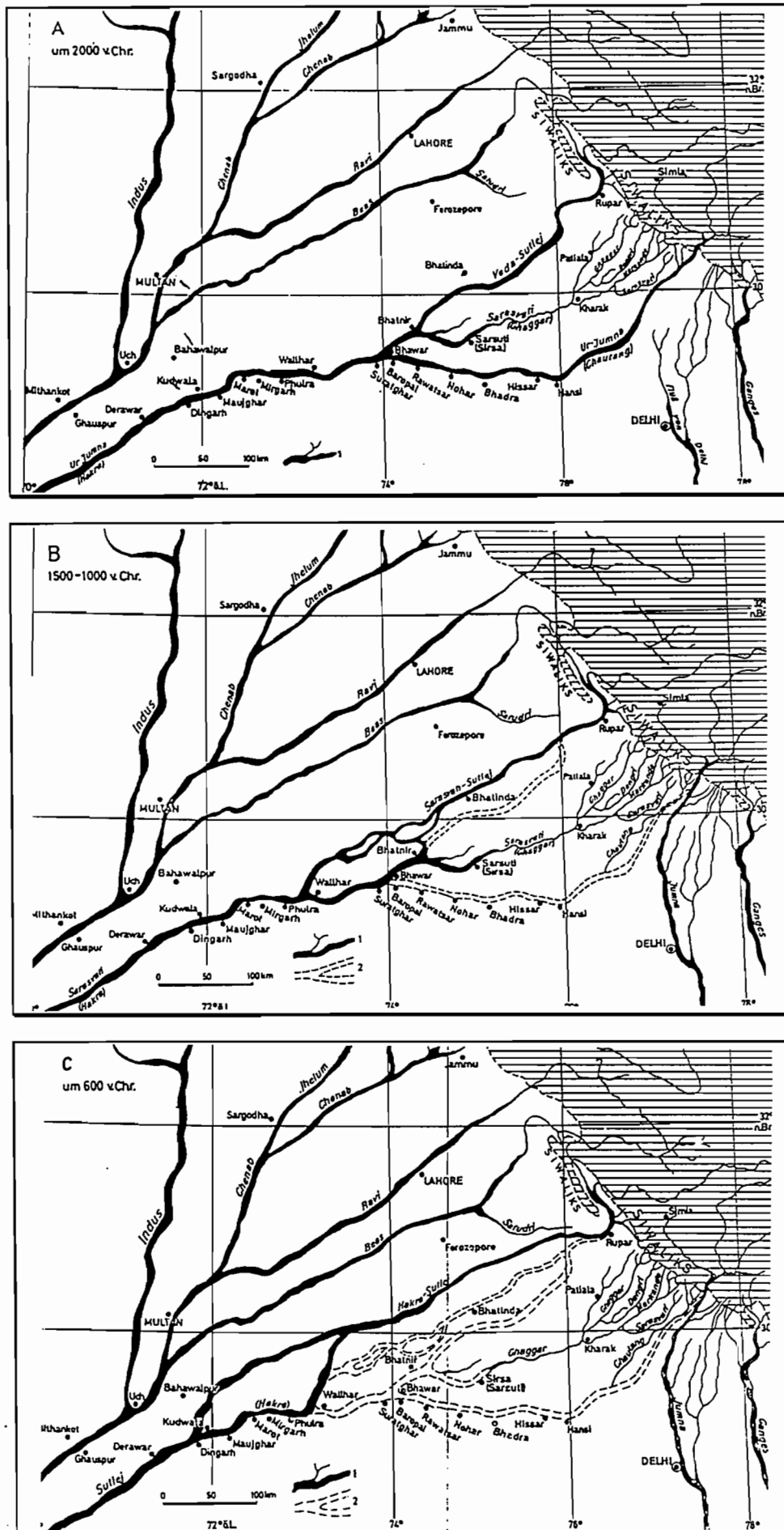
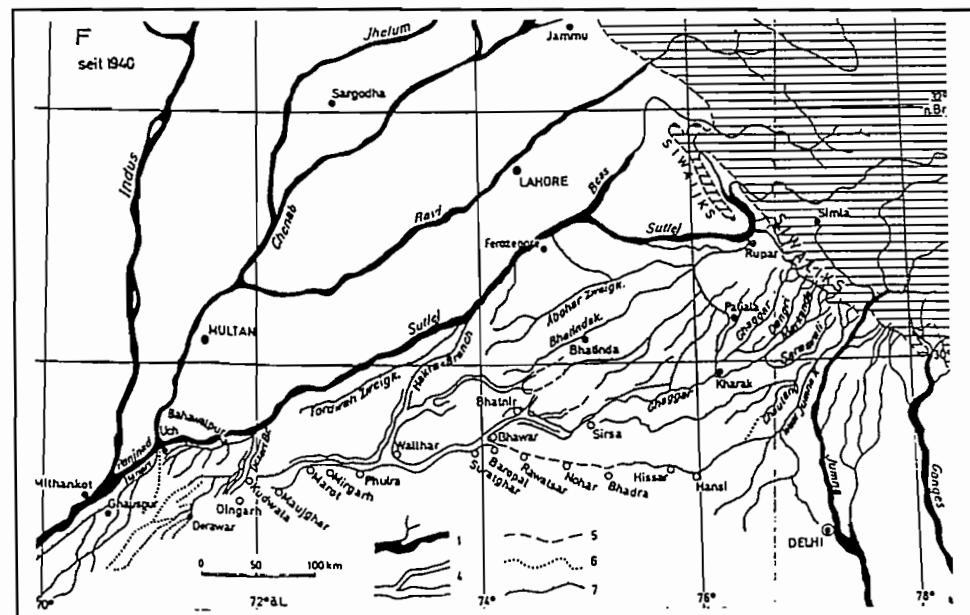
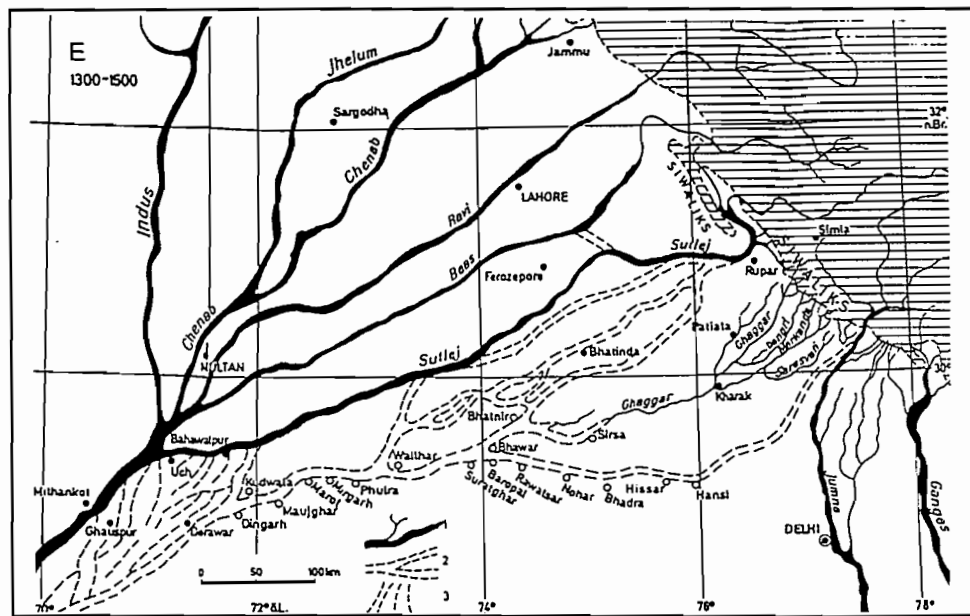
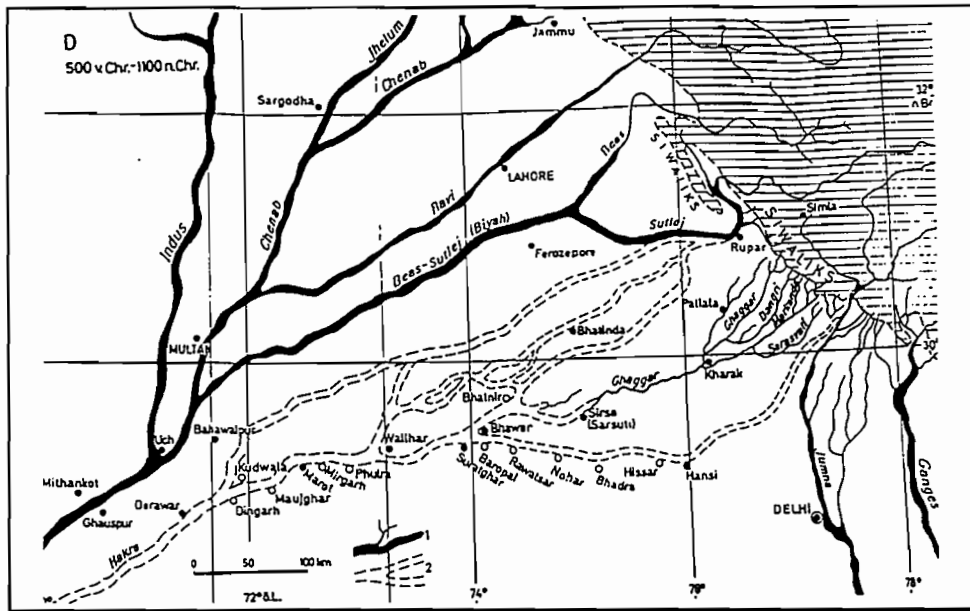


Fig. 23 : Reconstitution de l'Histoire du bassin de la Ghaggar-Hakra-Saraswati selon H. Wilhelmy (1969).



Les images confirmeraient par ailleurs l'hypothèse selon laquelle un affluent aurait rejoint la Ghaggar-Saraswati au sud de Patiala, en un point où la vallée passe soudain de 8 à 25 km de large. La Yamuna aurait pu contribuer à l'alimentation de cette rivière par ce chenal. L'histoire de la Yamuna, qu'une série de bouleversements tectoniques aurait déviée, quant à elle, vers le sud-est, aurait été marquée par trois épisodes. Un chenal "Y1" (Fig.25) aurait rejoint l'ancien lit de la Ghaggar, un chenal "Y2" aurait emprunté celui de la Chautang, le chenal "Y3" enfin, correspondrait au cours actuel de la Yamuna jusqu'à Delhi, puis reliait les petits lacs vers le sud-est, après Bharatpur, pour rejoindre finalement le Chambal. D'après les données archéologiques (Gupta *et al.*, 1977), ce dernier

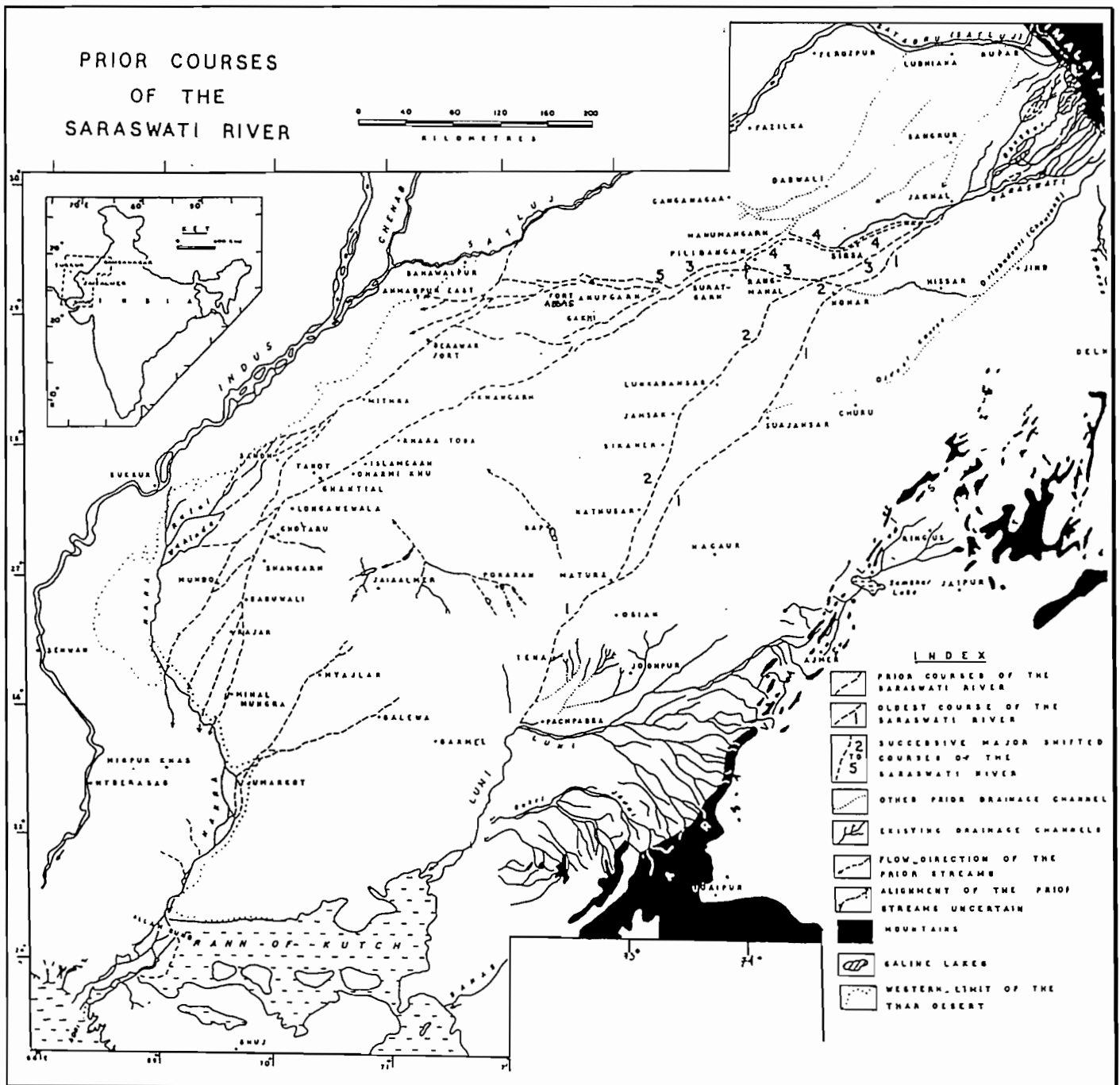


Fig. 24 : Les anciens cours de la Saraswati selon B. Ghose, A. Kar et Z. Husain (1979)

paléocours aurait été encore fonctionnel durant la période PGW (datée *ca.* 800-400 av. J.-C.), de même la Ghaggar durant les périodes pré-harappéenne (*ca.* 2500 - 2200 av. J.-C.) et harappéenne (*ca.* 2200 - 1700 av. J.-C.). Les données archéologiques qui permettraient de dater la Chautang ne seraient pas suffisamment précises, bien que selon ces auteurs, la présence de sites Harappéens anciens (*ca.* 1700-1000 av. J.-C.) le long de ce lit puisse être considérée comme une preuve de l'existence de la rivière à cette époque.

D. P. Agrawal (1984) fait cependant remarquer qu'une étude géomorphologique et sédimentologique des paléo-chenaux serait nécessaire si l'on veut obtenir des datations précises.

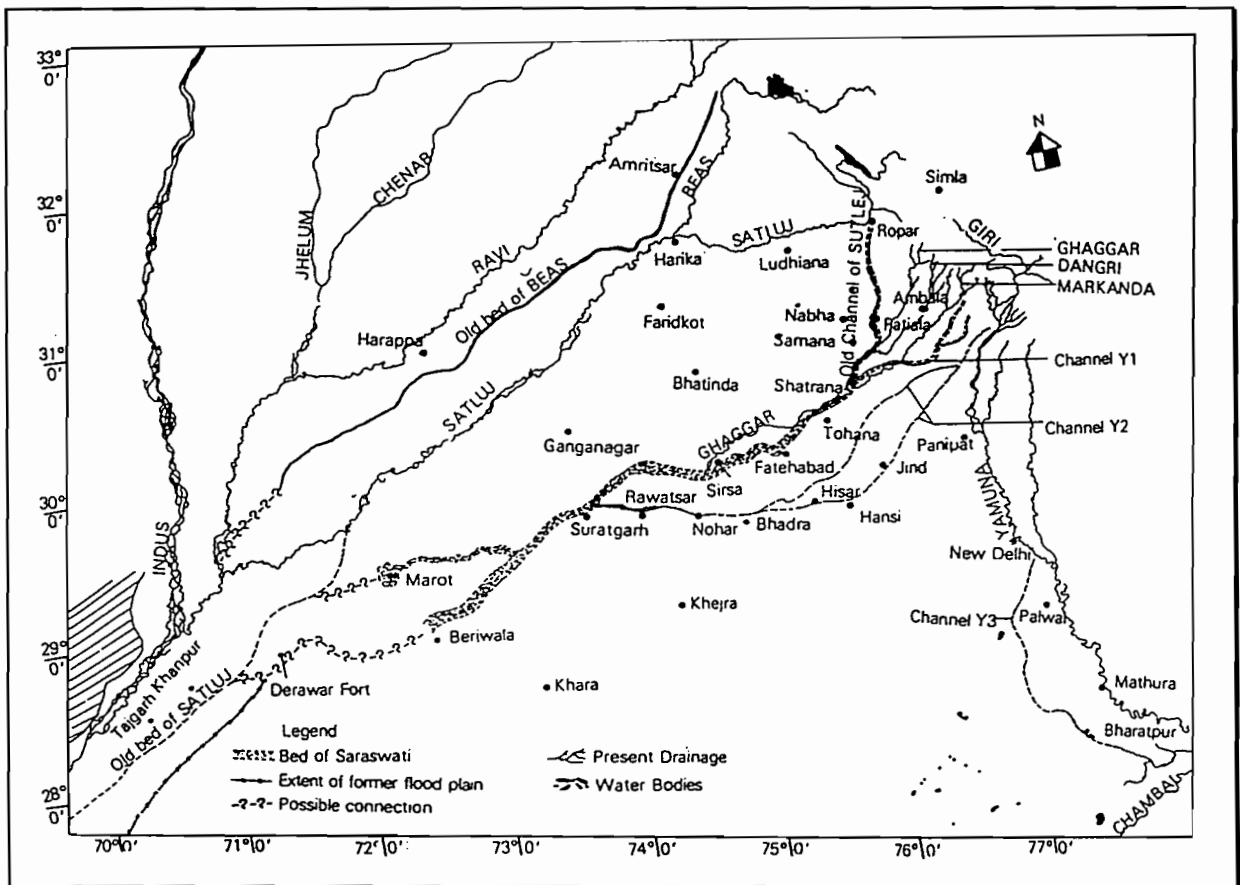


Fig. 25 : Le tracé de la Ghaggar-Sarawat selon Pal, Sahai, Sood et Agrawal (1980)

M. R. Mughal (1980, 1981, 1982), à qui l'on doit le recensement systématique et l'étude des vestiges anciens le long de la Hakra (§ 3.3.1.), a tenté lui aussi, toujours sur la base des seules informations archéologiques, de reconstruire les étapes de l'évolution hydrographique de ce secteur. Ses hypothèses seront discutées aux chapitres III et IV, nous n'en évoquerons ici que la teneur.

La Ghaggar-Hakra aurait été une grande rivière indépendante débouchant dans le Rann de Kutch, et alimentée depuis au moins le IV^e millénaire par le Sutlej et la Chautang. La capture de la Chautang par la Yamuna, qui aurait pris son cours actuel vers 2500 av. J.-C.,

aurait entraîné une réduction de son débit entre Fort Abbas et Kudwala et par conséquent une migration des populations vers le cours supérieur de la rivière et de ses affluents, au nord et au nord-est du Cholistan, où l'eau était toujours disponible de façon pérenne ou saisonnière.

A la même époque, le chenal qui reliait la Hakra au Sutlej vers Wallar, l'actuel canal *Hakra branch* (signalé par A. Stein, (1942)) se serait asséché. L'autre chenal, situé en aval (également indiqué par Stein), serait lui, resté fonctionnel et aurait ainsi permis aux hommes de se maintenir au bord d'une rivière, pérenne en aval de Kudwala entre 2500 et 1500 av. J.-C (Fig. 26). Selon Wilhelmy, ce chenal aurait été emprunté par le Sutlej lui-même, selon Stein, par un de ses bras.

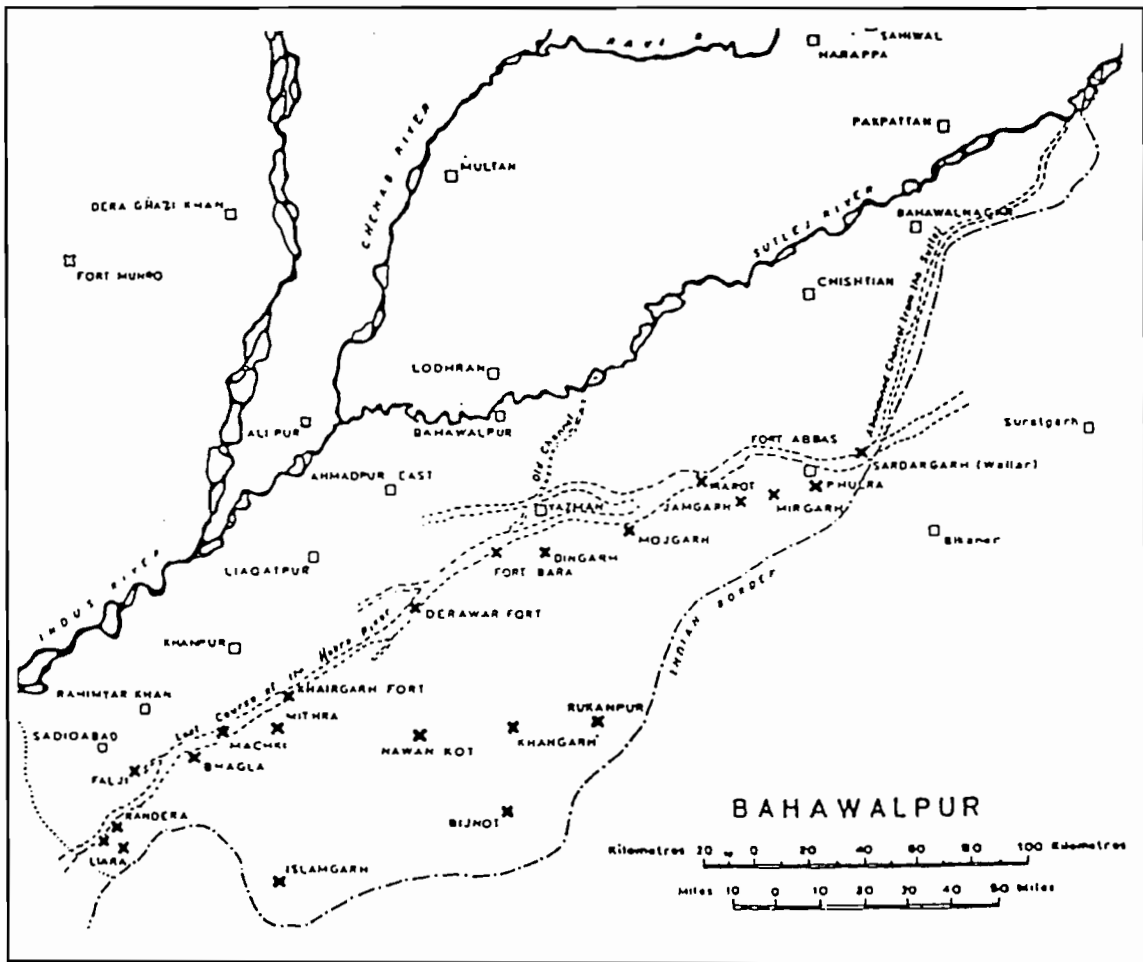


Fig. 26 : Le "cours perdu de la Hakra" selon M. R. Mughal (1980)

Du fait de la capture du Sutlej par le Beas sous l'effet de mouvements tectoniques, autour de la moitié du second millénaire av. J.-C. -phase harappéenne tardive-, la rivière n'eut plus qu'un approvisionnement pluvial. D'où l'assèchement de la totalité de la Hakra et la désertion de la région.

Le point de vue de B. K. Thapar (1984) est encore différent. Selon lui, la destruction des forêts et le surpâturage dans le piémont himalayen, qui sont à l'origine d'une augmentation considérable de l'érosion, pourraient avoir entraîné une surélévation des lits en amont, elle-même à l'origine de phénomènes de défluviations locales et de changement de cours.

4.3.3. Les données géomorphologiques et sédimentologiques et la remise en cause des théories antérieures

L'hypothèse d'un changement d'orientation récent de la Yamuna a été infirmée par l'analyse géomorphologique de P. Gentelle (1985). Celui-ci note en effet qu'"à son débouché dans la plaine aux environs de Faizpur, la Yamuna est enfoncée dans un système de terrasses fluviatiles" (Fig. 27). La plus basse est située à 2-3 m au-dessus du lit majeur de la rivière, une deuxième à environ 5 m au-dessus du lit actuel et une troisième à 11 m. Dans ces conditions, les hypothèses antérieures selon lesquelles la Yamuna aurait changé de cours au III^e millénaire, et plus encore au I^{er} millénaire, ne sont plus admissibles. Un autre argument souligné par P. Gentelle va dans le même sens : "la ligne de partage de eaux entre le système du Gange et celui de l'Indus, passe bien au large du cours actuel de la Yamuna, puisque cette limite suit approximativement un axe situé immédiatement à l'est de Jhanesar, Jind et Sirsa. /Et on ne trouve pas de trace de lit correspondant à la vigueur de l'écoulement actuel de la Yamuna, à plus forte raison à un écoulement qui aurait eu lieu il y 5000 ans" (*op. cit.*, p. 37-38).

Cette analyse est confirmée par celle des caractères des formations superficielles, étudiées dans le bassin de la Ghaggar (Haryana) à l'aide des méthodes de la micromorphologie des sols par M.-A. Courty (1985, 1990). Les données sédimentologiques qu'elle a recueillies, notamment par des relevés stratigraphiques et des prélèvements systématiques dans une cinquantaine de puits, lui ont en effet permis de remettre en cause les fondements des hypothèses antérieures selon lesquelles, les rivières himalayennes (Sutlej ou Yamuna) auraient à différentes époques emprunté les paléochenaux de la Ghaggar ou de la Chautang. Elle conteste les arguments de R. L. Raikes (1968) (voir aussi Bhan, 1975), qui considère que les sédiments -des sables gris- trouvés actuellement dans le lit de la Yamuna sont comparables à ceux prélevés à 11 m de profondeur, dans celui de la Ghaggar à Kalibangan au Rajasthan.

Selon M.-A. Courty, on peut affirmer que les cours d'eau asséchés, notamment les plus importants, comme la Ghaggar/Saraswati et la Chautang/Drishadwati, "appartiennent à un réseau hydrographique de piémont dont la période de fonctionnement maximal date du début de l'Holocène (Courty, 1990, p. 137). Une datation C14, obtenue dans la région de

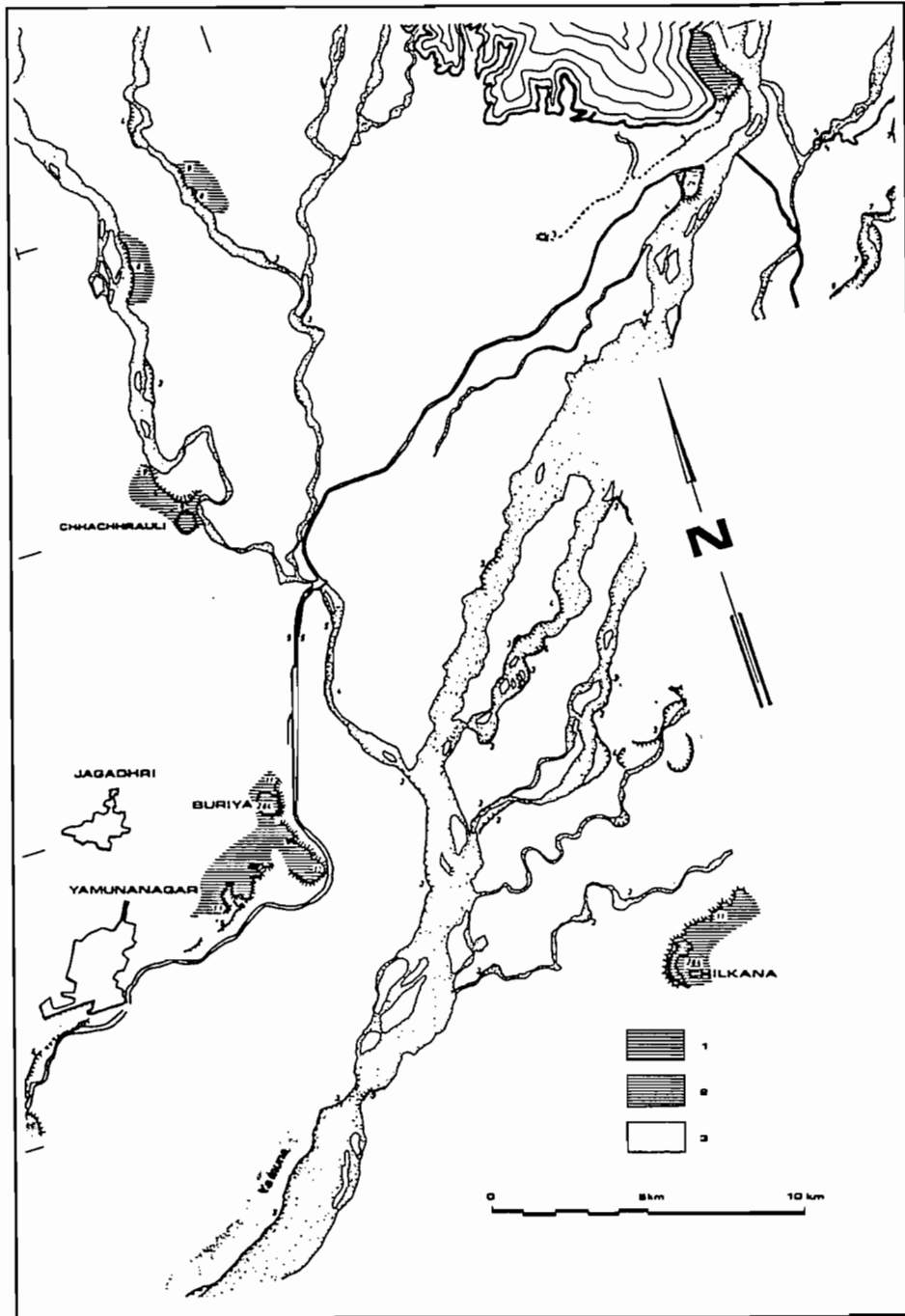


Fig. 27 : Les terrasses de la Yamuna à son entrée dans la plaine de Delhi.
1- terrasse de 25 m. 2- terrasse de 5 m. 3- terrasse de 3 m. (P. Gentelle, 1985)

Bhiwani (Haryana), fixe cette période autour de 10500 B. P. et jusqu'à 7000 B. P. Toujours selon M.-A. Courty, ce ne sont pas les régions semi-arides qui auraient subi une augmentation importante des précipitations, mais plutôt la zone collinaire (impluvium), où elle serait consécutive à un rétablissement du régime de circulation des moussons du sud-ouest et à leur renforcement (*op. cit.*, p. 290).

Cette période aurait fait suite à une phase d'aridité marquée, dont la datation proposée, sur la base d'une estimation du taux de sédimentation (*op. cit.*, p. 133), est fixée en l'absence de données chronologiques absolues, entre 20000 B. P. et 12500 B. P. La période d'aridité maximale, qui correspond au dernier maximum aride, se situerait autour de 18000 B. P. Cette phase marquée par la réduction considérable des précipitations, aurait été caractérisée par l'envahissement généralisé, par des sables éoliens, des plaines alluviales édifiées au cours des périodes précédentes.

La période qui s'étend entre 12500 et 10500 B. P. (datations C14), aurait été marquée par un accroissement des précipitations sur la zone interne de l'Himalaya, comme le montre selon M.-A. Courty "la reprise soudaine des alluvionnements d'origine himalayenne" (*op. cit.*, p.135) reconnue dans le bassin de la Ghaggar uniquement. "L'absence d'une contribution régulière du piémont /.../ à ces alluvionnements" serait la preuve de son aridité durant cette période (*ibid.*).

Cette situation aurait pris fin autour de 10500 B. P. (datation C14), les apports alluviaux originaux du piémont himalayen ayant, par suite d'une augmentation des précipitations dans cette zone, pris le pas sur "les apports directs d'origine himalayenne /qui/ ne contribuent plus directement à l'édification de la plaine dans la région étudiée" (*op. cit.*, p. 136).

A partir de 7000 B. P. environ, et jusqu'à l'actuel, ces apports alluviaux de piémonts auraient diminué progressivement, à la suite d'une réduction graduelle des apports en eau sur la zone collinaire (*ibid.*).

De même qu'elles réfutent l'existence de liens entre la Ghaggar et la Chautang, ainsi qu'entre la Ghaggar et le réseau hydrographique des Arawalli (en particulier la Luni), les analyses de M.-A. Courty concluent ainsi qu'"au moment de l'installation des populations protohistoriques au début du III^e millénaire, la plaine n'était parcourue que par de rares chenaux sinueux et étroits, dérivés des piémonts, bénéficiant d'une mise en eau surtout pendant la saison des pluies" (*op. cit.*, p. 296).

Nous reviendrons sur ces conclusions aux chapitres III et IV où nous les confronterons à notre propre analyse.

Etant établi que, durant la protohistoire, de grandes rivières pérennes n'avaient pu fournir aux établissements humains anciens l'eau nécessaire à leur maintien, certains auteurs ont émis récemment l'hypothèse de l'existence, dans la région de la Chautang en particulier, d'une grande irrigation apportant l'eau depuis les grands organismes fluviaux himalayens.

5. CULTURE PLUVIALE OU IRRIGUÉE ?

5.1. Les vestiges archéologiques

Aucune trace matérielle de canaux d'irrigation remontant à la protohistoire n'a pu être mise en évidence à ce jour dans le secteur oriental de la région, comme dans celui de Bahawalpur. Par trace matérielle, nous entendons ces longs bourrelets, vestiges des déblais

évacués chaque année lors des curages (Photos 3, 4, 5) et qui peuvent signaler encore aujourd'hui dans le paysage la présence d'un ancien canal abandonné (Gentelle, 1985).

Les traces les plus anciennes remontent au Moyen Âge. C'est ainsi que l'on peut suivre depuis Hisar en direction de l'ouest, le tracé d'un canal -connu par ailleurs grâce aux textes, persans ou britanniques- creusé au milieu du XIV^e siècle par l'empereur Firuz Shah Tugluk pour alimenter en eau la région où il se rendait à la chasse. L'eau était prélevée à une distance de 160 km, dans la Yamuna, et empruntait différents paléochenaux naturels dès la partie amont de son tracé, puis à partir de Hisar, la dépression de la Chautang (Colvin, 1833) (Fig. 28). Ce canal ne semble pas avoir selon Colvin (*op. cit.*), donné naissance à un véritable réseau d'irrigation -il n'en subsiste du moins aucune trace. Mal entretenu, l'alimentation en eau devenant irrégulière, il aurait été peu à peu abandonné au moment où le pouvoir de son fondateur s'affaiblissait. Remis en service durant le règne d'Akbar au XVI^e siècle, il se détériora à nouveau, cette fois avec le déclin de l'Empire moghol et ne fut plus alimenté à partir de 1760. Les Britanniques, au XIX^e siècle, s'intéressèrent de nouveau à ce canal, dont les vestiges restaient visibles. Des travaux de recreusement et de modernisation commencèrent en 1823 et le canal principal fut remis en fonction en 1825. Il fut ensuite progressivement étendu au-delà de Hisar, vers l'ouest, jusqu'à Bhadra. Quelques kilomètres avant Siswal, une nouvelle branche de 72 km fut mise en service, qui quitte la dépression de la Chautang en direction du nord-ouest, jusqu'à Darba. (Colvin, *op. cit.*). Ces travaux devaient permettre d'améliorer l'agriculture dans une région où l'irrigation par puits était peu rentable, du fait de la profondeur de la nappe et de l'eau souvent saumâtre. L'ensemble de ces ouvrages constitue une partie de l'actuel *Western Yamuna Canal*. L'ancien tracé du canal de Firuz Shah située entre Jind et Hisar notamment, fut rebaptisé *Hisar distributary*. Le canal fut à nouveau progressivement abandonné (Photo 5) -pour un autre tracé plus septentrional-, de Hisar à Siswal, entre 1937 et 1975 d'après les cartes ainsi que de Siswal à Bhadra, avant 1922 pour la branche de Darba qui n'est plus mentionnée sur les cartes à partir de cette date (Fig. 29).

Si les traces du canal Firuz Shah ne sont plus visibles que dans les coupes, celles des recreusements plus récents peuvent être encore repérées en surface, plus ou moins bien selon les secteurs et selon l'ancienneté de l'abandon, signalées par des bordures d'arbres, des dépressions longilignes ou des buttes de déblais plus ou moins réétalées (Photos 5 et 6).

"Un chenal d'écoulement entre deux buttes de déblais" a été mis au jour en 1984 au fond d'une briquetterie située à 3 km à l'est de Bhadra (Gentelle, 1985, p. 39). Au même endroit, une coupe plus profonde a permis "de mettre en évidence 3,20 m en-dessous du sol actuel, le fond d'un chenal nettement dessiné entre deux ensembles sableux bien marqués. " Grâce à la poursuite du creusement, deux autres chenaux superposés sont apparus, "dont les dimensions font plus penser à un petit canal d'irrigation qu'à une rivière /.../" (*ibid.*). Les tessons

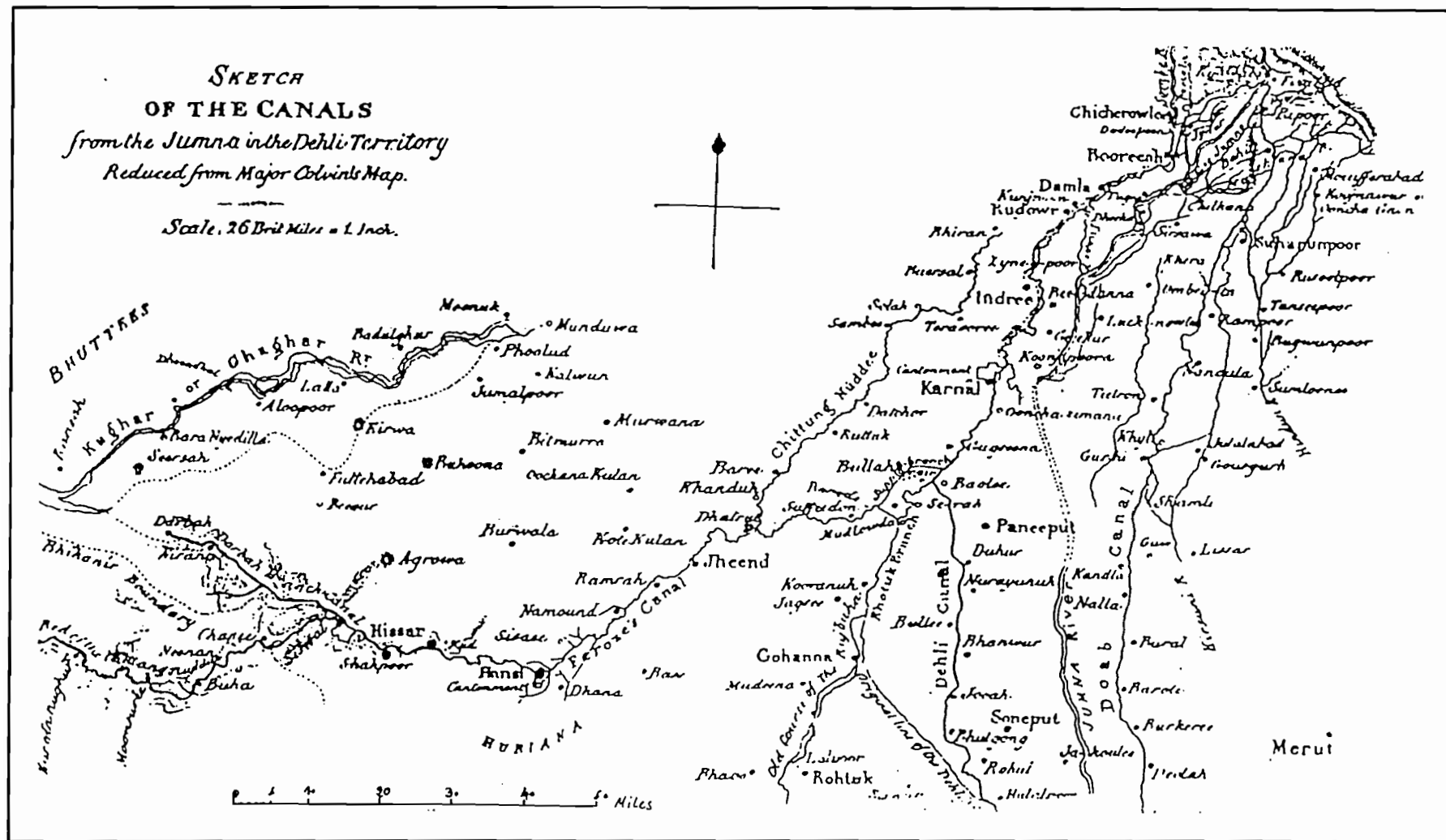


Fig. 28 : Les canaux prenant leur eau dans la Yamuna dans le Territoire de Delhi selon Colvin (1883)

retrouvés dans les couches les plus profondes permettraient de dater ces canaux autour du I^{er} siècle avant notre ère (2000 B. P.). Leur extension n'étant pas connue, il n'est pas possible de dire si leur rôle était simplement ponctuel ou s'il s'agissait d'un ouvrage important.

Dans le secteur de Bahawalpur, on trouve peu de traces d'une irrigation antérieure à la première moitié du XX^e siècle. Et il n'est question dans les gazetteers que de canaux d'inondation plus ou moins bien entretenus, à sec durant l'hiver, destinés à diriger l'eau vers les champs lors des crues en profitant de la surélévation du talweg par rapport aux plaines environnantes, et dont l'extension était de ce fait limitée aux proches environs du Sutlej. La presque totalité des canaux d'irrigation pérennes, capables d'alimenter en eau les cultures *rabi*, a été construite durant la période d'administration britannique ou après. Des canaux déjà existants ont pu aussi être modernisés pour en accroître le débit, l'ensemble des travaux devant permettre d'éviter les famines et d'accroître les rendements les bonnes années (Sion, 1929).

Peu de traces subsistent donc, sinon de l'agriculture elle-même -attestée par les graines retrouvées dans les niveaux archéologiques-, du moins des conditions dans lesquelles elle était pratiquée durant la protohistoire et durant les périodes qui suivirent, jusqu'au Moyen Âge. Plus nombreuses, car plus proches de nous, les informations relatives aux pratiques agricoles, et notamment à l'irrigation depuis le début du siècle dernier, peuvent cependant nous éclairer, dans la mesure où "les techniques de l'irrigation n'ont guère évolué entre le troisième millénaire avant notre ère et le premier millénaire après" (Gentelle, 1985, p. 41). On relève d'ailleurs dans les gazetteers (Hisar, 1878) qu'aucune amélioration n'était enregistrée dans la qualité des récoltes ou dans les pratiques culturales depuis les débuts de l'occupation britannique dans la région ; le seul changement notable fut pour cette époque, l'introduction de la culture du tabac. La différence majeure entre les périodes anciennes et l'agriculture traditionnelle encore pratiquée au début du XX^e siècle, réside dans l'affectation des terres aux différents types de cultures : deux tiers des superficies cultivées le sont à cette époque en cultures *kharif* et un tiers seulement en cultures *rabi*.

5.2. L'irrigation dans la région de Hisar au XIX^e siècle

Bien que les conditions climatiques ne lui aient pas été favorables, l'agriculture pluviale était traditionnellement pratiquée dans le secteur oriental de la région, en Haryana et au Rajasthan à la fin du siècle dernier (Gazetteers, 1884, 1909). Il est vrai que les moyennes des précipitations annuelles y sont généralement supérieures, on l'a vu, à la limite théorique -200 à 300 mm- d'une culture non irriguée. Ainsi, dans le district de Rohtak, en 1883 (Gazetteers 1884, p. 90), les terres non irriguées représentaient 86% des terres

cultivées. Quand les pluies étaient satisfaisantes, les récoltes pouvaient être très abondantes. "Les plaines alluviales du Nord-Ouest de l'Inde /constituent en effet/ des terres agricoles idéales, leur richesse en minéraux altérables leur assurant une excellente fertilité (Goyal *et al. in* Courty, 1990, p. 39). On récoltait ainsi *jowar*, *bajra* et pois à l'automne. Les pluies permettaient également des récoltes de printemps (un tiers des terres cultivées), de *gram* principalement, d'un peu de moutarde, et d'orge les années où les pluies d'hiver étaient abondantes.

Il en allait de même en 1878 dans le district de Hisar, où 72% des terres cultivées dépendaient entièrement des pluies. Les quelques 28% de terres irriguées à cette époque l'étaient grâce à:

- des canaux : 5 %,
- des puits : 0,11 % ou
- aux crues de la Ghaggar : 23%.

La région même de Hisar, entre Bhadra à l'ouest et Bhiwani au sud-est, est située hors de la plaine d'inondation de la Ghaggar. Cette partie méridionale du district, appelée localement *Bagar*, au contact des secteurs dunaires, ne pouvait donc bénéficier, d'après ces documents, d'une irrigation artificielle hormis celle du *Hisar distributary*, comme le confirme la carte topographique au *quarter inch* de 1922 (Fig. 29). L'irrigation par puits suppose en effet, pour être rentable, que la nappe ne soit pas trop profonde ou que l'on dispose, comme c'est le cas actuellement, de moyens mécaniques pour les creuser sans trop de peine, conditions qui n'étaient alors pas remplies. Certains puits qui atteignent 30 m de profondeur ne pouvaient être utilisés pour l'irrigation.

Ce secteur était donc jusqu'au début du XX^e siècle, pratiquement entièrement dépendant des pluies. Or, sans pluies, pas récolte. Les terres sont par ailleurs en permanence exposées à un ensevelissement par les sables prélevés dans la zone dunaire voisine et transportés par des vents souvent violents. En contrepartie, les sols, sablo-limoneux, sont facilement labourés et requièrent moins d'eau pour être productifs que les riches terres alluviales, de sorte qu'avec la même quantité de pluies une récolte est possible, alors qu'ailleurs les graines ne sont pas même semées. De plus, avec de maigres pluies, des récoltes peuvent être obtenues dans les dépressions interdunaires ou intradunaires (Gazetteers Hisar, 1916).

Photo 4 : Au Cholistan (Pendjab, Pakistan), un des canaux terminaux de la Desert Branch, la Derawar branch, abandonné dès sa création en 1932, l'alimentation en eau à partir du Sutlej étant insuffisante (21/2/1990)

Photo 5 : Le Hisar Distributary entre Shapur et Matarsham à l'ouest de Hisar (Haryana, Inde), abandonné entre 1933 et 1975, toujours bordé d'arbres. Son tracé correspond à celui du canal construit par Firuz Shah au XIV^e siècle dans la dépression de la Chautang (2/1988)

Photo 6 : Les vestiges d'un canal médiéval à l'ouest de Hisar. On distingue au second plan, en clair, les longs bourrelets, vestiges des déblais évacués d'année en année lors des curages et aujourd'hui plus ou moins étalés (20/1/1992).



Photo 4



Photo 5



Photo 6

5.3. L'irrigation dans l'Etat de Bahawalpur au XIX^e siècle

La culture pluviale devient de plus en plus aléatoire à mesure que l'on va vers l'ouest, alors que les totaux pluviométriques tombent en dessous de 150 mm par an. Si les limites en sont imprécises et varient en fonction d'autres facteurs, pédologiques notamment, 94% des terres cultivées en 1903-04 dans l'Etat de Bahawalpur (Gazetteers, 1908) étaient irriguées :

- 69% par les seuls canaux,
- 14% grâce aux apports combinés des canaux et des puits,
- 1% par puits,
- 10% par les crues du Sutlej.

De la lecture de ces gazetteers, il ressort en effet que la qualité des récoltes était bien moins liée à celle du sol qu'aux possibilités de l'alimenter en eau. C'est pourquoi les terres étaient classées en fonction des différents types d'irrigation qu'elles pouvaient recevoir.

Ainsi, au début du siècle, les villages situés au bord du Sutlej dépendaient entièrement des crues. Mais celles-ci, souvent violentes, interdisaient les semailles des cultures *kharif*. Seules les cultures *rabi* étaient pratiquées sur les *sailab lands* (terres inondées). Le *gram*, les pois, etc., étaient semés en septembre, suivis en octobre par le blé, culture vivrière de base des terres riveraines. Des barrages de terre étaient construits pour retenir les eaux qui s'accumulaient dans les dépressions dès la montée de la rivière et des chenaux ou rigoles étaient creusés pour les guider jusqu'aux champs. Les inondations étaient en général bénéfiques pour les terres, mais il arrivait qu'elles soient salées, ce qui rendait les cultures impossibles. Les bonnes années, l'eau se maintenait de la mi-juin à la mi-septembre, exceptionnellement jusqu'à fin septembre ou mi-octobre.

Entre la plaine d'inondation du Sutlej et le Cholistan, les cultures dépendaient principalement des canaux d'irrigation -des canaux d'inondation-, des pluies, et des puits lorsque les terres étaient situées au-dessus du niveau des canaux (Fig. 30 et 31). Dans cette zone de transition, appelée *Nahri Cholistani*, les cultures *kharif* étaient irriguées au moment des crues, durant l'été. L'irrigation des cultures *rabi* commençait le 20 juillet jusqu'à ce que les canaux ne soient plus alimentés, c'est-à-dire en général à la fin du mois d'octobre. Ces terres retenant bien l'humidité, une simple irrigation pratiquée en septembre-octobre était suffisante pour amener blé, *gram*, navets, moutarde, et autres cultures *rabi* à maturation et "avec une ou deux bonnes pluies d'hiver, les cultures *rabi* étaient aussi luxuriantes que les cultures irriguées par le Sirhind canal, de façon pérenne" (Gazetteers, Bahawampur, 1908).

Là où l'irrigation ne pouvait être pratiquée, les terres n'étaient pas cultivées, ou rarement. Si la répartition des pluies dans l'année peut être favorable aux cultures d'été, même si leur variabilité spatiale et temporelle est importante, l'alimentation des cultures d'hiver

est, elle, en effet, plus fortement compromise encore par des pluies sporadiques et par un déficit hydrique dans le sol qui est à son maximum en cette saison.

On relève cependant quelques cas d'agriculture pluviale, les facteurs pédologiques pouvant être à l'origine de conditions locales favorables. Les terres non irriguées, les *barani lands*, étaient situées au Cholistan entre le désert proprement dit et les terres irriguées à partir du Sutlej. Cette zone, appelée localement "le petit Cholistan", et encore actuellement hors de portée du réseau d'irrigation moderne (cf. § I.1.3.), est celle où furent découverts les sites archéologiques. Selon les gazetteers (*op. cit.*) les cultures *kharij*, entièrement dépendantes des pluies sporadiques de juillet et août, y étaient semées dès que l'eau pénétrait de quelques centimètres dans le sol. Deux arrosages à un mois d'intervalle étaient ensuite nécessaires pour amener les plantes, *bajra*, *jowar*, moutarde, sésame, *moth*, *mash*, à maturité, une grosse averse étant parfois suffisante. En effet, les sols du Cholistan, argilo-sableux, légers et facilement labourés, absorbent rapidement l'humidité, diminuant ainsi les pertes par évaporation, et la retiennent longtemps. Ainsi, de fortes pluies de fin d'été (septembre-octobre) étaient tout à fait suffisantes pour permettre la maturation des cultures *rabi*, d'orge notamment, qui couvrent toutefois de faibles superficies (*op. cit.*).

L'utilisation des seuls puits était, ici aussi, peu pratiquée et considérée comme très insuffisante, excepté lorsque les pluies étaient particulièrement abondantes. Les puits constituent actuellement la deuxième source d'approvisionnement en eau au Cholistan. On en comptait 89 en 1986 dans la division de Bahawalpur, très irrégulièrement répartis puisque 85 d'entre eux sont situés dans le district de Bahawalpur déjà irrigué en partie par des canaux, 5 dans le district de Bahawalnagar au nord-est et un seul dans celui de Rahimyar Khan au sud-ouest. Mais la profondeur de la nappe phréatique¹, la hauteur de l'eau, et sa mauvaise qualité (pH 7,2 à 8,8) (PCRWR, 1986) interdisent son utilisation pour l'irrigation. L'eau des puits, tirée dans des sacs de cuir par des dromadaires attelés, est réservée pour l'alimentation en eau des troupeaux durant la saison sèche, lorsque les mares sont à sec. Mais l'offre étant largement inférieure à la demande, croissante d'année en année, les puits sont également très rapidement taris.

Enfin, présents dans tous les villages, les réservoirs, plus connus sous leur dénomination anglaise de *tanks*, ou de *tobas* au Cholistan, ne sont pas destinés à l'irrigation. L'eau de pluie, collectée dans des dépressions naturelles ou creusées artificiellement n'est utilisée que pour la boisson des hommes et des animaux ou pour d'autres usages domestiques. L'évaporation et l'infiltration étant importantes, peu de tanks réussissent à conserver l'eau jusqu'à la fin de la saison sèche. Ces mares sont au nombre de 500 environ au Cholistan où elles constituent la principale ressource en eau (PCRWR, 1986), pour une durée maximum de quatre mois après la saison des pluies. Du fait que le curage des dépressions n'est pas

¹ Mesurée pour trente d'entre eux, la profondeur de la nappe varie de 11 à 40 m ; la hauteur de l'eau quant à elle se situe entre 1,25 et 5 m.

effectué régulièrement, leur capacité de stockage des eaux diminue assez rapidement et beaucoup sont abandonnées.

5.4. L'irrigation durant la protohistoire ?

On l'a vu, aucune preuve, aucun indice de pratiques d'irrigation autres que des traces de remaniements et d'aménagements locaux n'ont pu être mis en évidence pour les périodes historique ancienne et protohistorique, que ce soit dans la région de Bahawalpur ou dans celle de Hisar.

L'irrigation par des canaux semble pourtant de tradition ancienne dans l'une comme dans l'autre de ces régions. Mais il s'agirait plutôt, comme nous venons de le voir, d'un système de canaux de dérivation, saisonniers dans leurs apports, et d'une durée de vie courte. L'ampleur des aménagements, qui consistent à détourner une partie du cours d'une rivière pour profiter des débits importants lors des crues (les eaux s'écoulant par gravité vers les champs situés au-dessous du talweg), dépend de l'importance du cours d'eau et de son débit. Certains cours ont ainsi pu se prêter à la construction de grands canaux de plusieurs kilomètres à partir du Sutlej, alors que les eaux d'inondation de la Ghaggar étaient guidées vers les terres voisines par de simples rigoles, dont le tracé pouvait varier d'une année sur l'autre, en fonction des apports et des besoins.

Le canal de Firuz Shah semble avoir été une exception dans la région et n'aurait pas correspondu à une véritable politique de gestion des ressources en eau.

Les espaces étudiés, situés hors des plaines d'inondation des rivières pérennes comme le Sutlej ou saisonnières, comme la Ghaggar, auraient été traditionnellement, du moins pour les périodes récentes, l'objet d'une agriculture pluviale. Les nuances climatiques semblent être à l'origine de différences dans les pratiques culturelles entre l'est et l'ouest. Le calendrier agricole par exemple, apparaît comme beaucoup plus souple dans la région de Bahawalpur, où la période des semis et des récoltes est déterminée de façon à profiter de pluies dont la répartition dans l'année est plus aléatoire, et la variabilité interannuelle plus grande que dans celle de Hisar (§ I.1.1.2.3.).

Les populations ont également très tôt semble-t-il, su tirer parti de conditions locales favorables qui atténuaient les contraintes climatiques. Il s'agissait toujours d'utiliser au maximum les ressources en eau en profitant des propriétés de certains sols, ou de certaines configurations topographiques, dépressions interdunaires ou paléochenaux. On signale ainsi dans les gazetteers que la dépression de la Hakra collecte une grande quantité d'eau durant la saison des pluies, qu'elle retient pendant longtemps cette humidité, et que lorsque les pluies ont été abondantes, les cultures *rabi* peuvent être portées à maturation sans apport d'eau supplémentaire après les semailles.

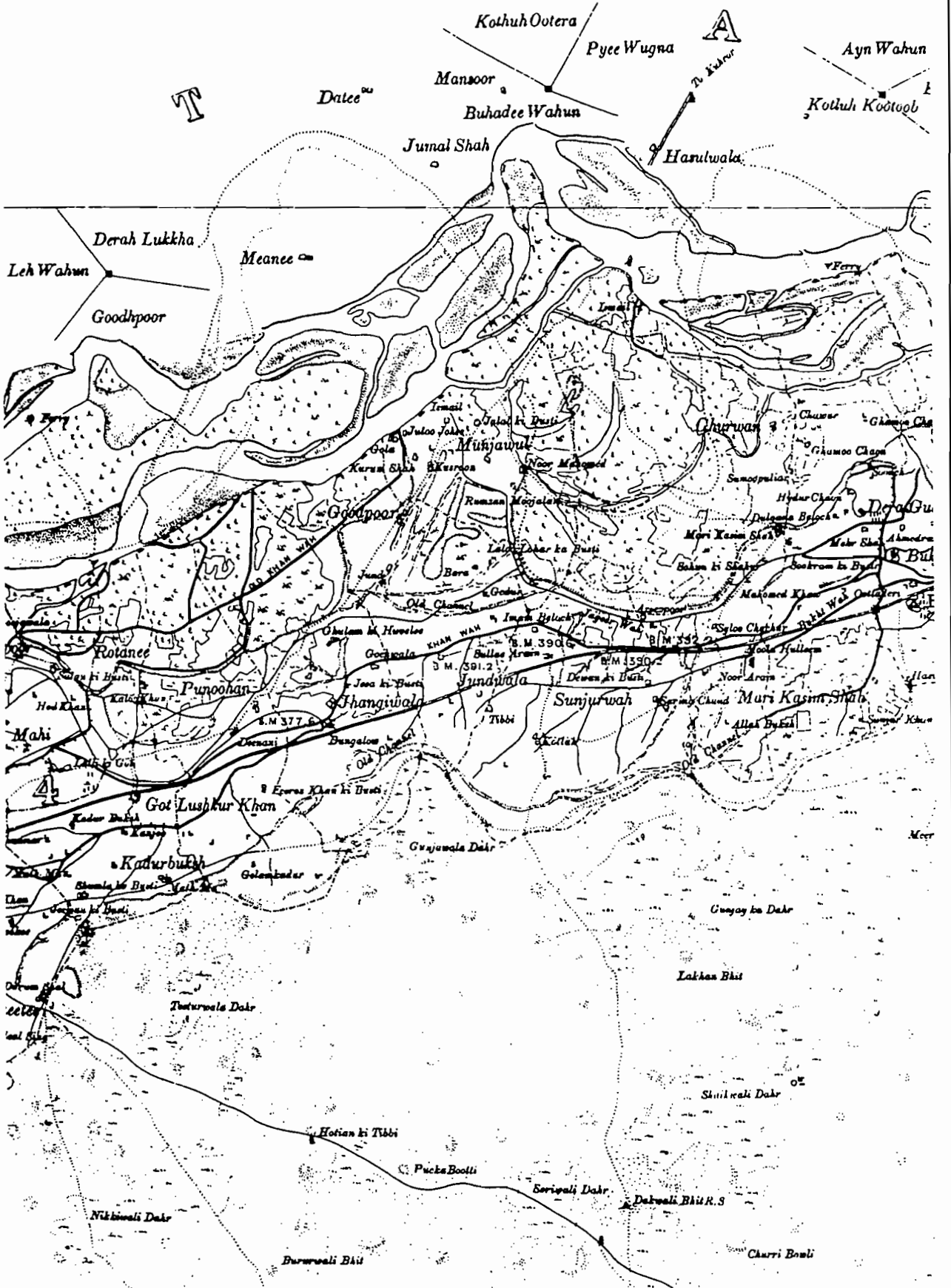


Fig. 30 : Le réseau d'irrigation dans le secteur de Bahawalpur en 1876 : des canaux d'inondation dérivés du Sutlej.
Extrait réduit (1cm = 900 m) de la feuille n°11 Punjab revenue Survey Map, Bahawalpur State, 1876 au one inch
to one mile.

Map OF BAHAWALPUR STATE

(No 1).

Scale—1 inch = 16 Miles

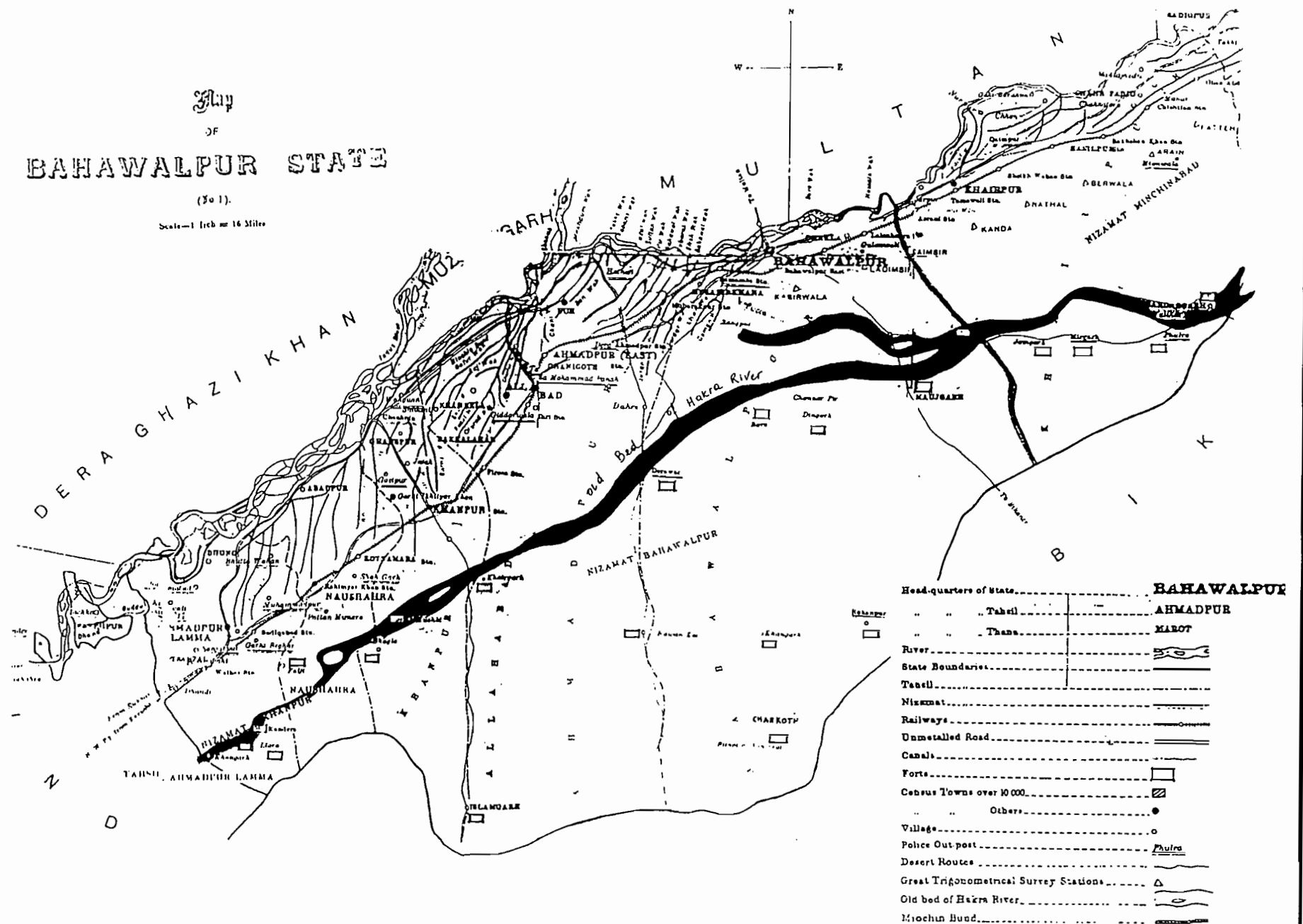


Fig. 31 : L'Irrigation dans l'Etat de Bahawalpur en 1901. *Gazetteers Bahawalpur State, 1903.*

Le facteur climatique est essentiel, mais dans cette région de marge il est peut-être moins déterminant qu'il n'y paraît. Il est lui aussi difficile à évaluer car la quantité moyenne des précipitations n'est pas toujours un paramètre significatif ; plus que la quantité des pluies tombées en un point, c'est sa répartition dans l'année, par rapport aux calendriers des cultures et des travaux agricoles, qui est importante (cf. § I.1.).

L'hypothèse d'une mise en valeur reposant sur de grands systèmes d'irrigation telle qu'elle a pu être envisagée pour expliquer le peuplement de la région durant la protohistoire (Francfort, 1985, 1986, 1988 ; Gentelle, 1985) ne semble donc attestée pour le moment par aucune preuve matérielle, pas davantage par une tradition agricole productive, intensive et sûre.

Cela ne signifie pourtant pas que des travaux de moindre envergure n'aient été entrepris pour tirer parti au maximum des ressources en eau naturelles. De tels ouvrages ont-ils laissé en surface une empreinte ? Les prospections au sol se sont révélées infructueuses. Nous verrons au chapitre III dans quelle mesure les traitements d'image satellitaires peuvent apporter de nouvelles informations.

5.5. Conclusion

Les hypothèses émises par le passé pour expliquer la localisation des sites archéologiques ne sont ni fausses ni absurdes. On a peut-être simplement considérablement exagéré les phénomènes et les événements auxquels elles font référence et ce, alors même que la représentativité de l'information n'était pas évaluée, ni la localisation des sites étudiée à grande échelle.

Nous avons vu que des variations *mineures* auraient pu affecter le climat durant les 5000 dernières années, que les paléochenaux auraient pu connaître encore de rares écoulements durant la protohistoire, et que le recours à des techniques d'irrigation primitives à cette même époque, n'était pas exclu. Nous avons vu également que les données disponibles ne permettaient pas d'avoir une vision du peuplement telle qu'il faille recourir à des changements radicaux des paramètres du milieu pour en justifier les modalités.



Chapitre II

QUESTIONS, DEMARCHE, METHODES ET TECHNIQUES

1. DES QUESTIONS RESTEES SANS REPONSE

Au chapitre I, nous avons vu comment, depuis la fin du siècle dernier, ont été envisagées les conditions de l'occupation humaine de la région au cours des cinq mille ans passés. L'ensemble des interrogations a porté sur les conditions d'assèchement de cours d'eau dont les traces sont encore visibles dans le paysage, ou sur leur alimentation. A aucun moment, et quelles que soient les sources auxquelles il était fait référence, n'avait été remise en cause l'existence de liens directs entre l'histoire des rivières anciennes et celle des sites archéologiques, jusqu'à ce que cette relation soit réfutée par les faits géomorphologiques et sédimentologiques. Egaleme nt discutées, les hypothèses selon lesquelles des conditions climatiques particulièrement favorables ou la mise en place d'un vaste réseau d'irrigation, auraient permis l'épanouissement de plusieurs cultures durant la protohistoire puis durant la période historique ancienne, ont aussi été remises en cause. Mais elles laissaient en même temps la place à bien des interrogations concernant les modalités de l'anthropisation de la région et en particulier, l'environnement dans lequel s'étaient installés les hommes aux différentes époques considérées et la façon dont ils tiraient parti de ses atouts majeurs ou répondaient aux contraintes qui leur étaient imposées.

Que l'on ne se berce pas d'illusions, la mise en évidence -description et explication- des différentes phases de l'occupation humaine ancienne et de l'évolution du milieu physique, et celle des liens éventuels qui ont pu à différentes époques et en différents lieux exister entre ces composantes, ne peuvent être envisagées qu'au travers de traces, de vestiges, donc d'une information lacunaire qui n'autorise bien souvent que la formulation d'hypothèses, et rarement l'acquisition de certitudes.

L'observation, l'étude et la confrontation de différents indicateurs, permettent malgré tout, on l'a vu, de dégager certains aspects des conditions de l'anthropisation ou de l'évolution du milieu (cf. § I). Mais il semble que la validité de telles reconstructions, qui ne se trouve évaluée bien souvent qu'au moment où elles sont remises en cause par d'autres, dépende plus des méthodes d'investigation et de l'échelle à laquelle sont observées les différentes composantes ou l'organisation du système spatial, c'est-à-dire de la façon dont sont utilisées les données, que des données elles-mêmes.

A la base de toute interrogation sur les relations homme-milieu se posent donc des problèmes de méthode, d'échelle d'observation et d'analyse.

2. DES CONTRAINTES ET UNE DEMARCHE SPECIFIQUE

La question posée est celle des facteurs géographiques qui, aux époques considérées, ont pu intervenir dans le choix de la localisation des établissements humains. Il s'agit ici des 555 sites retrouvés au Cholistan ou dans le secteur de Hisar.

• Une question d'échelle

Jusqu'à présent, et à quelques exceptions près, les relations hommes-milieu ont surtout fait l'objet d'études à de très petites échelles. On trouve dans la littérature de nombreuses cartes ou plutôt des croquis, à des échelles inférieures au 1/2 000 000, qui expriment d'une façon plus ou moins synthétique les théories émises par leur auteur au sujet de l'évolution du milieu aux cours des derniers millénaires (Fig. 21 à 26 par exemple). De la même façon, les résultats des prospections archéologiques, quand ils sont cartographiés, sont toujours reportés sur un fond uniforme, les sites apparaissant comme un semis de points dans un espace vide ou presque (Fig. 11 à 14). Qu'il s'agisse du milieu ou de l'occupation humaine ancienne, de telles représentations ne sont que des *illustrations* dont on pourrait à la rigueur se passer. On ne s'étonnera donc pas que la superposition ou tout simplement la mise en relation de tels documents, les uns relatifs à l'histoire de l'environnement (en particulier celle du réseau hydrographique), les autres à celle de la localisation des établissements humains anciens, documents d'origines diverses, présentant des niveaux d'information (ou de détail) différents, et à des échelles différentes, puissent conduire à des interprétations erronées des relations entre les installations humaines et l'environnement aux époques anciennes.

Les conditions d'implantation des hommes, en particulier à l'époque protohistorique (dans la région de Hisar), ont été étudiées aussi à très grande échelle. Ainsi, l'étude micromorphologique des sédiments a permis, on l'a vu (§ I.4.3.3.), l'acquisition de nouvelles connaissances sur la nature et la chronologie des événements qui ont marqué l'histoire du milieu (Courty, 1990). Les vestiges de l'occupation humaine ancienne ont été situés par rapport à cette reconstruction, mais l'étude n'a pu être systématique en raison de la lourdeur des contraintes inhérentes aux méthodes utilisées, en particulier la nécessité de multiplier les échantillons en un très grand nombre points de l'espace étudié. Les informations obtenues pour quelques sites dont la représentativité au sein de l'ensemble des sites n'est pas évaluée, ne peuvent être extrapolées à cet ensemble. Leur signification reste locale et les questions relatives à la distribution spatiale des sites ne sont donc pas résolues.

Il semble ainsi que les études concernant les relations homme/milieu aient été assez souvent conduites indépendamment l'une de l'autre à l'aide des méthodes, et aux échelles spatiales et temporelles, qui paraissaient pertinentes pour l'analyse de leurs caractères, en vue de l'obtention d'un certain type de connaissances les concernant. Les interrelations, elles, n'ont été abordées qu'au travers de ces approches, sectorielles, et de leur réunion souvent peu cohérente, sans que l'on se soit interrogé sur la possibilité de l'existence d'une ou de plusieurs échelles spécifiques à l'analyse de ces relations.

Les formes héritées du milieu, de l'occupation humaine ou des relations qui les lient témoignent de discontinuités, de ruptures d'équilibre au sein du système spatial dans lequel elles étaient et continuent d'être intégrées, même si, comme l'écrit R. Coque (1982) à propos des héritages géomorphologiques, elles se "dégradent plus ou moins rapidement sous l'action /.../ de processus sans rapport direct avec leur caractéristiques propres, pour disparaître finalement au profit des formes vives ou fonctionnelles". Qu'ils en soient actuellement des composants encore actifs ou bien passifs, morts ou figés, les indices, les traces qui constituent la base bien fragmentaire de données, à partir de laquelle sont élaborées les reconstitutions des événements passés, sont partie intégrante de l'espace actuel. C'est donc au sein de cet espace et par son analyse que l'on trouvera les réponses aux questions posées.

L'exhaustivité est inaccessible. Ce n'est pas davantage vers la monographie que tendra cette analyse, mais plutôt vers la recherche des traces et la mise en évidence des phénomènes qui seuls contribuent à la résolution des problèmes posés, vers la construction d'un "modèle", au sens de J. Beaujeu-Garnier (1973), "un concept intellectuel, une entité créée par le choix /.../ de certains traits et la négligence de certains autres". Ce qui revient à "choisir les éléments qui paraissent fondamentaux ou que l'on choisit de considérer comme prépondérants, et à partir d'eux, orienter son étude pour en faire apparaître les causes et les conséquences, les tenants et les aboutissants." Cela revient à considérer que les phénomènes que nous étudions s'organisent autour d'échelles préférentielles qui résultent de mécanismes spécifiques. Il s'agit donc de trouver les méthodes qui permettent de "choisir" parmi les faits et les objets, et de découvrir quelles sont les échelles adéquates pour la mise en évidence des mécanismes qui régissent les phénomènes d'interrelations entre sites et environnement.

L'approche ne peut être exhaustive mais elle doit, au départ, être globale c'est-à-dire qu'elle doit tenter de prendre en compte la complexité des phénomènes et des interrelations qui existent entre les différentes composantes de l'espace.

- **Des indicateurs**

Deux types d'indicateurs, les sites et les vestiges de canaux d'irrigation, témoignent ici des interactions passées entre les sociétés et le milieu dans lequel elles se sont installées aux différentes époques identifiées par l'analyse archéologique. Les sites, surfaces recouvertes d'une forte densité de tessons de poterie, de céramique, révèlent la présence en un lieu donné, d'habitats anciens. Leur localisation n'est pas aléatoire, elle résulte d'un choix qui intègre des faits de nature et des faits de société. Ce choix est une réponse aux conditions offertes par le milieu. Une réponse qui ne peut donc être expliquée sans que soient connus les types d'activités pratiquées par les populations, leurs techniques de production et d'encadrement notamment, auxquels peuvent s'ajouter des faits culturels ou religieux par exemple.

Les canaux d'irrigation témoignent par leurs caractéristiques d'un type de mise en valeur des espaces occupés, du niveau d'organisation et de développement technique des sociétés. Ils fournissent indirectement des données sur la localisation des terres cultivées. Dans les deux secteurs étudiés, on l'a vu, les preuves matérielles visibles en surface de la pratique de l'irrigation remontent, pour les plus anciennes, au Moyen Âge (§ I.5.1.).

Notre analyse sera donc essentiellement fondée sur la localisation des sites archéologiques.

- **Une approche globale, à grande échelle**

Le moyen que nous avons choisi d'utiliser est l'image de satellite.

La représentativité de la localisation d'un site n'étant pas connue a priori, chaque site doit faire l'objet d'une analyse particulière ; des enseignements généraux pouvant ensuite, seulement, être tirés de l'étude des cas particuliers. Cette démarche est parfaitement compatible avec l'utilisation des images satellitaires.

L'image est une représentation de l'espace à une certaine altitude. Comme le paysage que nous percevons au sol, il est ce qui se voit de l'espace ou plutôt, ce que le capteur voit. Il n'est donc pas tout l'espace. Le capteur enregistre la luminance des surfaces dans différentes bandes de longueur d'onde. Son pouvoir de résolution spatiale détermine le nombre d'individus représentés et son "aptitude à rendre distincts deux points voisins" (COMITAS, 1988). Son pouvoir de résolution spectrale correspond à la différence des deux longueurs d'onde les plus proches qu'il est possible de distinguer.

Synoptique, l'image est aussi une représentation globale de l'espace, de son état actuel, au sein duquel se trouvent les vestiges hérités d'états antérieurs, qui sont l'objet de notre étude. L'image brute ne répond donc pas directement aux questions posées. Un ensemble de méthodes faisant appel au traitement statistique ou mathématique des données-images

ainsi qu'à un ensemble d'informations et de connaissances extrinsèques doivent être mises en oeuvre, pour extraire l'information nécessaire et suffisante à l'obtention des connaissances recherchées.

- **Spécificité des objets recherchés**

Il s'agit de situer les vestiges d'habitat par rapport à des sous-espaces considérés comme significatifs et d'une façon qui autorise des comparaisons d'un lieu à un autre d'un même secteur d'étude. L'image de satellite permet d'avoir cette démarche à la fois uniforme et reproductible pour des régions très étendues.

Nous recherchons parmi ceux fournis par l'image brute un ou des niveaux de détail optimums, ce qui revient à gommer l'information qui ne nous est pas utile, celle qui concerne les états de surface, fortement variants, par exemple, pour mettre en évidence des unités pérennes et évoluant sur des temps plus longs. Nous recherchons aussi des *formes*, qui à cette échelle d'étude permettent seules d'identifier les vestiges. Quoi de commun en effet entre l'aspect d'un site archéologique et celui d'un village, d'un canal d'irrigation actuel et d'un canal abandonné depuis plusieurs siècles, entre un cours d'eau fonctionnel et une paléovallée partiellement ou totalement comblée et colonisée par la végétation naturelle ou les cultures, sinon leurs caractéristiques morphologiques ?

3. DES METHODES POUR UNE APPROCHE GLOBALE

Nous avons fait appel aux principes et aux méthodes de *l'analyse typologique* -ou classification automatique- pour l'individualisation d'unités spatiales invariantes ou peu variantes. Cette méthode permet le regroupement de pixels dont la réponse spectrale est la plus ressemblante pour un niveau de détail et selon un critère donnés. Dans certains cas cette analyse a conduit à la mise en évidence de formes significantes, paléohydrographiques en particulier. Lorsque celles-ci n'étaient pas caractérisées par des radiométries homogènes en revanche, nous avons eu recours à d'autres méthodes notamment celles de *l'analyse d'image*.

3.1. Des unités homogènes

3.1.1. Des classifications non dirigées

La démarche qui vise à considérer l'image de façon globale pour obtenir un zonage qui prenne en compte la globalité des objets ou phénomènes qui s'y trouvent inclus, et non la délimitation d'un type d'objet ou d'un phénomène particulier, est incompatible avec l'utilisation d'algorithmes de classification dirigées. Notre démarche est exploratoire, il

n'existe pas dans ce cas de classification *a priori* des individus de la population-image. Les classes sont inconnues ainsi que leur nombre et leur effectif. Nous ne pouvons donc utiliser au départ que des algorithmes de classification non dirigées, ce qui signifie que l'on n'introduit pas d'information préalable, c'est-à-dire une certaine "connaissance de caractéristiques de la scène étudiée, /acquise/ à partir d'observations et de mesures (enregistrées ou non), réalisées *in situ*" (COMITAS , 1988). La partition de l'ensemble-image est révélée et construite en fonction de sa propre structure, selon la maximisation d'un critère qui ne requiert aucune connaissance sur l'organisation en classe des individus.

3.1.2. Des classifications emboîtées

"L'homogénéité", notion qui est à la base de toute partition d'une population en un certain nombre de classes, ne peut être définie que par rapport à un niveau d'échelle donné. L'échelle d'une image satellitaire est définie *a priori* et correspond au pouvoir de résolution du capteur ; on parlera donc plutôt à leur propos de niveau d'information. A un niveau d'information donné correspond un nombre de classes donné. Si l'on admet le principe selon lequel l'image est un ensemble structuré, donc que des limites existent entre les individus qui la composent, il existe une hiérarchie entre ces différences. L'organisation entre les différentes composantes de l'image ne peut être connue de façon optimale que si l'on prend en compte les différents niveaux de cette hiérarchie. Puisque nous sommes dans une démarche exploratoire, il n'est pas possible de déterminer *a priori* s'il existe une ou plusieurs échelles de travail pertinentes par rapport aux questions posées. La méthode utilisée doit donc permettre la mise en évidence des différents niveaux d'organisation qui existent dans les données sans que nous intervenions dans ce choix.

Etant donné que les différents niveaux ne sont pas indépendants les uns des autres, mais ne constituent qu'un certain type d'organisation des mêmes éléments, le passage d'un niveau à un autre peut se faire hiérarchiquement par sous-division des niveaux précédents, en allant du général au particulier.

3.2. Formes et structures

Un certain nombre de structures ou de formes peuvent être mises en évidence par l'analyse typologique. D'autres, qui ne constituent pas des entités radiométriquement homogènes, sont au contraire désarticulées, dispersées par ce type de traitement, chacun des éléments de la structure se trouvant affecté à la classe la plus proche au sens des réponses spectrales. Formes et structures étant partie intégrante de l'information-image, mais aussi de l'espace dont elles sont un modèle de représentation, elles ne peuvent être négligées. C'est pourquoi nous avons utilisé, dans les secteurs où cette information paraissait manquer, d'autres méthodes d'analyse, dites globales et morphologiques.

3.3. Une première étape : le choix des images

Les caractéristiques des images sur lesquelles sera menée l'analyse, c'est-à-dire la date à laquelle seront ou ont été enregistrées les données, l'espace qui sera étudié, et le capteur (c'est-à-dire le type de données), doivent être adéquates aux objectifs et aux traitements dont elles feront l'objet. Le tableau 9 présente les références des images sur lesquelles a porté notre recherche.

Tabl. 9 : Les images traitées

Satellite	Capteur	Mode	Références	Date	Angle de visée	Coordonnées
SPOT 1	HRV 1	XS	203-292	22-5-86	2°2 R	28°58N-75°22E
SPOT 1	HRV 2	XS	204-292	22-5-86	2°2 L	28°58N-75°58E
LANDSAT 5	TM		150-040	14-2-88		28°52N-71°29E
SPOT 1	HRV 1	P	195-292	3-3-87	5°15 L	28°58N-71°30E

3.3.1. La date

Le mois de mai fut retenu comme la période la plus favorable à l'observation de la région de Hisar en Haryana. C'est en effet le seul moment de l'année où les sols ne sont pas couverts de cultures, celles d'hiver venant d'être récoltées et celles d'été n'étant pas encore semées (Tabl. 8). C'est donc celui durant lequel les différences entre les types de surfaces qui composent cet espace sont maximales.

Dans le secteur de Bahawalpur, le calendrier agricole ne fait apparaître aucun mois sans culture. Mais le problème est limité, dans la mesure où la zone étudiée, au sein de laquelle se trouvent les sites archéologiques recensés, est située en marge des terres irriguées. C'est pourquoi au mois de mai très sec, a été préféré celui de février, qui connaît parfois quelques pluies (§ I.1.1.2.2.). L'humidité pouvait en effet renforcer les contrastes de texture et de couleur.

3.3.2. La scène

Le principal critère qui a guidé le choix des scènes fut d'ordre archéologique : elles devaient couvrir les espaces prospectés, sur lesquels avaient été recensés les sites et où étaient considérées comme non résolues les questions relatives à leur environnement et à leur distribution spatiale. La totalité de l'aire prospectée par Mughal au Cholistan est couverte par une scène Landsat TM et celle prospectée par la M.A.F.I. en Haryana, par deux scènes Spot.

3.3.3. Le capteur

Pour la région du Cholistan, l'étude a été menée sur une image Landsat Thematic Mapper (TM) qui allie les avantages d'une haute résolution spectrale -sept canaux d'enregistrement des données allant du visible à l'infra-rouge- et d'une haute résolution spatiale -30 x 30 m (Tabl. 10).

Tabl. 10 : Rappel des caractéristiques des différents capteurs

Satellite	SPOT 1	LANDSAT 5
Capteur	HRV	TM
Unité géographique d'observation (scène)	60 x 60 km	185 x 185 km
Résolution spatiale	20 x 20 m 10 x 10 m en mode P	30 x 30 m 120 x 120 m (ther.)
Nombre de canaux d'enregistrement	4 2 : visible 1 : proche IR 1 : panchromatique P	7 3 : visible 1 : proche IR 2 : IR moyen 1 : IR thermique
Bandes spectrales (µm)	1 : 0,50 - 0,59 2 : 0,61 - 0,68 3 : 0,79 - 0,89 P: 0,51 - 0,73	1 : 0,45 - 0,52 2 : 0,52 - 0,60 3 : 0,63 - 0,69 4 : 0,76 - 0,90 5 : 1,55 - 1,75 6 : 10,40 - 12,50 7 : 2,08 - 2,35

L'image Spot en mode panchromatique a été choisie pour répondre à l'objectif de mise en évidence des linéaments fins.

Pour la région de Hisar, d'étendue plus réduite, le choix s'est porté sur des images Spot en mode multispectral. Bien que la qualité de l'une d'entre elles soit réduite par le phénomène de barrettes (ce qui nous a obligé à réétalonner radiométriquement l'image entière), elles sont utilisables et ont fait l'objet de classifications.

Après avoir défini les questions, délimité le cadre de notre intervention, et cerné celui de l'utilisation des données satellitaires, nous exposerons dans les paragraphes qui suivent, le détail des procédures qui ont été suivies pour l'obtention de nouvelles images adéquates.

4. PROCEDURES ET TECHNIQUES

4.1. Sites archéologiques et images satellitaires

La plupart des sites archéologiques ne peuvent être identifiés sur les images.

En effet, la surface d'un pixel Spot est de 400 m² en mode multispectral et de 100 m² en mode panchromatique, celle d'un pixel Landsat TM, de 900 m². Certains sites couvrent donc au sol de trop faibles étendues pour qu'il soit possible de les individualiser sur l'image. De façon paradoxale, c'est sur l'image Landsat TM que l'on en repère le plus grand nombre. La taille des objets au sol et le pouvoir de résolution spatiale du capteur ne sont donc pas seuls en cause. Le repérage d'un site dépend aussi de son environnement. Ainsi, s'il se trouve "noyé", comme sur les images Spot de la région de Hisar, au sein d'un espace très hétérogène et de texture complexe, il faudra que sa taille soit bien supérieure à celle d'un pixel pour qu'il puisse être repéré. Si le site se trouve au contraire dans un environnement homogène, et que les caractéristiques spectrales des surfaces voisines contrastent fortement avec les siennes, comme c'est le cas sur l'image TM du Cholistan, des objets, même de petite taille, pourront être détectés. Il semble que l'information spectrale joue ici un plus grand rôle que l'information spatiale, non en termes d'identification des objets, mais en termes de contrastes.

Par ailleurs, même lorsque des sites peuvent être décelés sur l'image, il n'est possible de les interpréter comme tels que si l'on dispose de données extrinsèques.

En effet, les critères utilisés par les archéologues pour une identification de sites et vestiges sur le terrain ne sont pas discriminants sur l'image. Ainsi, les tessons de poterie qui jonchent certaines surfaces et constituent pour eux un indicateur solide de la présence d'un ancien site, n'ont pas une réponse spectrale spécifique. La couleur des tessons n'est pas uniforme ni d'un site à un autre, ni sur un même site, qu'ils soient ou non couverts de terre. La proportion de ces débris par rapport à celle du sol nu n'est pas non plus constante. Certains sites aujourd'hui de plein champ peuvent être labourés et couverts de cultures, alors que d'autres s'inscrivent dans les espaces non cultivés situés autour des villages actuels ou bien sous les villages actuels. La forme des sites n'étant pas spécifique, il est très difficile aussi d'utiliser ce critère pour tenter de les mettre en évidence ou pour les identifier.

Notre objectif est, nous l'avons vu, d'étudier la localisation de tous les sites recensés au sein de l'espace couvert par les images satellitaires choisies. Les données archéologiques n'apparaissant pas toujours sur les images, ou n'étant pas identifiables en tant que telles, doivent être intégrées artificiellement pour que cet objectif puisse être atteint.

Tous les sites sont repérés dans l'espace par leurs coordonnées géographiques en latitude et en longitude (en degrés, minutes et secondes). Pour la région de Hisar (Haryana), celles-ci ont été obtenues à partir des cartes topographiques au 1/50 000 sur lesquelles ont été repérés les sites lors des prospections archéologiques. L'erreur attachée à ce transfert (sol / carte), serait, selon H.-P. Francfort, inférieure à 200 m environ, ce qui paraît plausible compte tenu de la nature du milieu, du grand nombre de repères existant à la fois sur le terrain et sur les cartes (repères de type route, canal, chemin, bornes kilométriques, villages). Certains sites sont même mentionnés sur les cartes en tant que buttes (chap. I.2.1.). Les mêmes données concernant la zone prospectée par M. R. Mughal au Cholistan, nous ont été communiquées sous la forme d'une liste, sans qu'il soit fait référence aux cartes topographiques, et nous ignorons de quelle façon elles ont été obtenues.

Même s'ils ne sont pas visibles, les sites appartiennent à l'espace de l'image comme à l'espace géographique. Il paraissait donc tout à fait justifié de les y faire figurer en superposant à l'image une forme qui les représente, de taille proportionnelle à la surface qu'ils occupent au sol.

L'insertion de ces données extrinsèques dans le fichier de données-images supposait que soient résolus plusieurs problèmes. Il fallait, en particulier, que l'on puisse :

- passer d'un système de localisation (sol ou carte) à un autre (image),
- positionner le site au bon endroit, c'est-à-dire là où il se trouve effectivement dans l'image,
- le matérialiser.

Une nouvelle image, une image des sites, devait ainsi être créée et être superposable à n'importe quelle autre : canal original, composition colorée, image classée, images des composantes principales, image lissée ou filtrée, etc.

Comme nous l'avons vu, les sites sont décrits par deux variables (§ I.2.3. et I.2.4.). Il était donc intéressant d'enrichir l'analyse en codant les pixels-sites selon les modalités prises par les différents caractères :

- période(s) d'occupation,
- superficie,

4.1.1. Recalage

La localisation géographique de chacun des sites recensés en Haryana dans la région de Hisar a été reportée sur les images par le recours aux procédés de la photo-interprétation. La localisation des sites sur les images et sur les cartes topographiques au 1/50 000^e sur lesquelles elle se trouve indiquée ont été comparées. La superposition des images restituées sur papier et des cartes à la même échelle montre, dans tous les cas, la coïncidence entre la localisation d'un site sur la carte et sur l'image.

Le cas est différent pour la région de la Hakra au Cholistan puisque nous ne possédons pas de données autres que la liste des coordonnées géographiques des sites, sans autre référence à leur environnement. Nous avons donc recherché une méthode automatique et qui minimise les risques d'erreur, tout en étant la plus objective possible.

4.1.1.1. Utilisation de la méthode de régression linéaire

Il s'agit de combiner deux types de données : les images satellitaires, où chaque point-pixel est situé à l'intersection d'un espace-ligne et d'un espace-colonne, et les sites archéologiques repérés par leurs coordonnées géographiques en latitude et en longitude. Ce qui revient à établir, pour une image donnée, une relation entre latitudes et lignes et entre longitudes et colonnes.

Nous cherchons à déterminer un modèle linéaire à partir d'un ensemble de trente sites de référence (amers) pour lesquels sont connues avec certitude coordonnées géographiques et coordonnées-images en ligne-colonne.

Ce modèle peut être approché par le calcul d'une fonction de régression. Latitude et longitude sont des variables indépendantes, lignes et colonnes les variables à ajuster (les variables dépendantes). On recherche une variable théorique qui serait telle que tous les points soient alignés sur une droite.

La qualité de la régression est appréciée par :

- l'examen de la droite de régression,
- le calcul du coefficient de détermination R^2 , (qui donne la part de variance de la variable dépendante exprimée par la droite de régression),
- le calcul du coefficient de corrélation R .

La régression est jugée satisfaisante lorsque ces coefficients sont supérieurs à 0,95.

Les modèles ainsi calculés à partir des sites de référence sont appliqués à l'ensemble des sites. Comme chaque ajustement est entaché d'une erreur (les résidus qui constituent l'information perdue par les droites), les points ne sont pas toujours bien localisés sur l'image. L'image des sites doit donc subir dans un second temps un recalage géométrique.

4.1.1.2. Recalage géométrique

Le recalage géométrique consiste à déformer l'image des sites pour qu'elle soit superposable à l'image satellitaire.

A partir des coordonnées de trois points de référence, on effectue un recalage linéaire (c'est-à-dire qu'une droite dans l'image de départ restera une droite dans l'image d'arrivée).

Les coefficients A, B, et C, U, V, et W sont calculés.

Le programme résoud deux systèmes de trois équations à trois inconnues :

$$L_1 = A \cdot L_2 + B \cdot C_2 + C$$

$$C_1 = U \cdot L_2 + V \cdot C_2 + W$$

où L_1 et C_1 sont les coordonnées d'un point de référence dans l'image de départ et L_2 , C_2 , les coordonnées du même point dans l'image d'arrivée.

4.1.1.3. Contrôle des résultats

Une fois calculées les coordonnées des sites en lignes et en colonnes, et l'image résultante recalée géométriquement, nous disposons d'une image des sites qui peut être mise en relation par n'importe quelle opération arithmétique ou logique avec l'image satellitaire qui lui correspond, quelle que soit sa nature, image brute ou image traitée.

Les résultats du recalage géométrique n'ont donc pu être contrôlés que pour l'ensemble des trente sites de référence directement identifiables sur l'image. Il s'est avéré, dans ce cas également, satisfaisant dans la presque totalité des cas. Trois sites de référence sont cependant décalés par rapport à leur position sur l'image. Mais cette erreur ne dépasse pas dix pixels en ligne ou en colonne et serait donc inférieure à 200 m sur le terrain.

4.1.2. Le codage des données

4.1.2.1. Les données relatives à la région de Hisar

Les 162 sites localisés sur les deux scènes Spot sont décrits par deux variables :

- leur séquence culturelle, c'est-à-dire les différentes phases d'occupation qu'ils ont connues,
- leur superficie, mesurée de façon approximative (en hectares).

La première variable comporte 9 modalités, à savoir, des plus anciennes aux plus récentes, les périodes :

- proto-harappéenne (PH),
- harappéenne (H),
- harappéenne tardive (LH),
- de la céramique grise peinte (PGW),
- de la céramique noire polie (NBPW),
- kushane (K),
- Rang Mahal (RM),
- médiévale ancienne (EMA) et
- médiévale récente (LMA).

Mais chaque site a pu connaître plusieurs phases d'occupation qui ne sont pas forcément consécutives (§ I.2.3.2). C'est pourquoi, s'il est intéressant de pouvoir disposer d'une image

de leur distribution pour une période donnée, il est également nécessaire de savoir à quel type d'environnement correspondent les différents profils culturels rencontrés et de voir si les phénomènes de ruptures culturelles qui ont été mis en évidence par l'analyse des sites s'accompagnent des mêmes discontinuités dans l'occupation de l'espace.

Ainsi, en plus des neuf images correspondant aux neuf phases culturelles mises en évidence en Haryana, nous avons créé une image des profils où chaque site est codé de 1 à 46 selon les périodes d'occupation qui le caractérisent (Tabl. 5).

La superficie des sites, bien qu'elle doive être prise en compte avec prudence, a également été codée. Ainsi, le nombre de pixels qui, en largeur et en longueur, représentent les sites sur l'image, est proportionnel à leur surface sur le terrain (Tabl. 11).

Tabl. 11 : Superficie des sites archéologiques sur le terrain et sur l'image (région de Hisar)

Superficie du site sur le terrain (ha)	Taille du site sur l'image Spot (pixels)
0 - 1	5 x 5
1 - 2	7 x 7
2 - 10	16 x 16
> 10	22 x 22

4.1.2.2. Les données relatives à la paléovallée de la Hakra

Les 393 sites recensés dans le désert du Cholistan sont, de la même façon que ceux de la région de Hisar, décrits par les deux variables, période d'occupation et superficie.

La séquence culturelle mise en évidence par l'analyse archéologique (Mughal, 1980) diffère quelque peu dans son découpage de celle de l'Haryana (cf. § I.2.3.2). Les sites sont ainsi classés en fonction de leur appartenance à l'une des six grandes phases suivantes :

- de la céramique Hakra (HW)
- harappéenne ancienne (PH),
- harappéenne mûre (H),
- harappéenne tardive (LH),
- de la céramique grise peinte (PGW),
- historique ancienne et médiévale (EH&M).

Dans ce secteur, ils n'ont souvent connu qu'une seule période d'occupation. Une seule image est donc suffisante pour représenter l'ensemble des données.

A partir de l'étude de M. R. Mughal, nous avons réparti l'ensemble des sites en cinq classes de superficie (§ I.2.3.2.) qui ont été codées différemment sur l'image (Tabl. 12).

Tabl. 12 : Superficie des sites archéologiques sur le terrain et sur l'image (Cholistan)

Superficie du site sur le terrain (ha)	Taille du site sur l'image Spot (pixels)
0 - 5	5 x 5
5 - 10	9 x 9
10 - 15	12 x 12
15 - 20	14 x 14
> 20	18 x 18

Les différentes modalités des caractères qui concernent le temps, période ou profil d'occupation, peuvent être visualisées indépendamment les unes des autres.

Celles de la variable superficie, qui n'est pas codée par une valeur numérique, mais par une surface, ne peuvent être individualisée par un seuillage. Seule une différenciation visuelle permet de rattacher un site à une classe ou à une autre. En effet, comme nous ne disposions que de 256 valeurs possibles de codage, il était difficile d'associer à chacun des sites une valeur numérique qui résulte de la combinaison de l'ensemble de leurs caractères.

Nous rappellerons au chapitre IV les quelques principes qui ont régi l'analyse des relations entre les sites archéologiques et leur environnement, telles qu'elles ont été modélisées selon les règles décrites dans le présent chapitre.

4.2. Les étapes de l'analyse typologique

L'analyse typologique, également appelée classification ou taxonomie, permet de décomposer sur la base d'une sélection de critères une population donnée d'individus décrits par un ensemble de variables, en un certain nombre de sous-ensembles homogènes (ou que le raisonnement considère comme tels).

Le choix des données, première étape de l'analyse typologique, exerce une influence quasi déterminante sur les résultats. Il porte sur les objets à analyser d'une part, et d'autre part sur les variables qui les décrivent.

C'est au choix d'un type de classification et d'un nombre de classes qu'il faut ensuite procéder avant d'obtenir de nouvelles images. En effet, toutes les connaissances que nous possédons dépendant comme le notait déjà Linné en 1737, "des méthodes par lesquelles nous distinguons le semblable du dissemblable" (Linnaeus, *Genera Plantarum*, 1737, in Chandon et al., 1981), il s'agit de *choisir* les conventions du découpage de telle sorte que les éléments soient bien classés au regard des utilisations prévues de la classification.

Il faut ensuite décrire chacun des groupes qui ont été formés et leur donner une signification thématique a posteriori, associer aux réalités ainsi construites "des schémas hypothético-déductifs, des constructions logiques qui reproduisent les relations de causalités repérées ou supposées entre les éléments de la construction" (Volle, 1981, p. 248). A cette étape d'interprétation s'ajoute celle de la validation des résultats où l'on évalue la qualité de la classification obtenue, c'est-à-dire son adéquation aux objectifs thématiques, sa capacité à résoudre les problèmes posés. Lors de ces deux étapes essentielles, les données intrinsèques -données-images- sont utilisées en combinaison avec des données extrinsèques, parmi lesquelles celles que nous obtenons directement sur le terrain.

4.2.1. Le choix des objets : procédures d'échantillonnage

Les objets à analyser sont des pixels. La population totale de l'ensemble étudié est contenue dans une scène, "surface dont le gabarit résulte des propriétés de champ du capteur" (COMITAS, 1988), soit 9 millions d'informations-pixels dans chacune des trois bandes spectrales d'une image Spot (XS), et 36 millions dans chacune des six bandes d'une image Landsat TM ¹.

Le volume des données ne permet pas une analyse exhaustive de la population à classer ; il impose donc dans un premier temps, la pratique d'un échantillonnage de l'image, le classement de l'image entière étant pratiqué ultérieurement, sur la base des règles de discrimination établies à partir des classes obtenues sur l'échantillon. Dans notre optique qui, rappelons-le, est l'obtention d'un zonage général de l'image, l'échantillonnage doit être représentatif de sa structure, c'est-à-dire des différences de comportement radiométrique des surfaces. Le critère choisi pour l'échantillonnage est ainsi la plus ou moins grande différence qui existe entre les individus ; l'effectif total de l'échantillon calculé sera d'autant plus grand et le pas d'échantillonnage petit que les caractères des objets-pixels seront différents, donc que la variance de la population de départ sera élevée. L'échantillonnage aléatoire systématique est considéré comme le plus efficace compte tenu des objectifs et de la nature des traitements auxquels sera soumis l'échantillon (Andrianasolo, 1987).

La taille de l'échantillon et le pas de l'échantillonnage, sont déterminés en fonction :

- de la variance de la population ; celle-ci étant décrite par plusieurs variables, les trois bandes spectrales Spot (XS) ou les six bandes TM, on retient la variance la plus forte ;
- du degré de précision souhaité : un niveau de probabilité (99%, 95%, 90% des valeurs de l'échantillon) est associé à l'intervalle dans lequel doit se trouver la moyenne de la valeur estimée,
- de l'amplitude de cet intervalle (deux, un, un-demi... écart-type).

¹ Nous n'avons pas utilisé le canal 6 de TM (infrarouge thermique).

La taille de l'échantillon n est donnée par l'équation suivante :

$$n = \frac{r^2 \cdot \text{var}(x)}{\frac{I^2}{4}}$$

où :

- r est la valeur associée au niveau de précision souhaité :

Niveau de probabilité	Valeur de r
99%	2,58
95%	1,96
90%	1,64

- $\text{var}(x)$, la variance estimée sur la variable d'étude x ,

- I , l'amplitude de l'intervalle (en σ) associé à l'estimation de la moyenne de l'échantillon autour de celle de la population.

La nécessité d'obtenir un seul échantillon représentatif des quatre quarts de scènes aux variances dissemblables, nous a conduit à utiliser une autre méthode, un sondage stratifié de Neyman, pour échantillonner l'image Landsat TM.

- 1° Chaque quart de scène est soumis en premier lieu à un échantillonnage aléatoire systématique.
- 2° Les quatre échantillons obtenus sont *concaténés*, et les paramètres d'échantillonnage (taille et pas) sont calculés sur cet échantillon.
- 3° Pour une représentativité d'un niveau de confiance de 95% et un intervalle de 1,5 écart-type centré sur la moyenne, on procède ensuite au calcul effectif du pas et de la taille d'un échantillon pour chaque quart de scène selon la formule :

$$n_{Qi} = \frac{n}{\sum_{Q=1}^{Q=4} N_Q \cdot \sigma_Q} \cdot N_Q \cdot \sigma_Q$$

où :

- n_{Qi} est l'effectif total de l'échantillon à constituer pour un quart de scène (inconnue),
- n est l'effectif total de l'échantillon calculé sur l'image entière,
- N_Q est l'effectif de la population d'un quart de scène,
- σ_Q l'écart-type caractérisant la population totale d'un quart de scène (on retient la plus forte valeur de l'écart-type parmi les six canaux).

- 4° Les 4 échantillons ainsi obtenus sont assemblés

4.2.2. Le choix des variables

Après avoir sélectionné un échantillon d'objets, le choix de la ou des variables les caractérisant le mieux, est une étape capitale car c'est certainement celle qui a le plus d'influence sur la formation des groupes d'objets (Chandon *et al.*, 1981, p. 29). Idéalement,

il s'agit de choisir à la fois les variables les plus pertinentes vis-à-vis du problème posé et celles qui véhiculent le plus d'information.

4.2.2.1. Les bandes spectrales originales

L'objectif est nous le rappelons, d'obtenir un zonage global, c'est-à-dire une division de l'image en classes homogènes et contiguës qui prennent en compte l'ensemble des phénomènes enregistrés dans les données, et non de délimiter l'aire d'extension d'un thème particulier. La démarche adéquate veut que l'on ait recours à l'ensemble des variables originales pour classer les individus.

Ces variables, quantitatives et mesurables, sont les bandes spectrales, portions du spectre électromagnétique allant du visible au moyen infra-rouge. Elles décrivent la totalité des individus de la population étudiée, de telle sorte que chacun d'entre eux est caractérisé par une valeur unique sur chaque bande spectrale.

4.2.2.2. Les axes discriminants

Le pouvoir discriminatoire des variables originales peut être accru, non pas *a priori* pour mettre en évidence et délimiter un thème particulier, mais *a posteriori*, une fois la classification réalisée.

Cela revient à se poser la question de savoir si tel ou tel individu i de la classe x ne serait pas mieux placé dans une autre classe. Il est ainsi possible d'optimiser la classification de façon à minimiser les variations à l'intérieur des groupes et à les maximiser entre groupes en calculant une fonction discriminante sur les classes issues de la partition d'un échantillon d'individus décrits par les bandes spectrales originales.

Le nuage de points-pixels (la valeur des points) est projeté sur un axe dit discriminant issu d'une combinaison linéaire regroupant tout ou partie des variables initiales affectées d'un coefficient calculé en fonction de leur pouvoir discriminant. Les variables les plus discriminantes, celles qui contribuent le plus fortement à la caractérisation des groupes sont celles qui rendent maximum le rapport de la variance entre les classes et de la variance intra-classes. Les individus sont décrits par leur position sur l'axe ou les axes discriminants sur lesquels ils sont projetés.

Les classes issues d'une partition des individus décrits par une variable discriminante, s'ordonnent sur l'axe, de sorte qu'une fois identifiée la signification générale de la partition, on sait que les classes en position extrême sont, vis-à-vis de la partition, les plus opposées ; l'interprétation en est plus facile.

L'utilisation des variables discriminantes, assez peu développée en télédétection, répond parfaitement aux objectifs en permettant la mise en évidence des oppositions, des contrastes majeurs qui existent au sein des données, sans que soient formulées a priori des hypothèses sur les thèmes qui apparaissent dans l'image (utilisation des indices) ou sur une structure particulière des données (utilisation des composantes principales). Après analyse et comparaison, selon Andrianasolo (1988) l'axe discriminant s'avère, en termes de variance, toujours supérieur à tout autre ensemble de variables. Il offre en outre le double avantage de réduire le volume des données (le nombre d'axes discriminants est inférieur au Sup du nombre de classes ou au Sup du nombre de variables initiales) et de permettre une plus grande facilité d'interprétation des classes.

4.2.3. La constitution des classes ou la stratégie d'agrégation

Le principe des méthodes de classifications non dirigées consistant à rechercher une partition des données fondée sur leur propre structure (Girard, 1989, p. 126), une partition est optimale si elle s'appuie sur des critères qui mettent en évidence cette structure de façon optimale. Elle doit permettre d'établir des limites significatives, qui maximisent les contrastes, les différences entre les composantes du nuage de pixels et isolent par là même les unités homogènes ; c'est pourquoi le modèle général de classification retenu ici est identique à celui qui a été choisi dans la phase de sélection des variables discriminantes.

Lorsqu'une population est divisée en classes, sa variance totale se décompose. L'inertie d'un nuage de points peut ainsi s'écrire, selon le théorème de Huigens :

$$T=W+B$$

où :

T est l'inertie totale (variance), T est constante
W la variance intraclasse,
B la variance interclasses.

Le critère recherché doit être tel que W soit minimale et B maximale. Les modèles de classification répondant à ce critère appartiennent au type dit de "classification par réallocation" ou par "agrégation autour de centres mobiles".

La méthode de classification autour de centres mobiles (Diday, 1971 ; Anderberg, 1973 ; Hardigan, 1975) a pour but de construire une partition unique en k classes disjointes. La partition initiale est générée ici par un tirage au hasard de n individus de l'ensemble des données qui constituent des centres de classes provisoires, et induisent une partition en n classes, chaque individu étant affecté à la classe dont le centre calculé est le plus proche. La quantification des différences entre individus repose pour la méthode de classification par réallocation exposée ici, sur l'utilisation de la distance euclidienne.

Q nouveaux centres de gravité, ceux des classes précédentes, sont déterminés et induisent une nouvelle partition. Et ainsi de suite jusqu'à ce que la qualité de la partition en n classes, mesurée par l'inertie, ne s'améliore plus, c'est-à-dire lorsque la variance intraclasse ne décroît plus d'une itération à une autre et est en l'occurrence minimale.

Pour l'obtention d'une partition de la population de l'échantillon en un nombre de classes donné, huit essais sont réalisés. La partition retenue est celle dont l'inertie interclasses est la plus forte.

4.2.4. Combien de classes ?

Dans toute procédure de classification automatique se trouve posée la question de la quantité de groupes que l'on va individualiser au sein d'une population. Rappelons que le critère de partition choisi est tel que, pour un nombre n de classes, la décomposition de la variance totale tend vers une minimisation de la variance intraclasse et corrélativement vers une maximisation de la variance interclasses. Selon ce critère, une multitude de partitions de la population échantillon peut être générée, constituant un ensemble fini, théoriquement borné par le nombre d'individus traités. Dans le contexte d'une démarche non dirigée, n'ayant pas d'a priori sur l'organisation en classes des individus, c'est à des critères statistiques et non thématiques que nous avons fait appel pour justifier le choix d'un nombre de classes.

4.2.4.1. Un nombre maximal de classes

Selon Deroo-Dussaix (1980, *in* Andrianasolo, 1987), le nombre de classes à construire sur un échantillon doit être, suivant la règle de décomposition d'un histogramme, voisin de :

$$5 \log (n)$$

tel que n est l'effectif de l'échantillon représentatif.

Si ce nombre peut être retenu et utilisé comme un nombre maximal théorique de classes (Andrianasolo, 1987), il ne peut être confondu avec un nombre *optimal* de classes. Disons que la meilleure partition est à rechercher entre 2 et ce nombre maximal.

4.2.4.2. Un nombre optimal de classes

Toujours dans la perspective du tracé de limites objectives entre les individus d'une population-image, c'est-à-dire de limites indépendantes de tout raisonnement a priori sur leur signification, le critère de détermination du nombre optimal de classes qui a été utilisé est un critère statistique. Il peut donc être appliqué à n'importe quelle image pour le même objectif. Ce critère, mis au point par H. Andrianasolo (1991), permet, conformément au modèle utilisé pour le choix des variables ou celui de la stratégie d'agrégation des individus, de trouver au sein de l'ensemble des partitions (de 2 classes au nombre maximal de classes) calculées successivement, celle où la structuration des données est optimale. Le problème est en effet de savoir, sans recourir à des connaissances a priori, si pour un nombre

de classes donné, les limites créées par le modèle de classification correspondent ou non aux structures maîtresses de l'ensemble étudié.

En tenant compte notamment des caractéristiques de l'échantillon constitué par une classe d'une partition, du nombre de classes d'une partition, et du nombre d'individus contenus dans les autres classes, il est possible de déterminer si la classe peut être de nouveau découpée en vue de l'obtention d'un niveau de détail supérieur, selon le principe d'un arbre hiérarchique, et ce jusqu'à ce qu'aucune structure forte ne puisse plus être trouvée dans les données¹.

4.2.5. Extrapolation

Les partitions obtenues sur les échantillons doivent être extrapolées à l'ensemble de l'image.

Lorsqu'il s'agit de découper en deux classes la population totale d'une scène, décrite par un seul axe discriminant, on seuille l'image en prenant pour bornes les minima et les maxima qui caractérisent les classes construites sur la population échantillon.

Quand la population totale doit être découpée en un nombre de classes supérieur à 2, les classes étant décrites par deux ou trois axes discriminants, la classification est effectuée selon la méthode dite barycentrique, à partir des centres de classes calculés sur l'échantillon. Chaque pixel, caractérisé par une signature spectrale, est affecté à la classe dont le barycentre lui est le plus proche au sens de la distance euclidienne.

4.2.6. Interpréter et valider les résultats

Le traitement des données, tel que nous venons d'en décrire les différentes étapes, nous a permis de délimiter des zones homogènes pour différents niveaux de détail, de la façon la plus objective possible, c'est-à-dire sans qu'il soit besoin d'introduire des connaissances extérieures aux données elles mêmes. Compte tenu des données et de notre objectif, nous considérons l'arbre hiérarchique comme la meilleure représentation possible de l'ensemble étudié.

La prise en compte de l'information livrée par l'organisation hiérarchique de l'image rend plus aisée l'interprétation de l'image entière, et de ses différentes composantes. Les niveaux supérieurs nous renseignent sur les niveaux inférieurs et inversement. Les données traitées correspondent à un codage des valeurs de luminance des surfaces au-dessus desquelles passe le satellite. Ces données sont continues et spatialisées, de sorte que

¹ Le logiciel, LANITRA, permettant de décomposer l'image en niveaux emboîtés et hiérarchiques déterminés par le critère de recherche du nombre optimal de classe, a été mis au point à l'Unité de Télédétection de l'ORSTOM par H. Andrianasolo.

l'image correspond à un certain aspect, à une certaine portion de la réalité que constituent ces mêmes surfaces au sol, et qu'elle nous renseigne sur cet aspect par le biais de la traduction que nous en faisons.

A un moment de la phase d'interprétation, nous nous écartons du modèle-image parce que toutes les articulations, tous les aspects ne sont pas nécessaires pour notre propre construction. Celle-ci n'est pas objective en elle-même. C'est une construction intellectuelle créée par la sélection de certains éléments et l'élimination de certains autres, mais qui repose sur des données acquises de façon objective. Cependant, cette étape ne peut intervenir qu'après l'interprétation de l'image modélisée sinon elle risque de conduire à des représentations erronées. En effet, à partir du moment où l'on choisit d'utiliser l'image comme base de connaissance, et où on l'a transformée de façon telle que l'apport de connaissances soit optimal par rapport aux besoins, les réalités nouvelles ne peuvent plus être déformées à volonté au gré des besoins. C'est pourquoi l'interprétation des classes et des différents niveaux de partition de l'image constitue une étape essentielle de l'analyse typologique.

L'image a été divisée en classes, de telle sorte que les individus, qui sont des portions d'espace, regroupés au sein d'une même classe, soient les plus ressemblants possibles, au sens de leur comportement radiométrique dans les trois (Spot) ou six (TM) bandes de prélèvement de l'information, et que les individus ou portions d'espace appartenant à des classes distinctes soient les plus dissemblables possibles. Pour retrouver le sens des limites créées, deux types d'information sont utilisés : l'information intrinsèque, propre aux images (au modèle) et l'information extrinsèque, acquise par d'autres moyens que les satellites.

Si l'information intrinsèque constitue l'armature de l'interprétation du modèle-image, si elle doit jouer à tout moment le rôle d'un garde-fou en nous évitant de nous égarer au cours de cette phase de décodage, elle reste encore d'un apport limité dans le cas d'une exploration globale d'un espace quelconque. En effet, le critère de classification et la procédure de détermination du nombre optimal de classes sont tels que, d'une part les objets-pixels regroupés au sein des classes sont différents, même s'ils sont les plus proches possibles. Du fait que notre objectif n'était pas de retrouver un thème, ou un phénomène particulier, mais de découvrir les grandes structures, et l'organisation de l'image, c'est essentiellement l'information extrinsèque qui nous a véritablement permis de conduire à une description du contenu des classes.

4.2.6.1. La description des classes

La description des classes, c'est-à-dire de leurs caractéristiques intrinsèques : moyennes, écarts-types, distances entre leurs centres de gravité par exemple, constitue un premier pas vers la connaissance des individus qu'elles regroupent.

- Le comportement radiométrique des classes

Le comportement radiométrique des classes, c'est-à-dire la moyenne des classes dans les différentes bandes spectrales, peut être confronté à des connaissances opératoires acquises par la comparaison de courbes de réflectance, obtenues sur le terrain ou au laboratoire (Fig.33 à 36), avec les valeurs de luminance enregistrées par les capteurs.

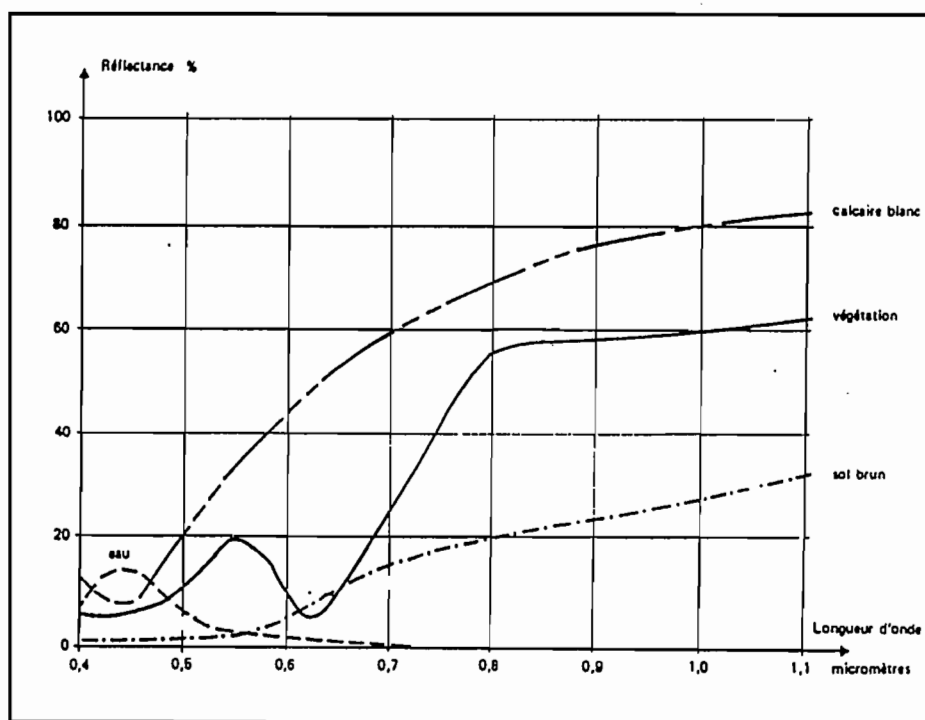
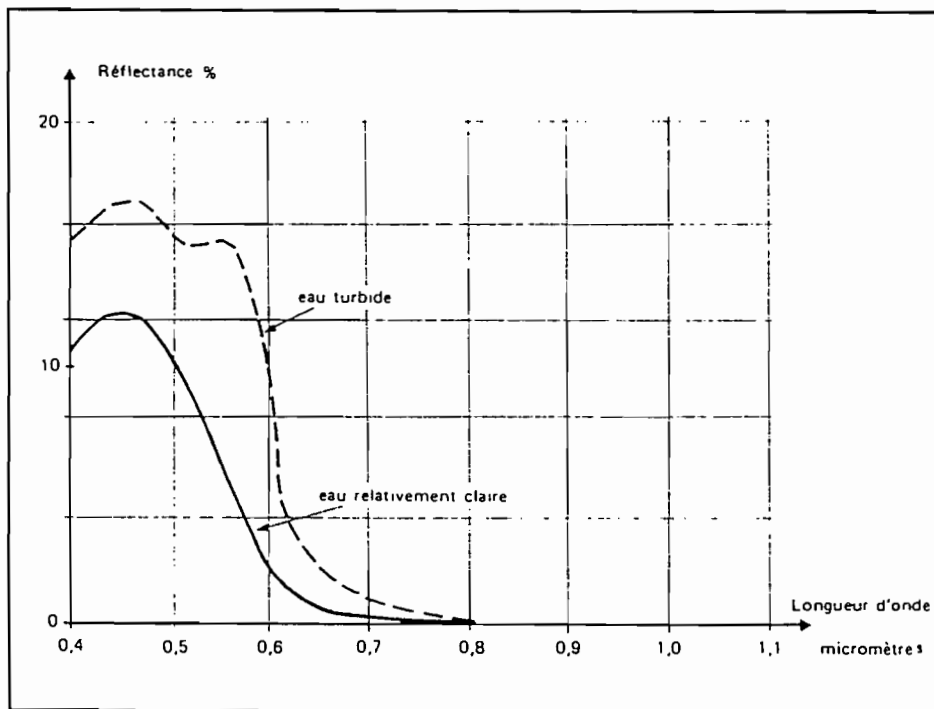
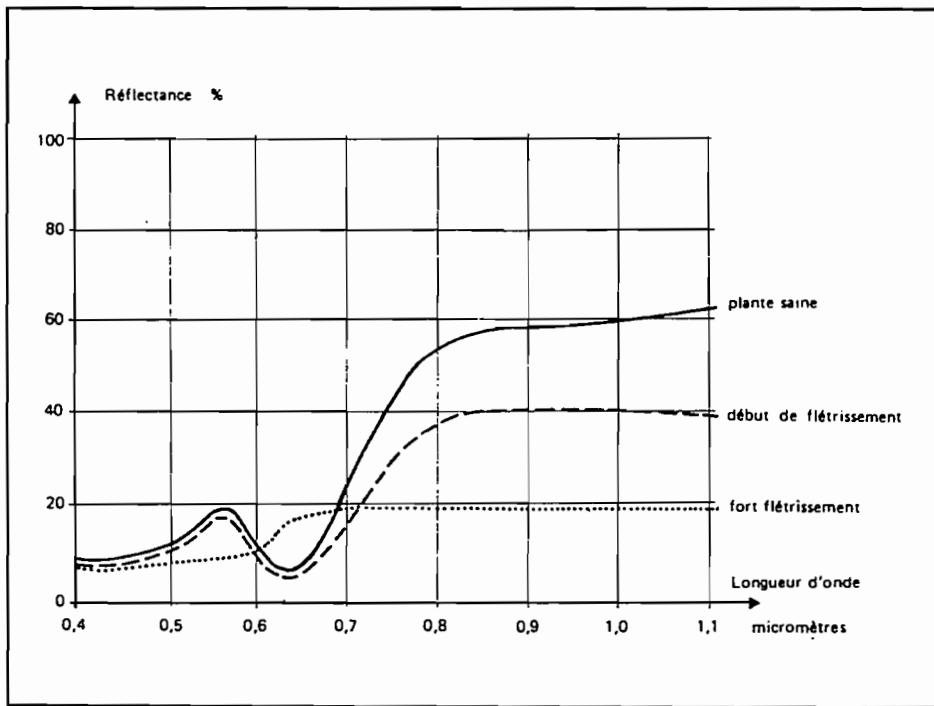


Fig. 33: Courbes schématiques de réflectance pour différents types de couverture du sol



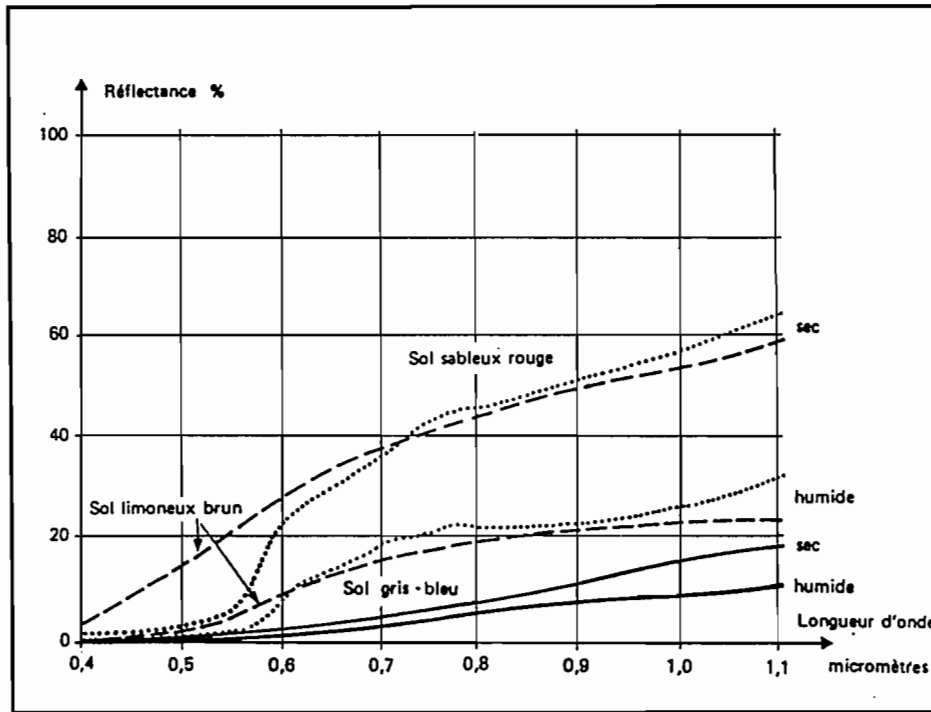


Fig. 36 : Courbes schématiques de réflectance de trois types de sols secs et humides

Il s'agit de connaissances théoriques sur les propriétés spectrales des thèmes qui peuvent être rencontrés, l'eau, la végétation, les sols par exemple, ou de celles des différents états de surfaces associés à chacun de ces thèmes et déterminés par différents facteurs comme la couleur, la composition minéralogique ou végétale, l'humidité, la rugosité, la pierrosité, la granulométrie, etc. (Guyot 1989 ; Girard 1989).

Cependant, on l'a dit, les classes ont été construites de telle façon qu'elles regroupent en général, et quel que soit le niveau de détail considéré, des surfaces dont les propriétés spectrales, et donc l'aspect au sol, peuvent être très différents. Ainsi, sauf lorsque l'on a individualisé des thèmes très caractéristiques, de grandes étendues d'eau, ou un certain type de végétation par exemple, l'examen des courbes des moyennes radiométriques des classes et leur comparaison à des courbes types ne sera pas suffisant pour qu'on puisse en identifier le contenu. On observera donc plutôt la position relative des courbes d'un même niveau de l'arbre hiérarchique les unes par rapport aux autres, ou celle des courbes d'une même classe pour des niveaux différents.

On étudiera les distances entre les centres de gravité des classes, ce qui nous fournira une indication sur les proximités entre la nature des surfaces ou au contraire leur éloignement.

- Situation des classes par rapport à des variables du type "indices"

Après une caractérisation sommaire des classes par la comparaison de leurs courbes spectrales à des courbes de référence, on cherche à nouveau à mettre en évidence des

différences en les situant par rapport à des indices. Etabli pour des images spécifiques, le calcul d'indice est une "méthode standard, définie à partir de considérations théoriques sur un grand nombre d'images et utilisée depuis de manière identique sur toutes les images" (Girard, 1989, p. 130).

Nous avons retenu les deux indices dont le comportement est le plus facilement interprétable, l'indice de végétation et l'indice de brillance.

La formule de l'indice de végétation que nous avons utilisé, également connu sous le nom de *Normalised Difference Vegetation Index* ou d'indice de végétation verte, est la suivante :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

où PIR : proche infrarouge

R : rouge

soit :

$$NDVI = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3} \quad \text{pour les images Landsat TM,}$$

$$NDVI = \frac{XS3 - XS2}{XS3 + XS2} \quad \text{pour les images Spot.}$$

Les pigments de la végétation - parmi lesquels la chlorophylle - montrent deux maximum d'absorption, un dans le bleu ($0,43\mu m$) (non couvert par les canaux TM et Spot) et un dans le rouge ($0,66\mu m$) correspondant à TM3 ($0,63-0,69\mu m$) et XS2 ($0,61-0,69\mu m$). La végétation montre aussi un maximum de réflectance dans le proche infra-rouge, ($0,75-1,1\mu m$), plage qui correspond à la bande spectrale XS3 de Spot ($0,79-0,89\mu m$) et 4 de TM ($0,76-0,90\mu m$). Le rapport de combinaisons linéaires permet ainsi de différencier les surfaces plus réfléchantes dans le rouge que dans le proche infra-rouge, en particulier, l'eau, les nuages, etc. (NDVI tend alors vers -1), des surfaces absorbantes dans le rouge et réfléchantes dans le proche infra-rouge, caractéristiques de la végétation verte (NDVI tend vers +1). Entre ces extrêmes, roches et sols nus, dont le comportement tend à être identique dans les deux bandes spectrales, sont caractérisés par des valeurs de NDVI proches de 0.

L'indice de brillance, dont la formule est la suivante :

$$IB = \sqrt{R^2 + PIR^2}$$

soit :

$$IB = \sqrt{TM3^2 + TM4^2} \quad \text{pour les images Landsat TM}$$

$$IB = \sqrt{XS2^2 + XS3^2} \quad \text{pour les images Spot}$$

délimite, comme son nom l'indique, les surfaces claires et par extension, souvent, les surfaces nues ou/et lisses.

Les valeurs fortes de cet indice correspondent en effet à des surfaces ayant des comportements similaires, réfléchissant, dans les deux bandes spectrales (ce qui exclut notamment les zones couvertes de végétation verte chlorophyllienne).

Le calcul de ces deux indices pour chacune des classes créées, permet de les classer en fonction de deux critères que sont la présence de végétation et l'aspect général des surfaces (couleur, rugosité, "brillance").

- **Situation des classes sur les axes discriminants**

Comme nous l'avons vu au paragraphe 4.2.2., les classes s'ordonnent sur un axe discriminant. Nous pouvons voir ainsi dans quelle mesure il existe un recouvrement entre les classes, celles situées en positions extrêmes sur l'axe étant par ailleurs les plus différentes et les plus opposées pour une partition donnée.

4.2.6.2. La répartition spatiale des classes

Une des étapes de l'interprétation des résultats consiste à analyser la répartition des classes dans l'espace géographique.

La distribution des classes est en effet très souvent significative, certaines distributions spatiales d'objets ou de groupes d'objets rappelant des schémas connus d'organisation. C'est aussi un puissant facteur de compréhension et d'explication des relations spatiales qui existent entre les classes, et donc entre les régions correspondantes de l'image.

Cette approche comporte un aspect quantitatif : la surface relative des différents groupes d'individus, et un aspect qualitatif : leur distribution.

Il est possible en effet d'associer à la signification d'une classe un poids relatif qui s'exprime en termes de surfaces couvertes et peut être évalué par le calcul du rapport entre le nombre de pixels contenus dans une classe (pour un niveau de détail donné) et le nombre total de pixels classés. On peut ainsi "hiérarchiser les différents thèmes de la nomenclature selon ce critère".

L'aspect qualitatif de l'approche spatiale des images classées concerne la distribution des groupes. Il s'agit de décrire et d'analyser la connexité, la proximité ou l'éloignement dans l'espace des groupes appartenant ou non à un même niveau, ainsi que la distribution au sein de l'image des différents ensembles de pixels d'une même classe. Elle conduit aussi à une description de la forme des groupes, celle-ci pouvant être significative de leur contenu.

4.2.6.3. Les connaissances extrinsèques

Nous rappelons que par le terme "extrinsèques", nous entendons l'ensemble des connaissances disponibles sur les secteurs étudiés, obtenues par d'autres moyens que par les

satellites, parmi lesquelles : les cartes topographiques, anciennes ou plus récentes, quelques rares cartes ou croquis thématiques, ainsi que des observations et des analyses effectuées par d'autres pour d'autres objectifs, avec d'autres méthodes. Les photographies aériennes n'étant, en Inde comme au Pakistan, pas diffusées, nous n'avons pas même pu les consulter.

Notre objectif n'était pas de vérifier que l'information-image correspondait à l'ensemble des connaissances déjà acquises, mais de confronter ces différents points de vue d'une même réalité, de mettre en évidence des corrélations ou à l'opposé des contradictions qui nous auraient amenée à contrôler la manière dont les faits ont été acquis et à formuler de nouvelles hypothèses quant aux faits eux-mêmes.

• Les cartes

Les cartes topographiques les plus récentes, dont les références sont résumées dans le tableau 13, datent pour l'Haryana et le Rajasthan de 1966 à 1978, et pour le Pendjab pakistanais de 1954-1955.

Tabl. 13 : Les cartes topographiques

PAYS	ECHELLE	DATE	SOURCE
Inde	1:50 000	1966-78	Survey of India
	1:250 000	1975-77	Survey of India
	1:500 000	1974	Tactical Pilotage Chart (USA)
	1:1 000 000	1987	Tactical Pilotage Chart (USA)
Pakistan	1:250 000	1954-55	U.S. Army Map Service
	1:500 000	1974	Tactical Pilotage Chart (USA)
	1:1 000 000	1987	Tactical Pilotage Chart (USA)

Ces cartes nous ont été très utiles pour la localisation des données-images et pour une première identification des infrastructures -routes, voies ferrées, chemins, canaux d'irrigation- des villages et des points d'eau (tanks). Elles apportent assez peu d'informations en revanche sur le milieu physique, hormis les contours sommaires des zones d'accumulation sableuse, et le tracé des cours d'eau. Quelques points cotés et altitudes relatives fournissent des indications sur les pentes.

Des cartes topographiques plus anciennes (Tabl. 14) nous renseignent parfois sur l'évolution récente de l'occupation humaine. On parvient, par la superposition ou la réunion des cartes d'époques et d'échelles différentes et des données satellitaires, à décrire par exemple l'avancée ou le recul des superficies irriguées et les bouleversements qui s'en suivent, la densification de l'occupation ou, au contraire, la désertification, l'abandon des terres et des villages. Sur certaines de ces cartes, le tracé de paléo-cours d'eau, tel celui de la Ghaggar-

Hakra est indiqué, qui peut être comparé aux données fournies par les images (cf. Chapitre 1.4.).

Tabl. 14 : Les cartes topographiques anciennes

TITRE	ECHELLE	DATE
Bhawulpoor State (Punjab Revenue Survey)	<i>one inch to a mile</i> (1:63 000)	1869 - 1875
Derawar fort	<i>quarter inch</i> (1:253 440)	1916 et 1943
Bahawalpur	<i>quarter inch</i>	1920 et 1945
Khanpur	<i>quarter inch</i>	1917 et 1946
Suratgarh	<i>quarter inch</i>	1916 et 1944
Hanumangarh	<i>quarter inch</i>	1883 - 1919
Khairpur	<i>quarter inch</i>	1884 - 1919
De Hisar	<i>quarter inch</i>	1922 - 1937
Bahawalpur State	<i>half inch</i>	1935
Bahawalpur State	<i>one inch</i>	1935

Les cartes thématiques sont rares et à des échelles trop petites pour être vraiment intégrées au processus d'interprétation des images. Nous n'avons eu accès qu'à la carte géologique du Pakistan (1964) au 1/2 000 000^e, à une carte hydrogéologique à la même échelle (1989) ainsi qu'à quelques croquis pédologiques. Ces derniers couvrent des surfaces d'environ 100 km² (1/50 000^e, PCRWR-PADMU) correspondant aux sites de Dingarh (1983), Fort Abbas (1985), et Islamgarh (1986) au Cholistan. Les cartes de synthèse sont à de très petites échelles : supérieures au 1/5 000 000^e, et par conséquent souvent peu utilisables, du moins si on les combine avec les données satellitaires, et elles ne peuvent servir à une exploration efficace des réalités de l'espace régional considéré.

• Textes et chiffres

Les textes, qu'il s'agisse de récits mythiques, de descriptions de voyageurs, d'analyses, d'études géographiques, archéologiques, géologiques ou pédologiques, ou de synthèses diverses, sont autant de données extrinsèques qu'il faut intégrer à l'interprétation des images satellitaires telles qu'elles ont été modélisées. Le champ d'intérêt de ces apports bibliographiques, nombreux on l'a vu, s'est avéré cependant restreint car peu d'analyses ou même de simples observations sont repérées dans l'espace. Bien peu, même les plus récentes, ont donné lieu par exemple, nous venons de le voir, à une cartographie à grande échelle.

Cartes, textes ou chiffres, les données extrinsèques interviennent au cours de la phase d'interprétation des images classées. Apportant aux différents niveaux de détail, un maximum d'informations convergentes elles permettent de préciser ainsi la nature et le

fonctionnement de l'espace étudié tel qu'il est perçu, par le satellite et par les traitements effectués sur les images.

4.2.6.4. L'image et le terrain

L'apport d'informations extrinsèques au cours de la phase d'interprétation des résultats est une nécessité. Mais au total, il est apparu que peu d'entre elles pouvaient être directement mises en relation avec les données satellitaires, soit qu'elles n'étaient pas suffisamment spatialisées, soit qu'elles se trouvaient à des échelles inadéquates.

Le lien entre l'image satellitaire et le terrain semble être d'une autre nature, à tel point que l'on parlait il y a peu de temps encore, de "vérité-terrain".

Le terrain est une source de données extrinsèques. La plus exhaustive. C'est le comportement radiométrique de la surface terrestre qui est modélisé par le satellite. C'est donc en général au terrain que l'on fait référence avant tout pour vérifier ces informations acquises à distance. Théoriquement, il ne peut s'agir cependant d'une vérification puisque les données enregistrées ne peuvent être perçues par l'oeil, et que le pouvoir de résolution spatiale du capteur est inférieur au nôtre.

Par ailleurs, comme l'image enregistre l'état des surfaces qui varie beaucoup, en fonction par exemple d'une plus ou moins grande humidité, des différents types d'utilisation du sol, ou de la répartition de la végétation, il ne pourrait y avoir de vérification valable qu'effectuée au moment même de l'enregistrement de l'image et en tout point de celle-ci, ce qui, dans la pratique, est le plus souvent irréalisable. Dans notre cas, plus de deux ans ont séparé l'enregistrement des données et l'étape de reconnaissance du terrain. Une seule image Landsat MSS a été acquise au moment où nous nous trouvions sur le terrain. Celui-ci n'apporte donc pas une vérité, mais plutôt une autre réalité, l'espace selon un autre point de vue, qu'il nous a fallu confronter avec le modèle. Cette confrontation ne doit toutefois pas être comprise comme une "mise à l'épreuve" du modèle au terrain. Il s'agit de voir si ces informations de terrain permettent ou non de valider le modèle par rapport aux objectifs de départ. Le but est de trouver à quelle réalité correspondent au sol les limites établies sur l'image. Or les zones délimitées ne correspondent pas obligatoirement à la réalité que l'on recherche. L'homogénéité intrazone et l'hétérogénéité interzone peuvent ne traduire qu'un "phénomène momentané, n'affectant que la surface ou pouvant se localiser en des emplacements différents (croûte de battance sur un sol limoneux) d'une année sur l'autre" (Dizier *et al.*, 1980), et n'être pas significatives des thèmes/objets que l'on souhaite mettre en évidence. C'est pourquoi il est nécessaire, une fois établie la nomenclature correspondant au contenu des classes, de procéder à des regroupements en fonction des objectifs poursuivis.

Des limites ont été créées artificiellement dans un ensemble qui ne comportait pas naturellement de bornes, hormis celles imposées par le découpage des données en scènes d'égalles surfaces. Ces limites ont été fixées de telle sorte que les individus regroupés au sein d'une même classe aient davantage de ressemblances entre eux sur le plan de leur comportement spectral dans les bandes originales, qu'avec les individus appartenant à d'autres groupes. Certains groupes ont ensuite été à nouveau divisés après la première partition qui les a générés. Il s'agit, à l'aide des observations qui peuvent être faites sur le terrain de découvrir le pourquoi des limites artificiellement créées, et de faire correspondre à l'homogénéité des données une homogénéité sur le terrain (définie de façon qualitative ou quantitative), pour chacun des niveaux d'organisation.

- **Contraintes**

Dans un premier temps, il était indispensable de repérer avec précision l'endroit où nous nous trouvions sur le terrain par rapport à l'image, condition *sine qua non* d'une confrontation réciproque valable entre les deux types de données. A cette fin nous avons mis à la même échelle puis superposé, les images et les cartes topographiques disponibles. Cette opération n'a posé aucun problème particulier, et la bonne superposition des divers documents a pu être appréciée au niveau des réseaux de routes et de chemins, des canaux d'irrigation, et à celui des villages, qui sont des éléments pérennes et stables du paysage. Son but n'était pas de parvenir à une localisation précise, au pixel près, localisation rarement possible d'une part qui ici ne présentait pas d'intérêt particulier.

Seules ont été prises en compte les informations-terrain qui pouvaient être mises en relation avec les données-images. Cette contrainte impliquait 1) que les observations portent sur des espaces suffisamment vastes pour correspondre à une réalité sur l'image ; 2) que les informations images et terrain soient localisées sans ambiguïté. Cette dernière condition est parfois remplie avec difficulté dès que les repères classiques, réseaux ou villages disparaissent, notamment dans les espaces désertiques, et lorsque qu'aucune forme de relief stable ne vient pallier ce manque. C'est la raison pour laquelle un grand nombre d'observations ont été réalisées à proximité des axes routiers ou d'irrigation. Des observations complémentaires ont été faites ailleurs en d'autres points, mais leur localisation est plus aléatoire.

L'enquête de terrain devait porter par ailleurs sur l'ensemble des classes et l'ensemble des niveaux apparus au cours de l'analyse typologique en différents points de l'image. Bien évidemment plus le nombre de classes est élevé, plus la surface couverte par chacune d'elles est faible, et plus leur repérage au sol et donc leur interprétation deviennent difficile. On voit bien dans ce cas l'intérêt de la décomposition de l'image en niveaux par rapport à une classification directe en un nombre maximal de classes. La connaissance de la signification

des classes des faibles niveaux de détail permet en effet d'approcher celle des niveaux supérieurs.

• Méthodes d'enquête

Les observations ponctuelles qui se concrétisent par exemple par un sondage à la tarière, par le creusement d'une tranchée, ou le prélèvement d'espèces végétales en un point donné, se sont souvent avérées utiles. Parfois longues à réaliser, elles n'ont pu toutefois être pratiquées de façon systématique. Ce type d'observation nous a davantage servi à corroborer des hypothèses interprétatives qu'à identifier le contenu d'une classe. Grâce à ce type de sondage, nous avons pu montrer par exemple que certains linéaments visibles sur les images correspondaient à des unités hydrographiques.

Nous l'avons dit, le pixel n'a pas de réalité tangible directement perceptible sur le terrain, non seulement dans ses limites, mais aussi dans la nature de l'information qu'il contient. Les observations ponctuelles ont donc été limitées en nombre et remplacées par des *observations stationnelles*, portant sur des surfaces plus vastes, de façon à ce que la parcelle puisse effectivement et sans ambiguïté 1) être repérée sur l'image 2) être significative, c'est-à-dire représentative non seulement de l'ensemble des éléments constitutifs du pixel, mais aussi de l'ensemble des pixels regroupés au sein d'une classe.

A ce type d'approche nous avons associé *l'observation du paysage à partir d'un point donné*, (Dizier *et al.*, 1980) qui permet de décrire une région plus vaste ou "l'environnement de la station" et *des observation linéaires*, le long d'un axe.

Une fois localisées, les observations ont été faites selon le protocole suivant :

- Topographie, formes de relief, modelé.
- Identification du type de sol (texture, composition) :
 - sablo-limoneux,
 - sableux,
 - limoneux,
 - présence de concrétions carbonatées (*kankar*).
- Description sommaire des états de surface associés à ces grandes catégories :
 - granulométrie,
 - couleur (détermination à l'aide du code Munsell)
 - aspect pelliculaire.
- Description du couvert végétal naturel :
 - type dominant : arbres, buissons, herbes
 - associations dominantes (espèces)
 - densité du couvert.
- Description du type d'occupation du sol :
 - activités agricoles :
 - . types de cultures (d'été, d'hiver), espèces cultivées
 - . irrigation: par puits, par canal,
 - . culture pluviale,
 - . plantation (acacia, prosopis, arbres fruitiers),
 - village,
 - routes, chemins, pistes,
 - canaux d'irrigation,
 - mares (*tanks*).

4.3. La mise en évidence des linéaments

Notre objectif, à cette étape du traitement des images, était de mettre en évidence, de reconstruire de façon automatique, la continuité de linéaments fins, et de reconstituer un réseau éventuel en vue d'une interprétation géographique ou géomorphologique.

Les éléments structuraux, ensembles d'éléments texturaux organisés, constituent très souvent des entités hétérogènes du point de vue des radiométries (Girard 1989). C'est pourquoi les classifications automatiques, qui ont pour principe le regroupement des pixels les plus proches au sens de la luminance, ne sont pas adaptées à la mise en évidence des structures lorsque celles-ci ne sont pas caractérisées par des signatures spectrales spécifiques et homogènes. Un canal d'irrigation par exemple, est un objet, dont la réponse spectrale peut considérablement varier d'un point à un autre de son tracé, selon qu'il est ou non bordé d'arbres, selon qu'il est ou non en eau, etc.

Les individus-pixels constitutifs d'un même objet, peuvent ainsi se trouver par l'analyse typologique, regroupés dans des classes différentes. L'objet n'est plus alors identifiable comme entité. Son intégrité peut cependant être reconstituée dès lors que l'on ne considère plus uniquement sa signature spectrale, c'est-à-dire ses propriétés physiques, mais aussi *sa forme* et ses dimensions, c'est-à-dire ses caractères géométriques (Merghoub, 1985).

L'oeil reconnaît assez facilement les structures sur une image parce qu'il les interprète en même temps qu'il les perçoit et tend à en reconstituer ainsi automatiquement la continuité, l'organisation. En matière de traitement numérique d'image en revanche, il sera beaucoup plus facile de déterminer la valeur des luminances en chaque point que de retrouver des éléments structuraux dont le contenu est, de ce point de vue, disparate. Les méthodes mises en oeuvre sont donc, une fois encore, spécifiques et passent par la modélisation de l'approche visuelle.

L'analyse est d'abord qualitative, dans la mesure où l'étude porte sur les "propriétés extrinsèques" des textures, c'est-à-dire sur "la position relative, la distance et le contraste entre les éléments texturaux" ou pixels (*op. cit.*, p.98).

Il s'agit de rehausser les contrastes, que l'on peut définir comme "le rapport de la différence (ou distance) de luminance entre deux éléments texturaux à l'éloignement géographique de ces deux mêmes éléments texturaux" (*ibid.*), de façon à ce que les traits soient mieux perceptibles dans les secteurs où leur continuité est rompue sur les images brutes. Le rehaussement des contrastes s'accompagne de l'élimination du bruit. L'image est *filtrée*, afin que les éléments qui ne constituent pas une information sur les linéaments disparaissent. Dans ces deux cas, il s'agit d'obtenir une image simplifiée des objets.

La description quantitative des structures est celle de leurs "propriétés intrinsèques", largeur, élongation, rayon de courbure, surface, connexité, etc., et correspond à la mise en oeuvre d'un ensemble de processus manuels ou automatiques permettant d'associer à une structure ou à une forme une, ou des, grandeurs numériques.

4.3.1. La hiérarchisation des contrastes

Dans un premier temps nous avons recherché une variable dérivée des données brutes qui maximise les différences entre les caractéristiques spectrales des surfaces, c'est-à-dire une image très contrastée.

Les images des axes factoriels issus d'une analyse en composante principale (appelée en télédétection "transformation de Karhunen Loeve") sur les canaux originaux des deux scènes Spot étudiées, répondent parfaitement à cette exigence. En effet, ces nouvelles variables, décorréelées, qui sont des combinaisons linéaires des variables originales, maximisent la variance résiduelle.

Les facteurs sont tels qu'ils expliquent la totalité de la variance des individus. Du premier au troisième, la part de variance prise en compte diminue. Les contrastes de l'image sont ainsi en quelque sorte décomposés et hiérarchisés. Si l'image de la première composante principale est ici, du point de vue des contrastes, une bonne synthèse des informations livrées par les canaux originaux, elle n'apporte pas davantage sur les linéaments étudiés. L'image de la deuxième composante oppose nettement le réseau linéaire, routes et canaux d'irrigation, au reste de l'image, mais les linéaments recherchés sont complètement gommés.

Ils sont en revanche révélés par l'image du troisième axe factoriel qui explique une part de variance encore forte (Tabl. 15). Et il est déjà possible sur cette image de reconstituer un réseau hiérarchisé, dont certains éléments n'étaient même pas soupçonnés sur les canaux originaux (Fig.).

Tabl. 15 : Variance expliquée par les axes factoriels

Axe	V	%	% cumulé
1	82,387	58,667	58,667
2	30,064	21,409	80,076
3	27,980	19,927	100,000

Nous avons cherché à quantifier le gain d'information obtenu en mesurant et en comparant la longueur des linéaments recherchés sur une composition colorée photographique au 1:50 000^e et sur une restitution à la même échelle de l'image de la troisième composante principale.

Sur la composition colorée prise comme image de référence, 25 km de linéaments de ce type sont repérables à l'ouest de Hisar (image 203-292) et 10 km à l'est (image 204-292) On en distingue respectivement 45 et 50 km sur l'image du troisième axe factoriel. Cette évaluation est bien sûr approximative et subjective, sa valeur est relative.

4.3.2. L'analyse morphologique

4.3.2.1. L'élimination du bruit de fond

Le premier objectif étant atteint, il s'agit d'éliminer le *bruit*, de manière à ne mettre en évidence *que* les informations nécessaires à l'analyse. On utilise à cette fin des filtres linéaires et en particulier des produits de convolution. Les techniques employées jusqu'ici, classifications automatiques ou analyse en composantes principales, se référaient à une information locale, la valeur du pixel dans les différentes bandes spectrales (Fig. 37). Les méthodes qui conduisent à l'analyse des formes utilisent, quant à elles, l'information du pixel et celle de son voisinage, ou bien celle d'un ensemble de pixels dont les contours sont significatifs (Fig. 38).

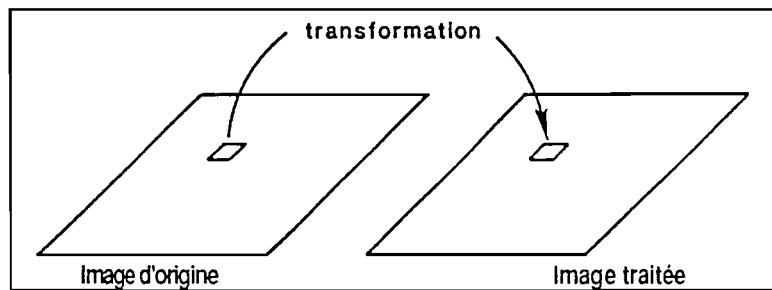


Fig. 37 : Transformation locale

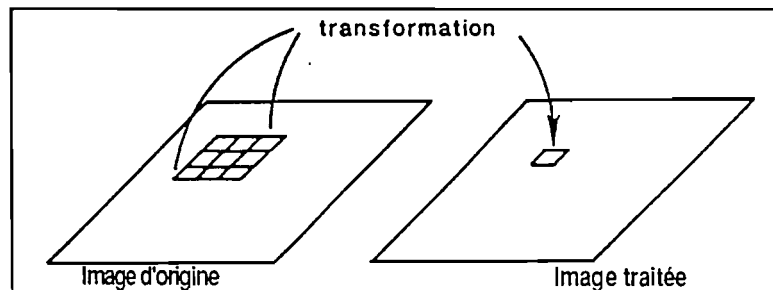


Fig. 38 : Transformation de voisinage

Le voisinage d'un pixel est limité à un carré ou à un hexagone de taille variable que l'on appelle fenêtre. Après une transformation de voisinage, un point aura une valeur qui dépendra de sa valeur initiale ainsi que de celle de ses voisins (Fig. 39).

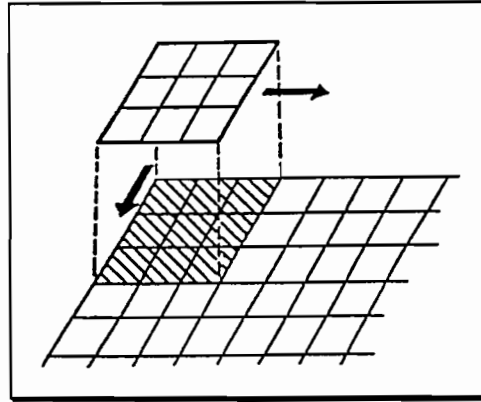


Fig. 39 : Projection d'une fenêtre 3x3 sur une image (Schowengerdt, 1983)

En trame carrée, un point a pour voisins, outre lui même, les quatre ou les huit points les plus proches de la trame. En trame hexagonale, chaque point a sept voisins, lui même compris (chaque point est voisin de lui même) :

Trame carrée		Trame hexagonale
5 voisins	9 voisins	7 voisins
<pre> </pre>	<pre> </pre>	<pre> </pre>

Théoriquement, nous utilisons les deux fonctions des filtres linéaires, l'élimination du bruit et le rehaussement des contrastes. Cependant, appliqués aux images de la troisième composante principale, ce sont les filtres passe-haut, de rehaussement qui ont donné les meilleurs résultats (Fig. chap. IV) et en particulier le Laplacien :

$$\begin{array}{ccc}
 -1 & -1 & -1 \\
 -1 & -12 & -1 \\
 -1 & -1 & -1
 \end{array}$$

En effet, les filtres passe-bas qui tendent à lisser l'image, éliminent en même temps que le bruit une partie, la plus ténue, de l'information, celle que précisément nous voudrions révéler.

Les filtres linéaires ne répondent qu'en partie à notre objectif. Ils rehaussent, mais ne permettent pas d'éliminer totalement le bruit. C'est pourquoi nous avons utilisé un autre ensemble de méthodes pour modéliser, par l'analyse numérique de l'image, l'extraction des structures mises en évidence par l'analyse visuelle. Cette opération est indispensable par ailleurs, si l'on envisage ultérieurement de décrire les formes de façon quantitative.

4.3.2.2. Extraction des linéaments

Nous avons exploité les outils et les concepts de la morphologie mathématique¹ (Serra, 1985) qui offre un ensemble d'opérateurs susceptibles de modéliser la description des formes.

Les moyens de l'analyse morphologique sont des opérations ou des groupes d'opérations ensemblistes qui peuvent être organisées en séquences. Il faut donc rechercher les enchaînements significatifs de transformations d'image qui correspondent à notre objectif et aux formes que l'on veut analyser.

L'idée de base de la morphologie mathématique est de simplifier les objets pour mieux les voir ou les voir selon un point de vue particulier, adapté au problème traité. Il faut donc disposer d'opérateurs capables de transformer les objets pour en donner une version simplifiée, de façon à ce que certaines structures soient mises en évidence et d'autres gommées. Les transformations morphologiques sont ainsi basées sur une perte d'information, d'une certaine partie de l'information assimilée à du bruit, et que l'on choisit de considérer comme inintéressante.

Les transformations morphologiques binaires et en teintes de gris permettent de rendre compte de la forme des objets par référence à un modèle géométrique simple, de forme parfaitement définie, appelé "élément structurant", qui peut être, par exemple, un segment ou un hexagone.

Il s'agit d'adapter l'ensemble de ces outils à la recherche des linéaments et de produire des séquences de transformation des images en fonction de l'objectif thématique défini. Les séquences mises au point ont été testées sur des parties de l'image de 256 x 300 pixels², choisies pour leur richesse en linéaments artificiels (routes, chemins, canaux d'irrigation) et naturels (traces supposées de paléoécoulements) (Fig. 48).

Les apports des transformations sont, comme précédemment, quantifiés par la comparaison de la densité des linéaments sur l'image de base, sur lesquelles sont effectuées les opérations morphologiques (la troisième composante principale), et sur les images résultats. La validation des résultats en termes d'interprétation est effectuée sur le terrain selon les mêmes méthodes que celles utilisées pour l'analyse typologique. Rappelons qu'il n'existe pas d'autre représentation des linéaments analysés que les images ; les données

¹Le logiciel utilisé est MORPHOLOG (Ecoles des Mines de Paris).

²La trame originale (carrée) a été convertie en une trame hexagonale afin de pouvoir utiliser un élément structurant symétrique tel que l'hexagone. Chaque point est à une distance identique de tous ses voisins ; la vitesse des traitements est supérieure dans le cas du réseau hexagonal (sept voisins au lieu de neuf).

extrinsèques, hors terrain n'interviennent qu'au stade de l'explication de ces formes et non à celui de leur description.

• Les transformations morphologiques de base

Nous présentons rapidement et de façon très schématique les effets des transformations de base que nous avons utilisées ; on trouvera dans les ouvrages concernant l'analyse d'image l'exposé de leurs propriétés mathématiques (Serra, 1985 ; Coster et Chermant, 1985).

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

Soient un ensemble X , x un point de X et B un élément structurant d'origine x qui sera noté B_x . On appelle érodé de X par B l'ensemble des x tels que le translaté B soit inclus dans X ; la transformation est notée par le symbole $\ominus$:

$$X \ominus B = \{ x : B_x \subset X \}$$

L'érosion binaire entraîne la réduction de la surface des ensembles ; elle en lisse également les contours (Fig. 40).

La dilatation (notée $\oplus$) est l'opération duale de l'érosion :

$$X \oplus B = \{ x : B_x \cap X \neq \emptyset \}$$

Son effet est d'augmenter la surface des ensembles, de connecter les parties disjointes et de lisser les contours (Fig. 41).



Fig. 40 : Erosion binaire

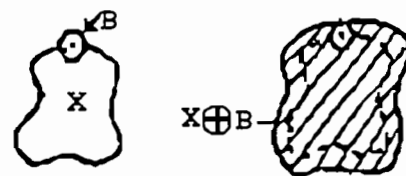


Fig. 41 : Dilatation binaire

L'utilisation des transformations morphologiques binaires suppose que les objets aient été extraits, c'est-à-dire qu'il y ait eu un seuillage préalable de l'image. En général cependant, il est difficile de binariser une image brute, même lorsque les contrastes ont été rehaussés. Les images sont donc en premier lieu filtrées à l'aide de **filtres morphologiques** qui sont la transposition aux images en niveaux de gris, des transformations morphologiques sur images binaires.

La fonction en teintes de gris (FTG) peut être assimilée à un relief, chaque pixel étant caractérisé non par une altitude, mais par une teinte de gris, d'où les termes "pics" et

"vallées" fréquemment utilisés pour qualifier respectivement les valeurs hautes et les valeurs basses de la fonction.

L'érosion d'une fonction f par l'élément structurant B est la fonction $f \ominus B$, dont la valeur au point x est la plus petite valeur atteinte par f à l'intérieur de l'élément structurant B centré sur le point $(x; f(x))$: la valeur de chaque pixel est donc remplacée par la plus faible valeur de son voisinage. L'érosion élargit les vallées et abaisse les pics (les zones de valeurs minimales s'étendent et les zones de valeurs maximales diminuent) (Fig. 42).

La dilatation d'une fonction f par un 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 $(x; f(x))$. Autrement dit, la valeur de chaque pixel est remplacée par la plus forte valeur du voisinage ; rappelons qu'en trame hexagonale un pixel a sept voisins, lui-même compris. La dilatation de la fonction en teintes de gris a ainsi pour effet d'élargir les pics et de combler les vallées (les zones de valeurs maximales s'étendent et les zones de valeurs minimales diminuent) (Fig. 43).

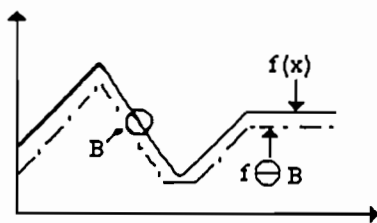


Fig. 42 : Erosion de la FTG

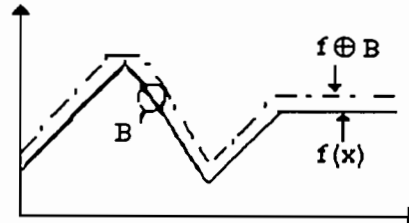


Fig. 43 : Dilatation de la FTG

La fermeture d'une fonction image f par un élément structurant B est la combinaison de ces deux transformations élémentaires : l'image dilatée est ensuite érodée. C'est la fonction f^B telle que :

$$f^B(x) = ((f \oplus B) \ominus B)(x)$$

Sans effet sur les pics, la fermeture comble les vallées entraînant ainsi la disparition des petites zones sombres, celles dont la taille est inférieure à celle de l'élément structurant (Fig. 44).

Le chapeau-haut-de-forme est un filtre morphologique, utilisé ici pour extraire les vallées de la fonction par soustraction de l'image originale à l'image fermée (Fig. 45).

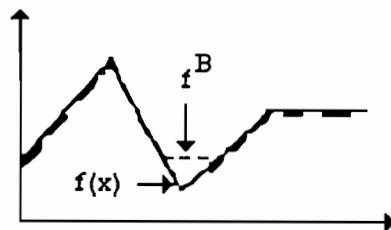


Fig. 44 : Fermeture de la FTG

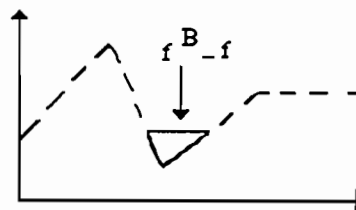


Fig. 45 : Chapeau-haut-de-forme

- Le renforcement des structures linéaires

Les transformations morphologiques sont appliquées à l'image de la première ou de la troisième composante principale, filtrées. Le choix d'une image de base est déterminant quant à la qualité des résultats. En particulier, les transformations opérant sur les valeurs extrêmes de la fonction en teintes de gris, les objets traités doivent être sur cette image très contrastés et individualisés au maximum par rapport à leur environnement (Fig. 49).

Les linéaments étudiés sont caractérisés par les valeurs basses de la fonction en teintes de gris. Nous avons donc effectué une série de fermetures par un segment de droite perpendiculaire à l'axe des gris, un segment dont l'orientation varie, puisque nous n'avons pas d'a priori sur l'orientation des linéaments que nous voulons mettre en évidence.

1° Nous avons pratiqué six fermetures avec un segment de taille 2¹ dans les trois directions dites de la trame (0°, 60°, 120°) et dans les trois directions dites conjuguées (30°, 90°, 150°). Ces fermetures successives ont pour effet d'éliminer les ensembles de forme linéaire ou sub-linéaire et de teinte sombre, quelle que soit leur orientation.

2° Ces ensembles sont ensuite filtrés par soustraction de l'image de base aux six images fermées (*chapeau-haut-de-forme*). Selon l'orientation de l'élément structurant, seuls certains linéaments ou certaines parties de linéaments sont restitués (Fig. 50 et 51). Les plus épais sont ainsi mis en évidence, mais le filtrage n'a pas permis d'éliminer les ensembles non linéaires.

3° On opère la réunion des six directions.

• Séquence d'extraction des linéaments

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

• *Seuillage* :

Les images transformées par le filtre *chapeau-haut-de-forme* sont d'abord binarisées.

Le seuillage qui conduit à ne conserver qu'une partie de l'image est une étape essentielle de l'analyse. D'elle dépend en effet la qualité du résultat final. Le choix devait par ailleurs être fait de la façon la plus objective possible.

Ainsi, nous avons recherché le seuil qui délimite le plus grand nombre de linéaments proportionnellement à la surface totale de l'image binaire correspondante (Mering, Debaine, 1988). Pour chaque seuil possible, c'est-à-dire pour tous les niveaux de gris g , nous avons évalué le ratio R_L entre le nombre de configurations linéaires sur l'image et la surface totale :

¹ La taille de l'élément structurant correspond à la taille de la fenêtre -une transformation de taille 2 est équivalente à deux transformations de taille 1.

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

N_L : nombre de configurations linéaires pour le seuil g

$A(g)$: surface de l'ensemble obtenu par le seuil g

L'idée est de sélectionner le seuil qui maximise ce ratio. Les configurations linéaires sont estimées par des configurations numériques particulières à l'intérieur de l'hexagone pour chacune des douze directions. Nous assimilons, par exemple, une configuration linéaire horizontale (0°) aux configurations numériques suivantes :

$$\begin{array}{ccc} 0 & 0 & \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \end{array} \quad \begin{array}{ccc} 0 & 0 & \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & \end{array}$$

La figure 46 montre la variation du ratio sur une image en teintes de gris, le *chapeau-haut-de-forme* (90°). On voit qu'il y a un très petit nombre de seuils possibles, quatre dans ce cas.

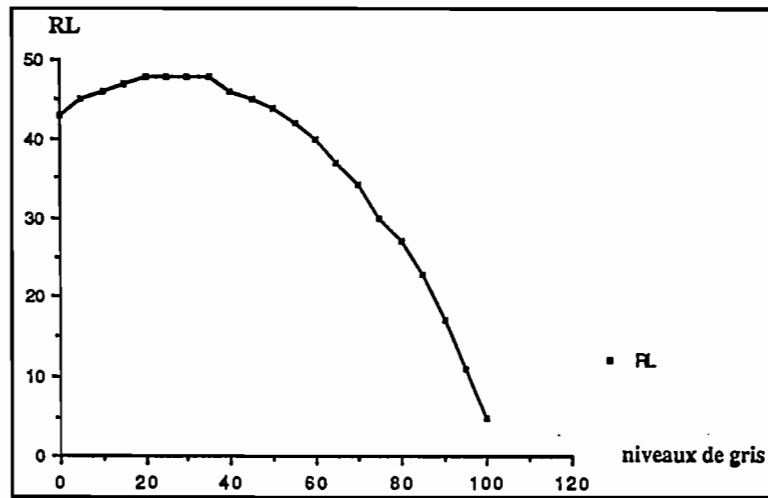


Fig. 46 : Variation du ratio R_L

• **Extraction:**

L'extraction des linéaments sur les images binaires s'effectue en plusieurs étapes. Il s'agit d'appliquer aux images l'algorithme suivant :

$$\begin{aligned} X_1 &= X_0 \ominus B \\ X_2 &= (X_1 \oplus B) \cap X_0 \\ X_n &= (X_{n-1} \oplus B) \cap X_0 \end{aligned}$$

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

La première transformation X_1 , une érosion, permet d'éliminer les ensembles isolés dont la taille est inférieure à celle de l'élément structurant, ici, un hexagone de taille 2 (Fig. 52).

Les composantes connexes qui n'ont pas été éliminées par l'érosion sont reconstruites par des dilations successives qui ont pour effet d'augmenter la surface des ensembles et de

connecter les parties disjointes. Les linéaments ne sont pas dilatés au-delà de leur taille initiale puisque l'on effectue l'intersection de l'ensemble dilaté ($X_1 \oplus B$) et de l'ensemble initial (X_0).

L'opération est itérée n fois jusqu'à ce que l'image ne soit plus modifiée.

Cette méthode permet de ne reconstruire que les composantes connexes de taille supérieure à celle de l'élément structurant. L'algorithme est appliqué aux six images transformées par le filtre *chapeau-haut-de-forme*, ce qui permet d'extraire les linéaments dans chacune des six directions.

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

• *Seuillage des particules par le diamètre géodésique*

L'image finale restitue l'ensemble des linéaments, mais contient encore, en petit nombre, des particules (ou ensembles de pixels connexes) isolées. La dernière étape de la procédure consiste donc à éliminer par seuillage celles qui ont les plus petits diamètres géodésiques.

Soit deux points x_1, x_2 d'un ensemble X , une ligne géodésique x_1, x_2 correspond au plus petit parcours entre x_1 et x_2 , complètement inclus dans X .

Le diamètre géodésique (ou longueur) correspond à la valeur maximale des distances géodésiques entre deux points quelconques de X (Fig. 47).

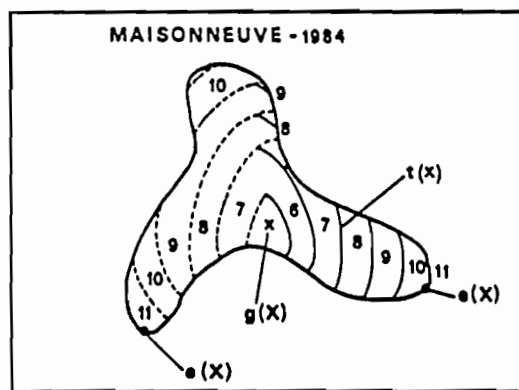


Fig. 47 : Longueur géodésique d'un objet ($Lg(x)$) ; centre géodésique ($g(x)$) ; extrémités géodésiques ($e(x)$) (Coster *et al.*, 1985)

Sur l'image ne demeurent que les ensembles ayant une longueur suffisante, et qui peuvent être assimilés aux linéaments recherchés (Fig. 53).

4.3.2.3. Contraintes et limites de ces procédures

Le principal obstacle à l'utilisation des procédures d'analyse d'images qui viennent d'être présentées et qui sont, compte tenu des outils dont nous disposons, celles qui sont apparues

les plus adaptées à la mise en évidence des linéaments recherchés, reste l'impossibilité, dans certains cas, de trouver un seuil adéquat lors de l'étape de binarisation. En effet si les images retenues comme bases des transformations morphologiques, la première ou la troisième composante principale rehaussées, sont les plus contrastées et celles sur lesquelles les linéaments sont les mieux perceptibles, nous ne sommes pas parvenue à les y individualiser par rapport à d'autres ensembles caractérisés par des valeurs identiques. Il est impossible de les déconnecter des ensembles auxquels ils se trouvent amalgamés sans les faire eux-mêmes disparaître. Ainsi, la perte d'information inhérente aux traitements effectués n'est pas toujours bien maîtrisée dans certains secteurs de l'image. Pour cette raison, le réseau mis en évidence sur l'image de la troisième composante principale n'a pu être analysé dans son ensemble.

Comme nous n'avions pu l'extraire dans sa totalité, nous n'avons pas envisagé une analyse quantitative automatique de certains paramètres relatifs à sa forme, sa longueur, sa largeur, ou sa compacité par exemple, car il aurait été vain de la mener sur les quelques quadrats où les résultats s'avéraient satisfaisants.

Nous avons donc eu recours à des procédés classiques pour la description qualitative et quantitative et pour l'analyse du réseau de linéaments mis en évidence sur les images filtrées de la troisième composante principale.

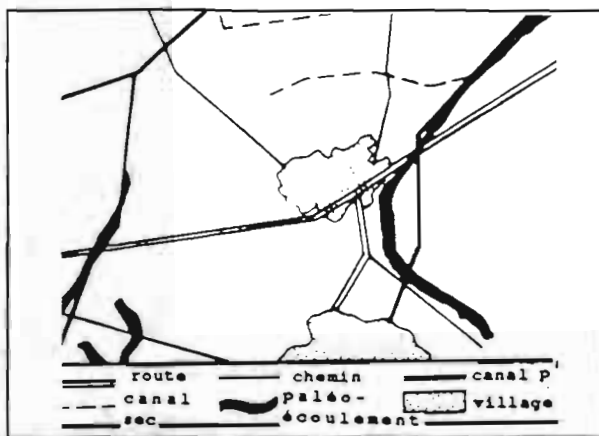


Fig. 48 : Différents types de linéaments

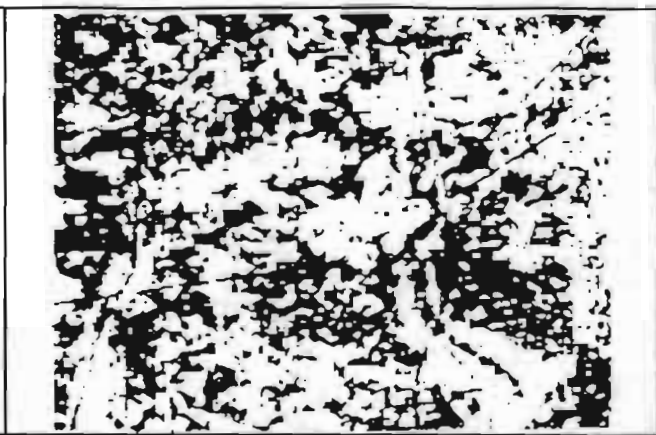


Fig. 49 Première composante principale

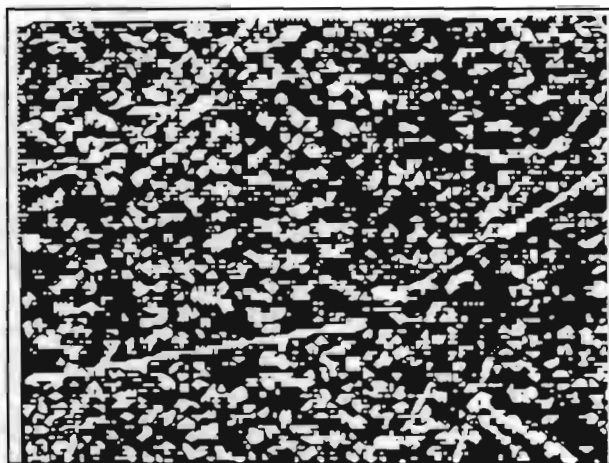


Fig. 50 : Chapeau-haut-de-forme (90°) sur Fig. 49

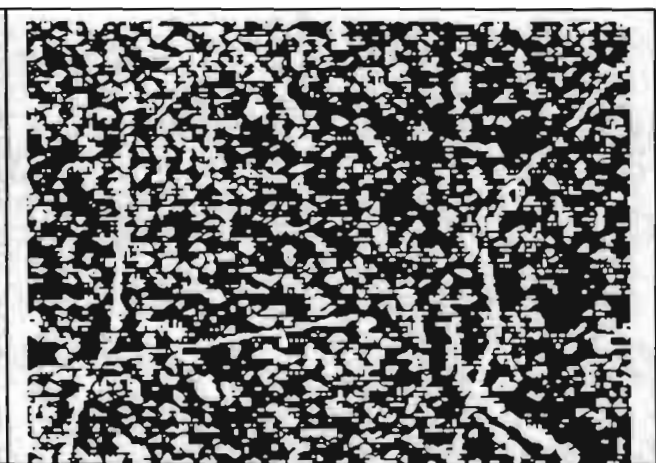


Fig. 51 : Chapeau-haut-de-forme(30°) sur Fig.49

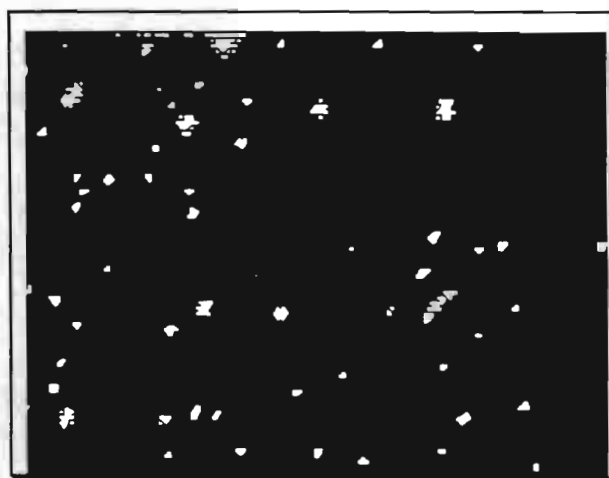
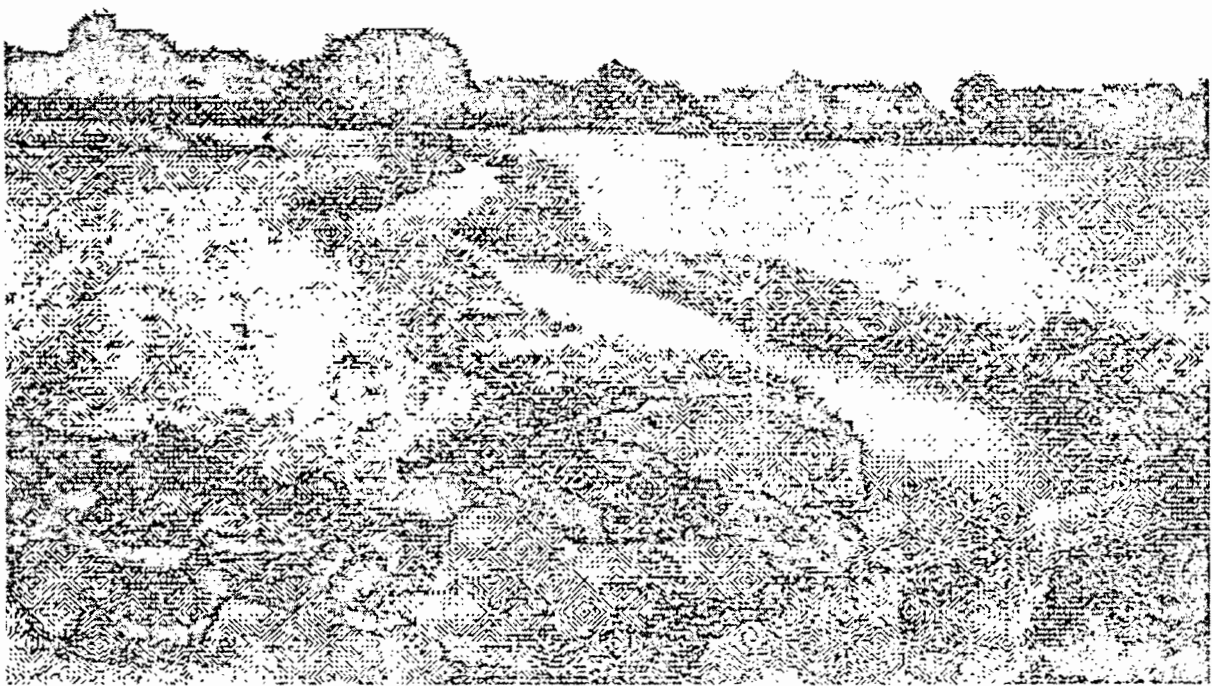


Fig. 52 : Erosion sur Chapeau-haut-de-forme (150°)



Fig. 53 : Reconstruction



Chapitre III

DES UNITES RADIOMETRIQUES AUX PALEOENVIRONNEMENTS

L'objectif de ce chapitre est d'interpréter les classes et les ensembles morphologiques extraits de l'image entière, obtenus en suivant la démarche et en appliquant les différentes méthodes exposées au chapitre II. Les vestiges archéologiques seront ensuite situés par rapport à ces unités spectrales et morphologiques, ce qui sera l'objet du chapitre IV.

Les sous-ensembles issus de l'analyse typologique pratiquée sur la totalité des trois scènes qui couvrent les espaces étudiés (Landsat TM pour le secteur pakistanais de la Hakra et Spot XS pour celui de la Chautang en Inde) constituent des unités radiométriques homogènes par rapport aux critères retenus. A chaque outil de visualisation d'un phénomène, qu'il s'agisse du satellite ou de l'oeil, est attachée (associée) une certaine résolution ou capacité de distinguer deux phénomènes ou objets différents. Le pixel est un élément de résolution qui correspond à l'intégration de plusieurs états, phénomènes, objets se trouvant à la surface terrestre et que notre oeil, au sol, parvient à distinguer. Considérant que des faits généraux peuvent être distingués au sein de la multitude des cas individuels, nous avons décidé de réduire encore ce pouvoir de résolution en regroupant les pixels qui étaient les plus proches au sens du critère retenu (chap. II) au sein de classes. Mais ces unités, qui sont une représentation possible de la réalité, doivent être décrites (étude des données-images, intrinsèques) et interprétées ou traduites (à l'aide de données intrinsèques et extrinsèques). Autrement dit, on doit leur associer des objets, des phénomènes ou des états de ces phénomènes connus par ailleurs, et on doit comprendre quel est le facteur qui les réunit au sein de la classe, c'est-à-dire ce qui rend semblables pour un niveau de détail donné des objets, des surfaces qui ne le sont pas à une autre échelle d'observation. C'est ensuite seulement que l'on pourra juger si ces représentations de la réalité sont adéquates, si en l'occurrence elles peuvent fournir des éléments de compréhension dans la recherche des influences prépondérantes du milieu qui ont pu jouer à différentes époques sur la localisation des établissements humains. En particulier, l'interprétation devra conduire à la formulation d'hypothèses concernant :

- l'écoulement fluvial et sa possible concomitance avec l'implantation et le maintien des installations humaines dans les deux secteurs d'étude,
- l'éventualité de changements climatiques importants aux époques récentes,
- l'existence possible dès la protohistoire d'un réseau d'irrigation.

1. A L'OUEST : LA PLAINE ALLUVIALE DE LA HAKRA ENTRE FORT ABBAS ET KHANPUR

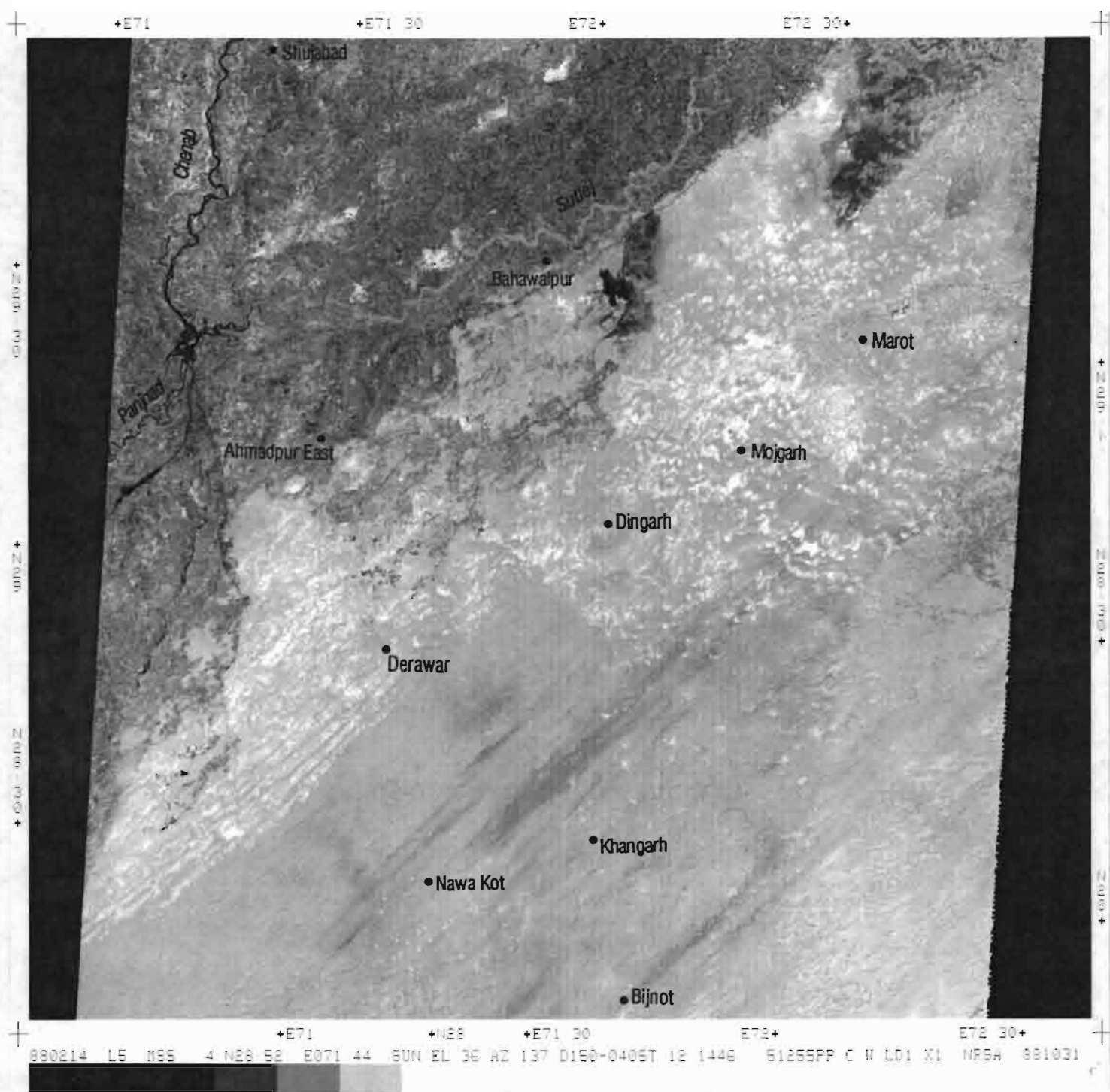
A partir des caractéristiques spectrales de chacun des quarts de scène qui composent l'image TM (Tabl. 16), un échantillon de 5000 individus représentatif (Tabl. 17) de l'image entière a été construit selon la procédure exposée au chapitre II.4.2.1.

Tabl. 16 : Caractéristiques spectrales de l'image TM 150-040 du 14 février 1988

QUART DE SCENE	CANAL	MOYENNE	ECART-TYPE	MINIMA	MAXIMA
NW (1)	TM1	82,2	11,8	62	162
	TM2	39,2	8,5	24	88
	TM3	44,2	13,7	21	107
	TM4	55,2	9,4	13	93
	TM5	74,0	22,5	6	157
	TM7	40,7	18,0	3	101
NE (2)	TM1	95,1	15,8	58	150
	TM2	51,7	12,2	22	85
	TM3	64,9	19,1	20	112
	TM4	63,5	10,6	11	96
	TM5	105,7	27,5	8	158
	TM7	66,2	22,3	4	103
SW (3)	TM1	99,3	13,9	65	135
	TM2	53,9	10,4	26	77
	TM3	69,0	17,0	23	107
	TM4	65,8	7,8	23	96
	TM5	109,4	24,8	14	158
	TM7	69,3	20,5	8	106
SE (4)	TM1	100,1	6,9	70	151
	TM2	57,1	4,6	30	86
	TM3	74,6	6,8	32	115
	TM4	65,6	5,0	43	98
	TM5	119,5	9,3	41	161
	TM7	77,6	7,6	16	100

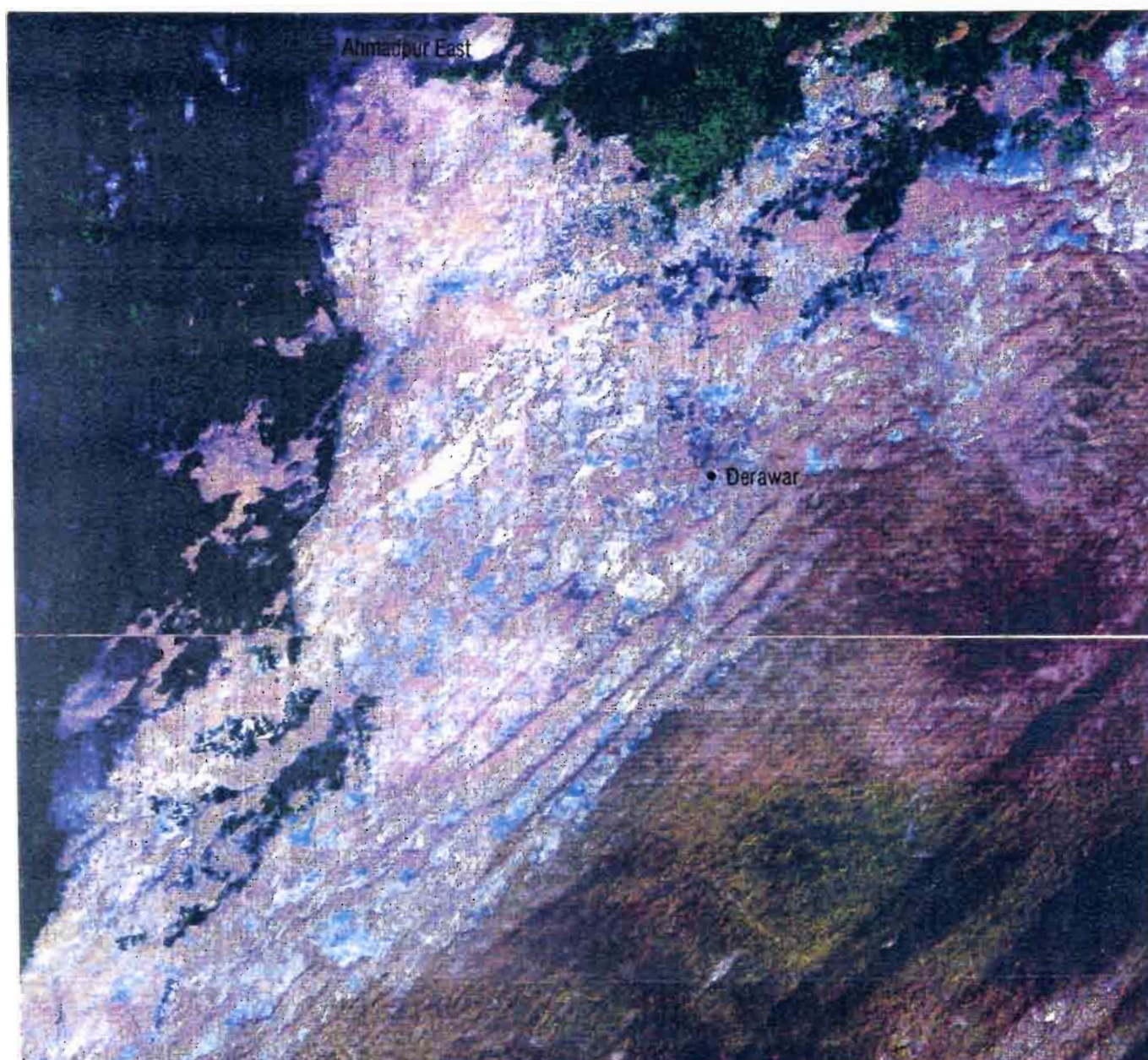
Tabl. 17 : Caractéristiques de l'échantillon extrait de l'image TM 150-040 du 14 février 1988

CANAL	MOYENNE	ECART-TYPE	MINIMA	MAXIMA
TM1	93,1	15,3	61	166
TM2	49,2	12,1	23	92
TM3	61,1	19,6	22	117
TM4	62,1	10,1	17	101
TM5	99,1	29,0	11	168
TM7	60,9	23,6	4	105



0 10 20 30 40 50 km
Echelle : 1 : 1 000 000

Fig. 54 : TM 150-040 du 14/02/92 - Image du canal TM4
A : Amadhpur East - B : Bahawalpur - De : Derawar - Di : Dingarh - M : Marot



0 5 10 km

Fig 55 : Image TM 150-040 du 14/02/1988 -
Composition colorée TM1 (en bleu) - TM4 (en vert) - TM7 (en rouge)
A : Amadhpur East - B : Bahawalpur - De : Derawar - Di : Dingarh - M : Marot

Quatre niveaux de détail rendent compte de façon optimale (par rapport aux critères retenus) de la structure des données soumises à l'analyse typologique. Chaque niveau est le résultat de la partition de la population totale de l'image (le niveau I) ou de la partition des classes obtenues à un niveau supérieur (cf. Chap. II.4.2). Le niveau II est ainsi composé de 2 classes, le niveau III de 4 classes, le niveau IV de 9 classes et le niveau V de 13 classes. La filiation des classes à travers les différents niveaux de détail est figurée dans le tableau 18.

Tabl. 18: Structure hiérarchique de l'image TM 150-040

NIVEAU I	NIVEAU II	NIVEAU III	NIVEAU IV	NIVEAU V
P	1	1.1	1.1.1	1.1.1.0
			1.1.2	1.1.2.0
		1.2	1.2.1	1.2.1.1
				1.2.1.2
			1.2.2	1.2.2.0
	2	2.1	2.1.1	2.1.1.1
				2.1.1.2
				2.1.1.3
			2.1.2	2.1.2.0
		2.2	2.2.1	2.2.1.1
				2.2.1.2
			2.2.2	2.2.2.0
			2.2.3	2.2.3.0

1.1. Niveau II : Agriculture et pastoralisme

Les bandes spectrales les plus discriminantes pour la division de la population de l'image en deux classes ont été, par ordre d'influence décroissante, TM7, TM3 et TM4. C'est donc dans le visible rouge et dans l'infra-rouge proche et moyen que des différences majeures entre les classes doivent être recherchées. La luminance moyenne des surfaces regroupées au sein de la classe 1, augmente du rouge TM3 (pic d'absorption de la végétation chlorophyllienne) au proche infra-rouge TM4 (pic de réflectance de la végétation chlorophyllienne) au contraire du comportement de la classe 2, et reste faible dans le canal TM7 (Fig. 56). Ces caractères peuvent être considérés comme significatifs d'une opposition entre des surfaces présentant un taux de couverture en végétation verte élevé, et des sols nus où d'où la végétation verte est absente. Ces faits sont étayés par les valeurs moyennes très faibles pour la classe 2, et plus hautes pour la classe 1 de l'indice de végétation, et par celles de l'indice de brillance, à l'inverse très élevé pour la classe 2 et bas pour la classe 1 (Fig. 59)(photo 7, 8).

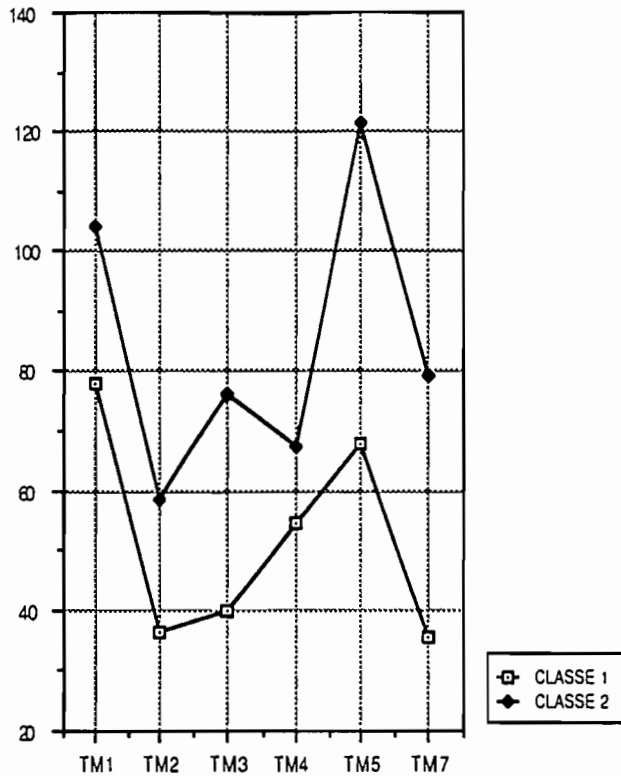


Fig. 56 : Niveau II : comportement moyen des classes dans les différentes bandes spectrales

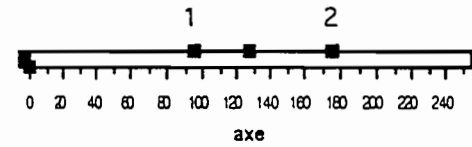


Fig. 57 : Niveau II : coordonnées des centres de gravité des classes sur l'axe discriminant

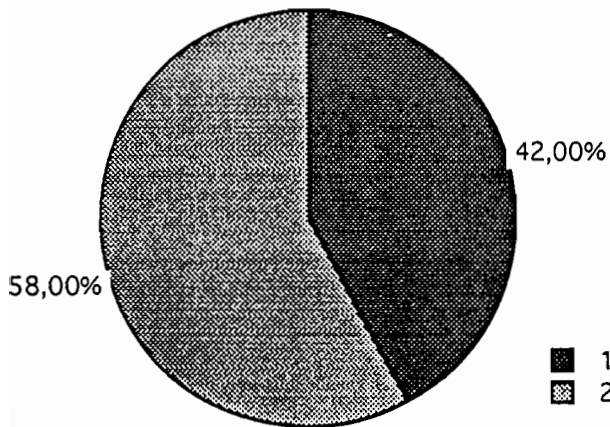


Fig. 58 : Surfaces couvertes par les classes du niveau II (rapport du nombre de pixels d'une classe sur le nombre total de pixels classés)

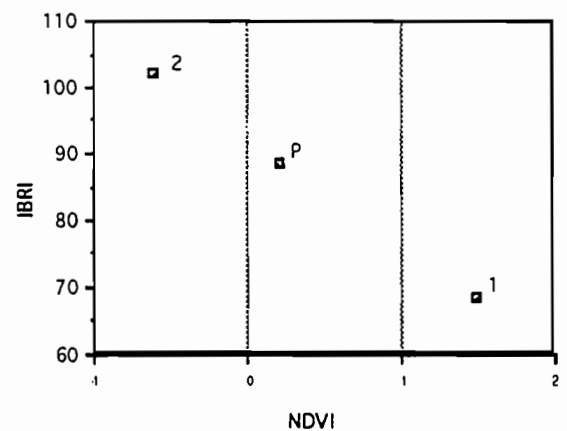


Fig. 59 : Niveau II : valeurs moyennes des indices de végétation (NDVI) et de brillance (IBRI) calculées pour chaque classe

Au niveau de détail le plus faible, premier niveau de l'exploration et de la compréhension de l'espace représenté par l'image, une limite résultant des différences de nature radiométrique entre les éléments qui le composent est tracée entre deux types d'occupation et de mise en valeur. L'agriculture est pratiquée toute l'année sur 42 % de la région couverte par l'image (Fig. 58) (classe 1), à l'ouest d'une diagonale reliant les coins nord-est et sud-ouest de l'image. A l'est (classe 2), les terres sont laissées à des pasteurs semi-nomades pour lesquels la principale source de revenu est l'élevage (Fig. 60).

1.1.1. Une zone irriguée

La limite entre les deux ensembles est actuellement déterminée par le tracé des canaux d'irrigation puisque seules sont cultivées les terres qui peuvent être reliées au réseau de canaux pérennes (classe 1) (Fig. 8) :

- Au nord, (Fig. 60) l'*Ahmadpur Branch* le long de la rivière, et la *Dera Nawab Branch* au sud, toutes deux branches terminales du *Bahawal Canal* prennent leur l'eau dans le Sutlej à Islam.
- A l'est, le *Hakra Right Distributary*, qui est une branche du *Eastern Sadiqia canal*, alimenté par le Sutlej à partir de Sulaimanke en amont d'Islam, irrigue une bande de terre d'environ 3 à 6 km de large jusqu'à une distance d'environ 12 km à l'ouest de Marot.
- Au sud-est, les espaces irrigués apparaissant sur l'image sont en territoire indien, et s'arrêtent très nettement à la frontière. Les canaux qui ne figurent sur aucune carte en notre possession sont, comme le montre l'image satellitaire Landsat RBV (Fig. 89), alimentés par les eaux du *Rajasthan Canal*.
- A l'ouest enfin, en aval de la confluence du Chenab et du Sutlej, c'est le Panjnad qui alimente en eau les canaux d'irrigation.

Sur les terres qui peuvent irriguées toute l'année, non seulement par les canaux, mais aussi par de nombreux puits, la double récolte est possible. Au mois de février, les champs sont couverts de blé, de colza et autres cultures *rabi* qui seront récoltées entre mars et mai (Tabl.8) (Photo, 7, 8, 9).

1.1.2. Un "désert"

Sur les atlas, et sur les cartes topographiques, la limite mise en évidence à ce niveau est aussi celle d'une trame en pointillés, représentation traditionnelle des espaces sableux et désertiques, qui s'étend à l'est et au sud, au delà de la frontière indo-pakistanaise et figure l'extrémité nord-occidentale du désert de Thar ou "Grand Désert Indien". Sur les atlas pakistanaïes la partie de cet espace "désertique" située dans la Province du Pendjab où elle couvre les deux-tiers de la Division de Bahawalpur, c'est-à-dire l'extrémité sud du district de Bahawalnagar, la presque totalité du district de Bahawalpur et de celui de Rahimyar Khan, entre les latitudes 27° 42' N et 29° N et les longitudes 69° 57' E et 72° 52' E, est appelée *Cholistan* (Fig. 1). Ce terme serait une déformation du mot turc *Chilistan* qui évoque de vastes étendues dépourvues d'eau. On trouve également dans les gazetteers l'appellation *Rohi* pour cet ensemble de 26000 km², qui s'étend sur environ 480 km de long et de 30 à 190 km de large.

Au Cholistan hors de portée du réseau d'irrigation actuel, la principale contrainte est le manque d'eau potable pour les hommes et pour les animaux. L'eau disponible, presque exclusivement fournie par les pluies, est collectée dans les *tobas* (mares) -il en existe environ 500 dans la région- durant la mousson, et préservée pendant environ 4 mois. Les rares puits (90) (Photo 10) prennent la relève des mares quand elles sont asséchées bien que l'eau qui en est extraite, à une profondeur qui varie de 11 à 40 m, soit saumâtre et en théorie impropre à la consommation. La hauteur d'eau dans les puits, 1,21 m à 5 m (PCRWR, 1986), est insuffisante pour répondre à des besoins croissants.

Le Cholistan est actuellement le domaine du pastoralisme et de l'élevage (deux millions de têtes) de bovins, de chèvres, de moutons, et de chameaux (Photo 11). Installés dans quelques villages durant la saison des pluies les pasteurs se déplacent durant la saison sèche en fonction des disponibilités en eau et de l'état du couvert végétal, d'abord vers les mares puis autour des puits, et enfin, notamment au mois de mai et de juin, les plus chauds, vers la zone irriguée où ils séjournent jusqu'à l'arrivée des pluies (PCRWR, 1986 ; Gazetteers Bahawalpur, 1908). Principaux fournisseurs de viande, de laine et de plantes médicinales de plusieurs villes du Pendjab et du Sind, ils échangent ces produits contre des produits finis ou du fourrage.

Mais l'élevage ne subit jusqu'à présent aucun contrôle et le nombre des animaux est beaucoup trop important compte tenu des potentialités offertes par le Cholistan, et surtout de la fragilité du milieu. Le surpâturage, en particulier aux abords des mares et dans un rayon de 5 à 15 km autour des puits, est considéré comme la première cause de dégradation des ressources naturelles. A cela s'ajoute l'arrachage de certaines plantes qui possèdent une valeur économique comme *Calligonum polygonoides* (*phog*), *Aerva javanica* (*bui*), ou *Haloxylon salicornium* (*lana*) utilisées comme combustible, *Cenchrus ciliaris* (*dhaman*), *Lasiurus hirsutus* (*gorkha*), *Eleusine compressa* (*chhimber*) particulièrement nutritives, *Calotropis gigantia* (*ak*) qui est une plante médicinale ou *Haloxylon recurvum* (*khar*) dont on fait du savon, etc. Conditions de la survie, les meilleures espèces du désert, soumises à diverses dégradations, tendent à disparaître. Des formations épineuses de moindre valeur se substituent à elles, substitution rendue possible notamment par dégradation intensive du sol sur de grandes surfaces (Legris, 1963 p. 259, PCRWR, 1986).

1.1.3. Une limite qui a varié dans le temps

Au niveau II de l'analyse, la partition de l'image en deux classes révèle une hétérogénéité dans l'ensemble de la région sur le plan de l'alimentation en eau : il y a des espaces irrigués (classe 1) et d'autres qui ne le sont pas (classe 2) (Photos 7, 8). Que la disponibilité en eau soit le premier facteur explicatif de l'organisation spatiale, de la répartition des activités



Fig. 60 : Niveau II : partition de l'image TM 150-040 en deux classes
A : Amadhpur East-B : Bahawalpur-De : Derawar-Di : Dingharh-M : Marot

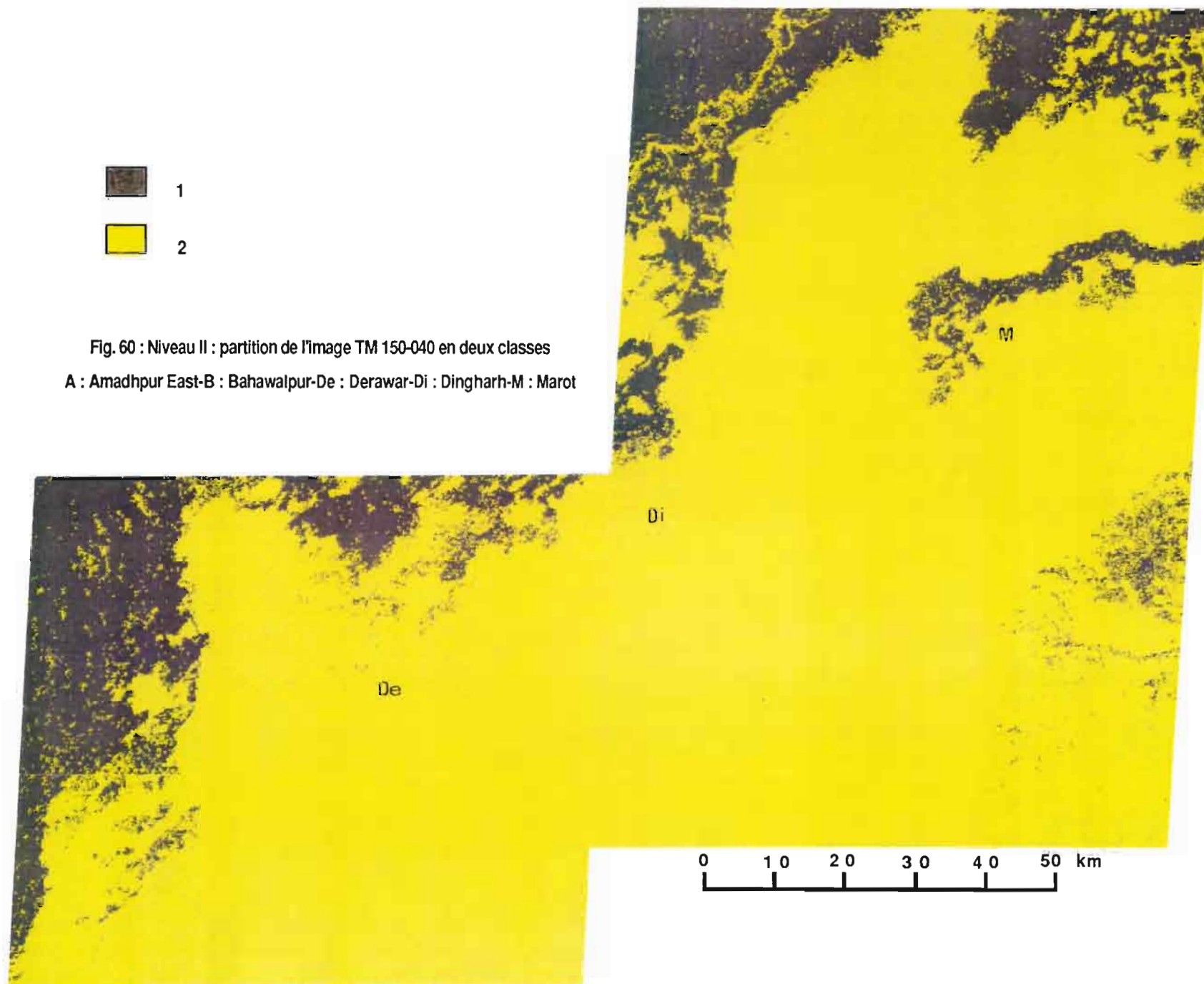




Photo 7 : Vue aérienne des limites du désert du Cholistan, et de la zone irriguée à partir du Sutlej (11/90)



Photo 8 : Les limites du désert du Cholistan et de la zone irriguée, aux environs de Bahawalpur (11/90)



Photo 9 : Hétérogénéité de la zone irriguée : champs cultivés, plantations d'arbres fruitiers, villages, canaux.

humaines, du type d'occupation, sédentaire, semi-nomade ou nomade, n'est pas le fait de l'époque actuelle. Comme on peut le lire dans les gazetteers (*Bahawalpur*, 1908) par exemple, au début du siècle, on divisait la région selon le même critère en trois zones homogènes : le *Sindh* c'est-à-dire les terres riveraines du Sutlej inondées pendant les crues, les *Nahri Lands* ou *Nahri Cholistani*, zone intermédiaire irriguée à partir de canaux d'inondation, et le *Cholistan* où l'agriculture pluviale était encore pratiquée à cette époque dans les secteurs favorables. Par contre, le mode de mise en valeur des terres associé à chaque type d'apport en eau (rivière, pluies, canaux, puits) a, lui, évolué et par là même le tracé des limites entre les différents espaces. Aujourd'hui, la limite des terres cultivées coïncide avec celle des terres irriguées et peut changer d'une année à l'autre. Lors de la réalisation du *Sutlej Valley Project*, elles se sont étendues vers le sud puis, les canaux étant insuffisamment alimentés, ils furent abandonnés et bon nombre de secteurs mis en culture furent désertés. Les vestiges d'installations plus anciennes protohistoriques, en majorité, retrouvées dans le secteur actuellement non irrigué pourraient avoir été situés au coeur d'une ancienne zone cultivée. Si cette hypothèse était vérifiée, toute la question serait alors de savoir si la source d'approvisionnement en eau des terres était naturelle (pluies, rivière) ou artificielle (irrigation à partir du Sutlej ?). La réponse à ces questions passe par l'examen des mécanismes qui agissent à l'intérieur des deux ensembles, et en particulier de la zone désertique par ailleurs la plus propice à des observations.

1.2. Niveau III : entre rivière et désert

Chacun des deux domaines dont l'opposition a été mise en évidence au niveau II de l'analyse, se trouve au niveau III scindé en deux sous-ensembles (Fig. 66). Cette échelle d'observation plus grande révèle une hétérogénéité de nature différente qui tient à la densité du couvert végétal dans un cas, au type de matériau sédimentaire dans l'autre.

1.2.1. Hétérogénéité du domaine irrigué

C'est dans les domaines du visible rouge (TM3) et de l'infra-rouge moyen (TM5 et TM7) fortement corrélés avec la chlorophylle et la teneur en eau du feuillage, que les différences entre les deux sous-ensembles issus de la classe 1 sont les plus importantes, (Fig 61). 57 % des surfaces qui constituent le domaine irrigué (soit 24 % de la surface de l'image) (Fig. 64), affectées à la classe 1.2, dont la luminance moyenne, comme le montre la situation de son centre de gravité sur l'axe discriminant (Fig. 62), est plus faible que celle de la classe 1.1, pourraient donc être caractérisées par un couvert végétal dense et vert (valeur plus faible dans le rouge, indice de végétation verte très supérieur à celui de la classes 1.1 (Fig. 65)), une forte humidité des sols ou de la végétation.

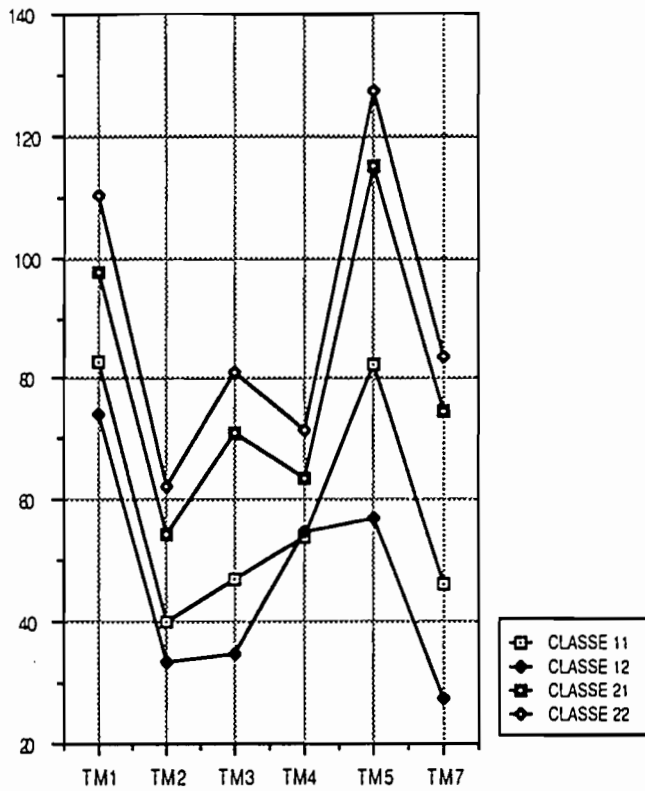


Fig. 61 : Niveau III : comportement moyen des classes dans les différentes bandes spectrales

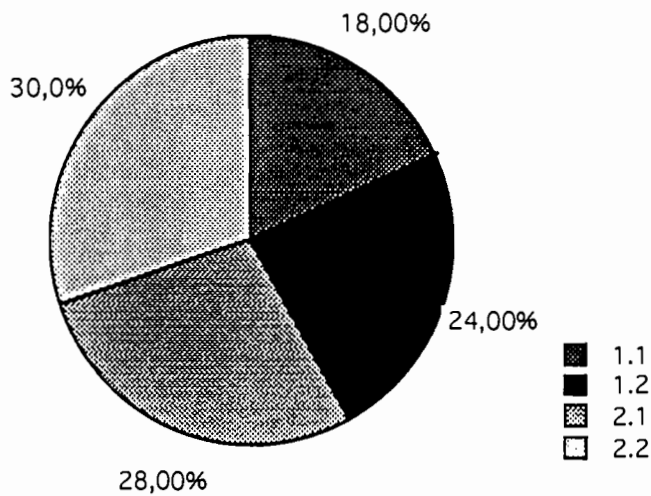


Fig. 64 : Surfaces couvertes par les classes du niveau III (rapport entre le nombre de pixels d'une classe et le nombre total de pixels classés)

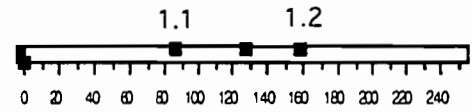


Fig. 62 : Niveau III : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 1 sur l'axe discriminant

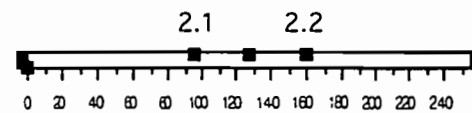


Fig. 63 : Niveau III : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 2 sur l'axe discriminant

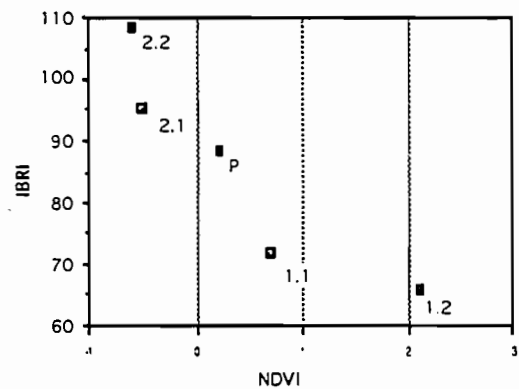
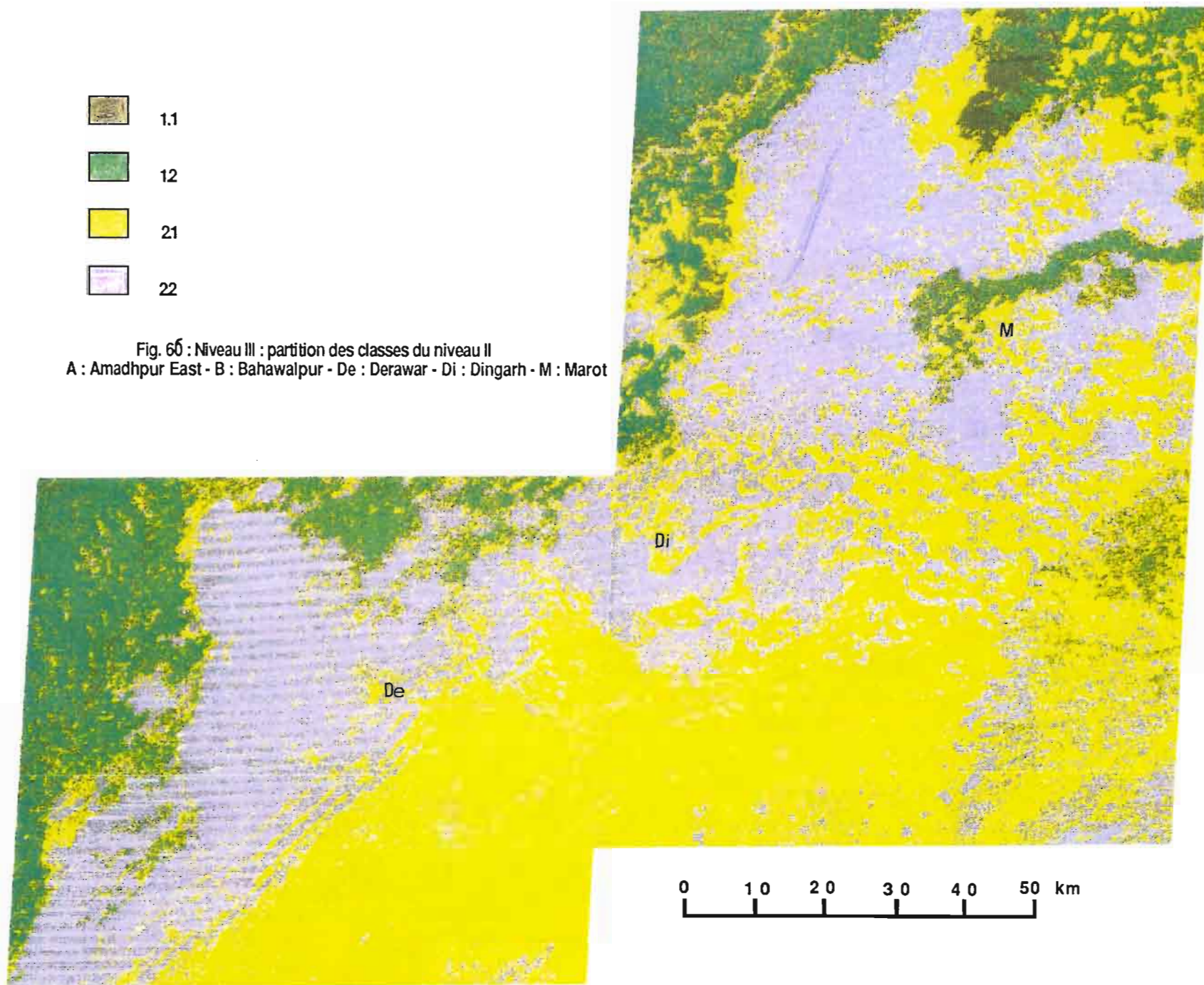


Fig. 65 : Niveau III : valeurs moyennes de l'indice de végétation verte (NDVI) et de l'indice de brillance (IBRI) calculées pour chaque classe



Fig. 60 : Niveau III : partition des classes du niveau II
 A : Amadhpur East - B : Bahawalpur - De : Derawar - Di : Dingarh - M : Marot



La classe 1.1 qui couvre 18 % de la surface de l'image (Fig. 64), regroupe des espaces non cultivés, champs labourés, alluvions inondables sur les bords des rivières recouvertes d'un tapis herbacé discontinu hors des périodes de crue, villes, villages, briqueteries. Cela est confirmé par des images à plus haute résolution spatiale (SPOT XS et P) et par les vues aériennes que nous possédons de ce secteur (Photo 9).

1.2.2. Hétérogénéité de la zone désertique

Le Cholistan, qualifié de désert, ne constitue pas non plus une étendue sableuse homogène comme tendraient à le faire croire les représentations cartographiques à petite et moyenne échelles. La classification trace au niveau III, entre deux zones dont la surface -28 et 29 % de la surface totale de l'image (Fig. 64)-, est presque identique, une limite qui peut être assimilée à celle séparant ce que l'on appelle localement, sur la base de critères physiographiques le *grand* (classe 2.1) et le *petit Cholistan* (classe 2.2) (PCRWR, 1986, p. 7).

Les deux sous-ensembles issus de la partition de la classe 2 ont un comportement spectral similaire (Fig. 61). La classe 2.2 est cependant caractérisée par des luminances moyennes plus élevées comme le montre la position de son centre de gravité sur l'axe discriminant (Fig. 63). Elle regroupe des surfaces en moyenne plus brillantes, c'est-à-dire plus claires que celle de la classe 2.1 (Fig. 65). C'est aussi celle qui, en moyenne, à l'indice de végétation le plus faible. L'opposition spectrale mise en évidence entre ces deux ensembles est l'expression de la nature différente des matériaux sédimentaires qui les composent. Situé au nord du grand Cholistan et au contact des espaces irrigués, le petit Cholistan est une vaste étendue alluviale composée de surfaces sablo-limoneuses à argileuses, extrêmement plane à faiblement ondulée, dont l'altitude -environ 107 m en moyenne- varie de 90 à 130 m. Il est limité au sud par les dunes de sable d'origine essentiellement éolienne du Grand Cholistan, nettement plus élevées que les accumulations sableuses que l'on rencontre dans la zone adjacente : l'altitude de ce secteur est de 150 m en moyenne, certaines dunes pouvant atteindre 170 m.

S'ils constituent deux ensembles distincts et spatialement compacts, orientés parallèlement à la zone irriguée, c'est-à-dire au Sutlej et au Panjnad, domaines alluvial et éolien interfèrent en de nombreux secteurs, notamment dans celui de Dingarh au centre de l'image. Des étendues sableuses pénètrent dans les zones argileuses ou limoneuses, et des chapelets de dépressions interdunaires dans le désert de sables (Fig. 66).

1.3. Niveau IV : la Hakra : un mythe ou une réalité ?

La recherche d'espaces aux caractéristiques radiométriques semblables au sein de ceux déjà individualisés aux deux niveaux précédents, aboutit à la division de l'image en 9 classes (Fig. 78).

1.3.1. La zone irriguée

La partition de la classe 1.1, qui rassemble des espaces non cultivés, est assez difficile à interpréter en l'absence de données de terrain suffisamment localisées sur l'image. Les deux sous-ensembles qui en résultent se différencient essentiellement par leur comportement dans le proche infra-rouge, en particulier dans le canal TM5, la luminance qui caractérise la classes 1.1.1 y étant plus forte que celle de la classe 1.1.2 (Fig. 67 et 68). Ceci pourrait être le signe d'une plus grande humidité des surfaces regroupées dans cette dernière classe, celle qui par ailleurs présente sur l'axe discriminant la plus faible valeur moyenne (Fig. 72). La classe 1.1.1 caractérise des surfaces moins sombres, moins humides, avec un couvert végétal moins dense, comme le fait apparaître une plus faible valeur de l'indice de végétation. Elles sont principalement situées dans les lits des rivières où elles correspondent aux bancs d'alluvions à nu pendant la saison sèche.

Le comportement spectral de la classe 1.2.2 est caractéristique de celui de la végétation verte : forte absorption dans le rouge (TM3) et forte luminance dans le proche infra-rouge (TM4) (Fig. 69), ce qui est exprimé par une très forte valeur moyenne de l'indice de végétation (Fig. 77). Cette unité, qui couvre 9 % (Fig. 76) de l'image, correspond aux surfaces cultivées en blé, orge, colza et autres cultures *rabi*. D'après leur répartition dans l'image, il est possible d'interpréter les espaces décrits par la classe 1.2.1, parmi les moins réfléchants, comme les plus humides : eau libre ou surfaces inondées.

C'est au niveau V, sur lequel nous ne reviendrons pas pour la zone irriguée, que la différence est faite entre surfaces inondées (classe 1.2.1.2) et eau libre (1.2.1.1) (Fig. 90, 91, 98).

1.3.2. Les dunes

Trait dominant du paysage du grand Cholistan, les dunes sont divisées au niveau IV de l'analyse en deux groupes. De luminance (Fig. 74) et de brillance (Fig. 77) moyennes beaucoup plus faibles que celles appartenant à la classes 2.1.1, et avec un indice de

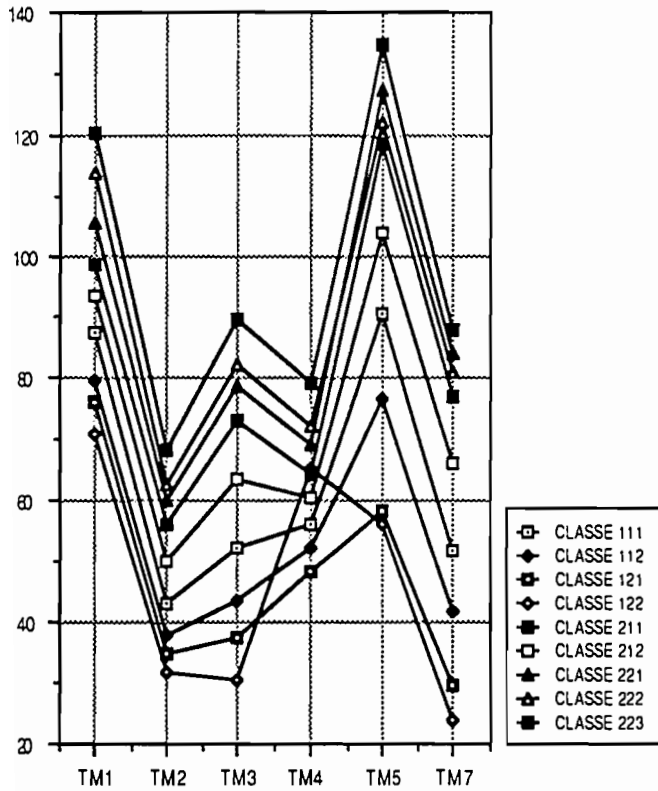


Fig. 67 : Niveau IV : comportement moyen des classes dans les différentes bandes spectrales

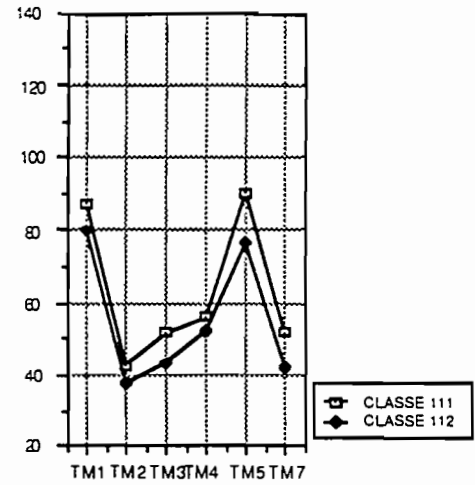


Fig. 68 : Niveau IV : comportement moyen des classes issues de la classe 1.1 dans les différentes bandes spectrales

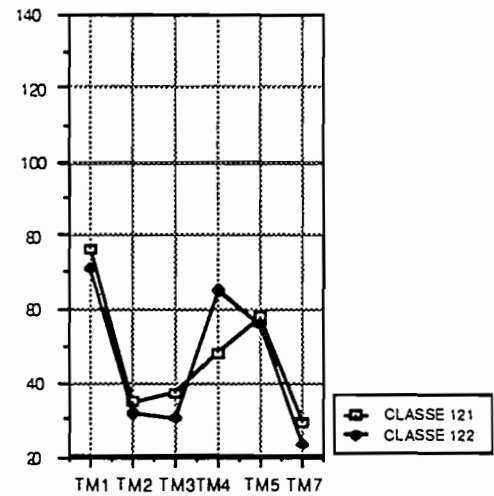


Fig. 69 : Niveau IV : comportement moyen des classes issues de la classe 1.2 dans les différentes bandes spectrales

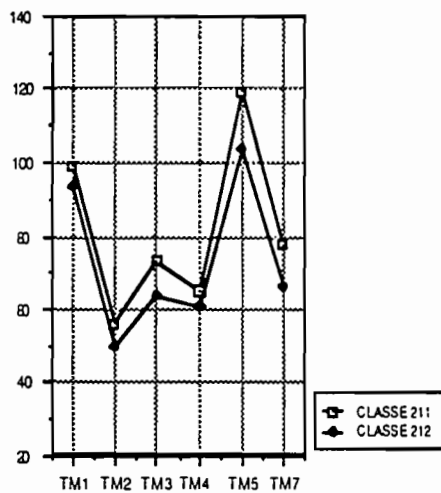


Fig. 70 : Niveau IV : comportement moyen des classes issues de la classe 2.1 dans les différentes bandes spectrales

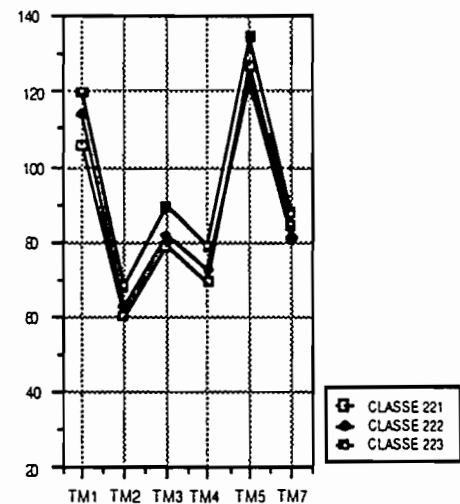


Fig. 71 : Niveau IV : comportement moyen des classes issues de la classe 2.2 dans les différentes bandes spectrales

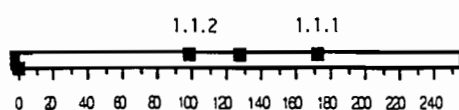


Fig. 72 : Niveau IV : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 1.1 sur l'axe discriminant

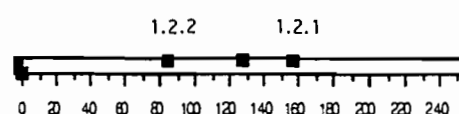


Fig. 73 : Niveau IV : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 1.2 sur l'axe discriminant

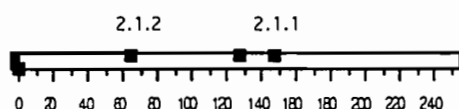


Fig. 74 : Niveau IV : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 2.1 sur l'axe discriminant

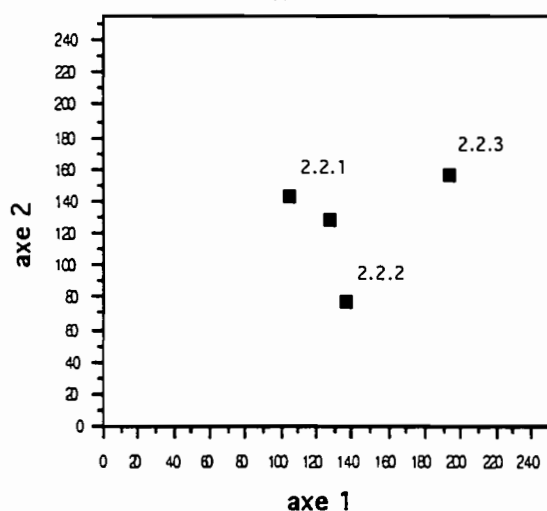


Fig. 75 : Niveau IV : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 2.2 sur l'axe discriminant

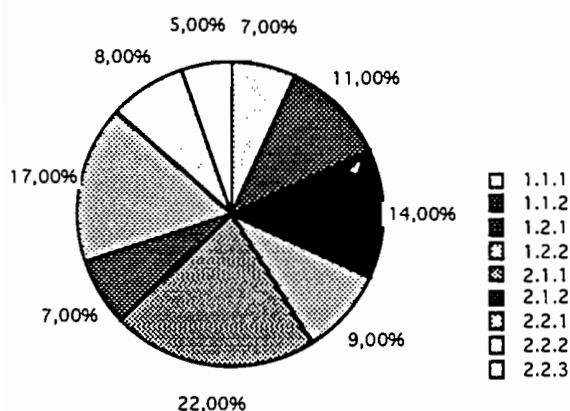


Fig. 76 : Surfaces couvertes par les classes du niveau IV (rapport entre le nombre de pixels d'une classe et le nombre total de pixels classés)

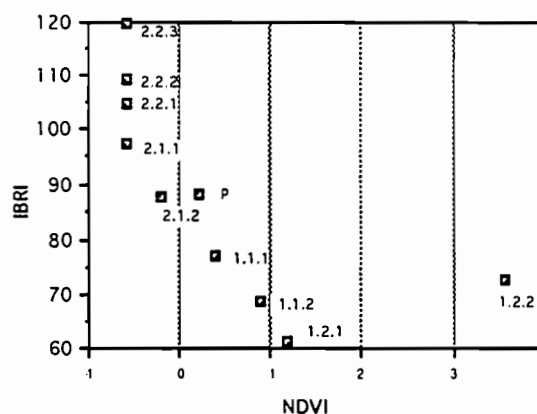
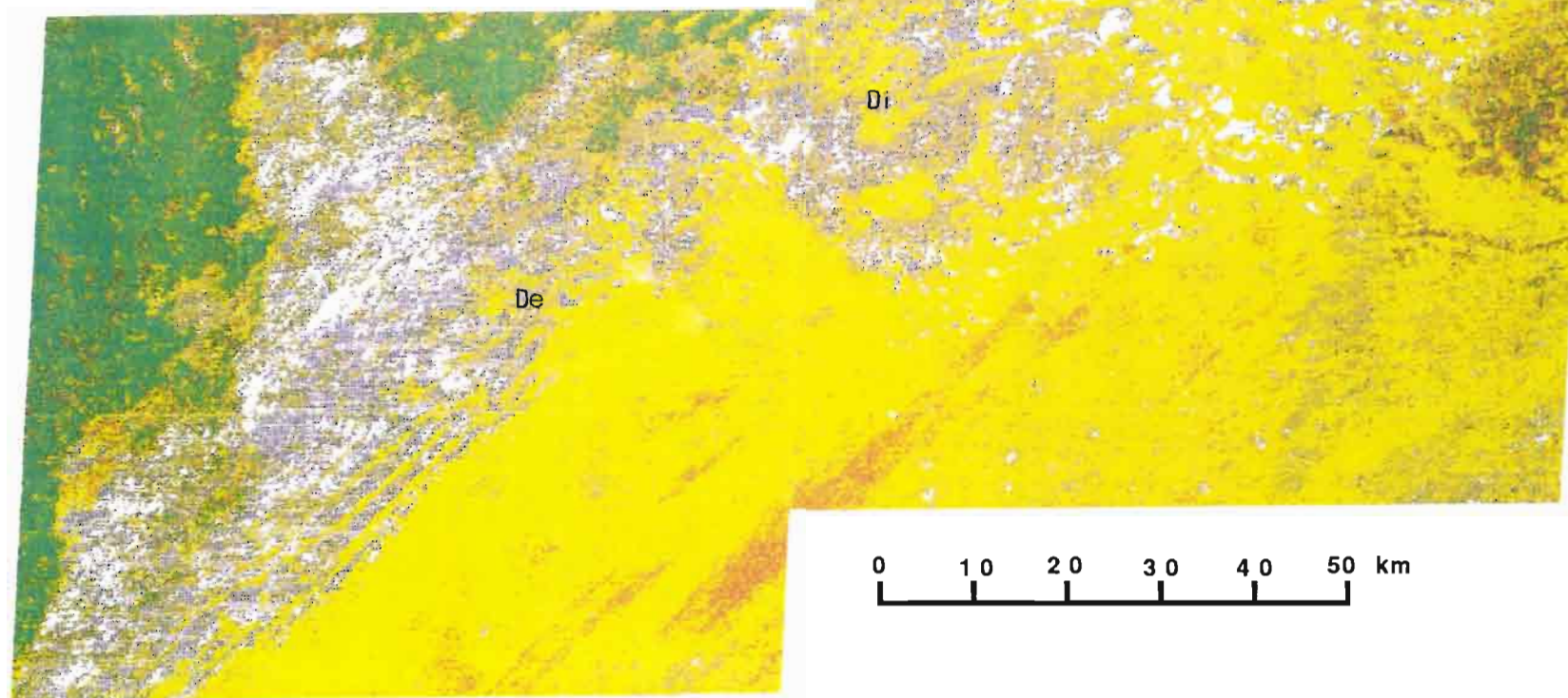


Fig. 77 : Valeurs moyennes de l'indice de végétation verte (NDVI) et de l'indice de brillance (IBRI) calculées pour chaque classe du niveau IV

végétation plus élevé (Fig. 77), les surfaces regroupées au sein de la classe 2.1.2. correspondent à des accumulations sableuses stabilisées par un couvert végétal plus fourni. Elles représentent 7 % de la surface totale de l'image, soit 24 % du domaine éolien sableux au sein duquel elle constitue dans sa majorité un ensemble compact, orienté nord-est/



Fig. 78 : Niveau IV: partition des classes du niveau III : 9 classes
 A : Amadhpur East - B : Bahawalpur - De : Derawar - Di : Dingarh - M : Marot



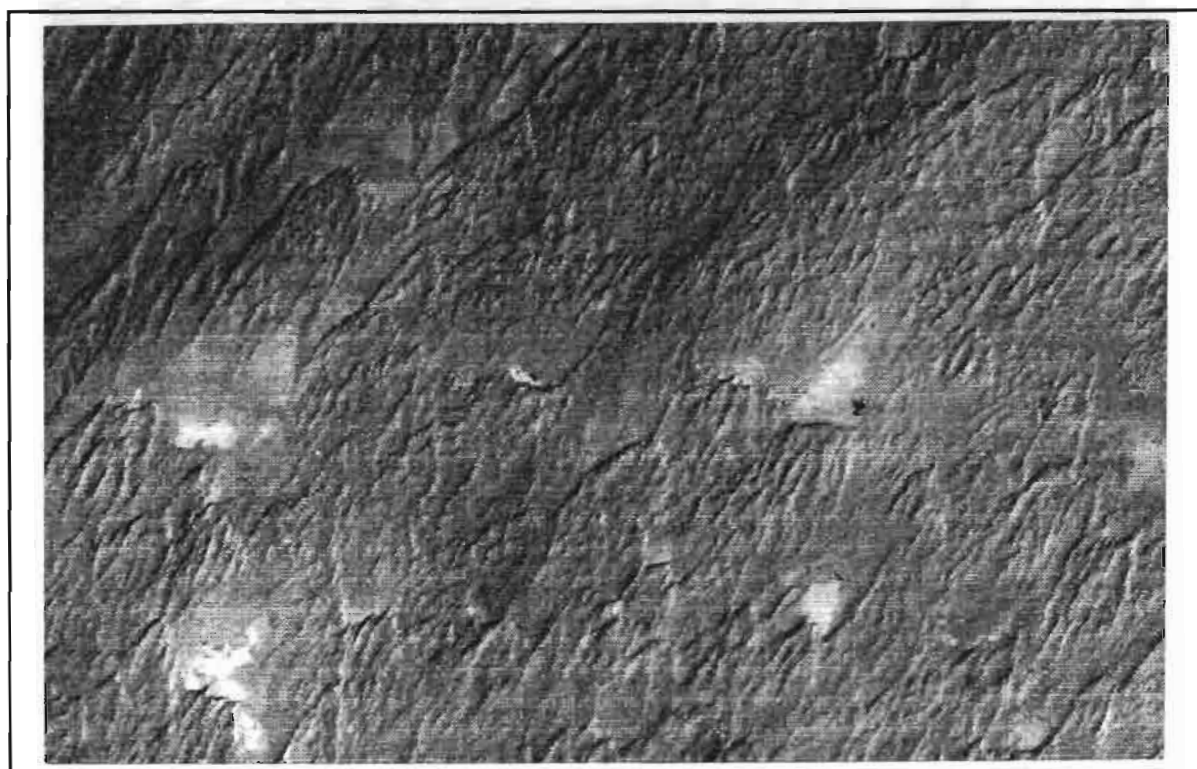


Fig. 80 : Dunes paraboliques mises en place par un vent de direction SW / NE. Les bras effilés vers l'amont du vent, plus sombres, sont stabilisés par la végétation (image du canal TM7, quart SE de l'image). 1cm = 1,1 km.

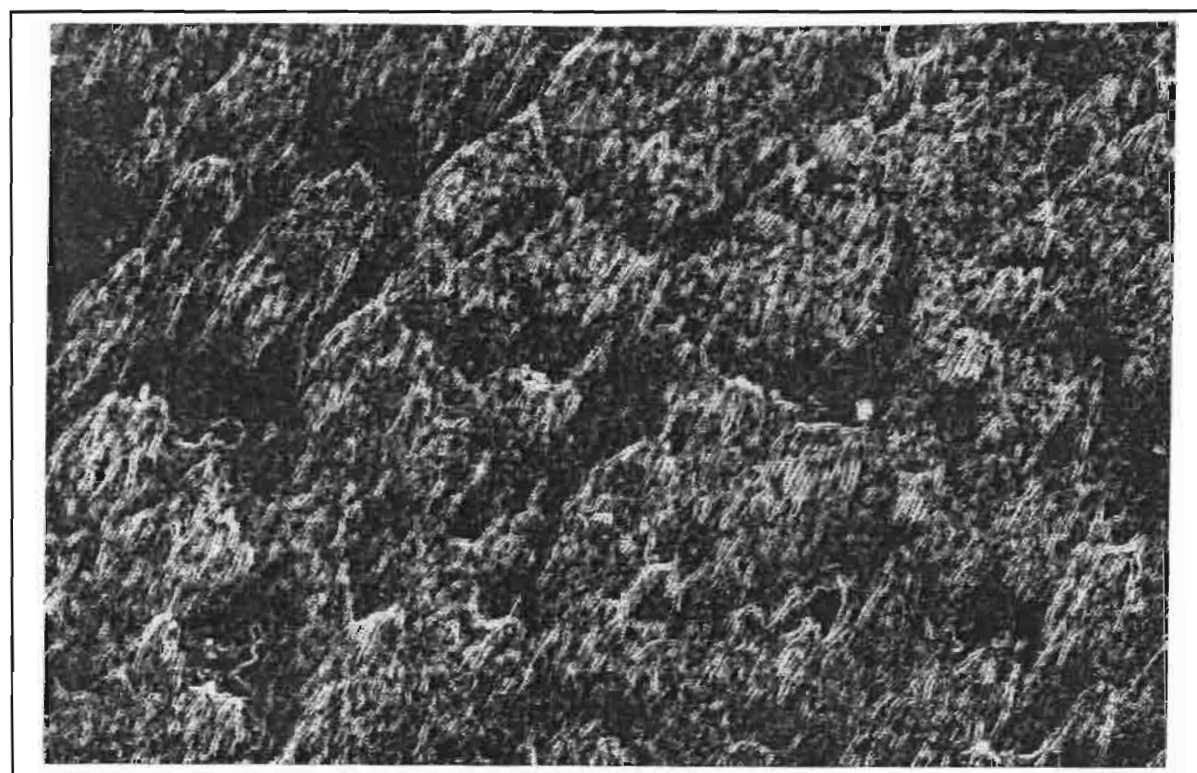


Fig. 81 : Dunes paraboliques . Image du canal TM 7 (Fig. 80) filtrée (filtre mettant en évidence les directions où le gradient est maximum), 1 cm = 1,1 km.

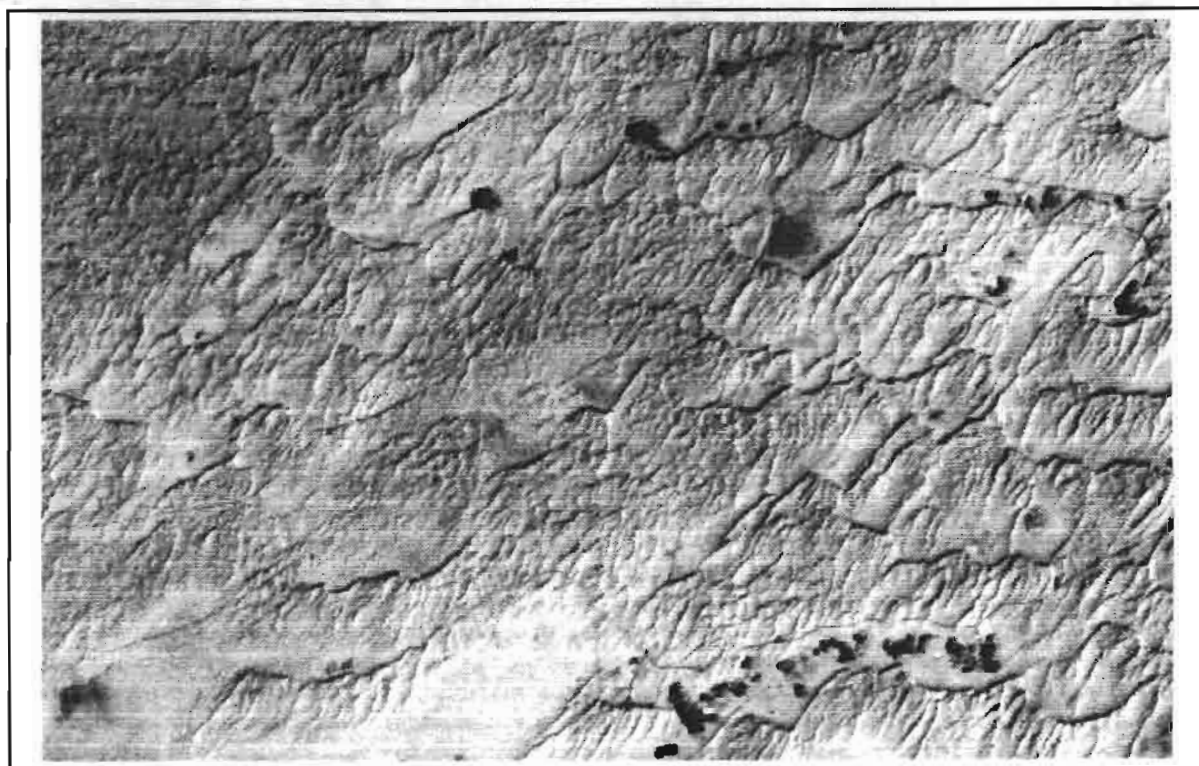


Fig. 82: Dunes paraboliques, formes en rateaux : les bras sont alignés SW/NE (direction des vents dominants de mousson) . Image du canal TM7 (quart sud-est de l'image) (1 cm = 1,1 km)

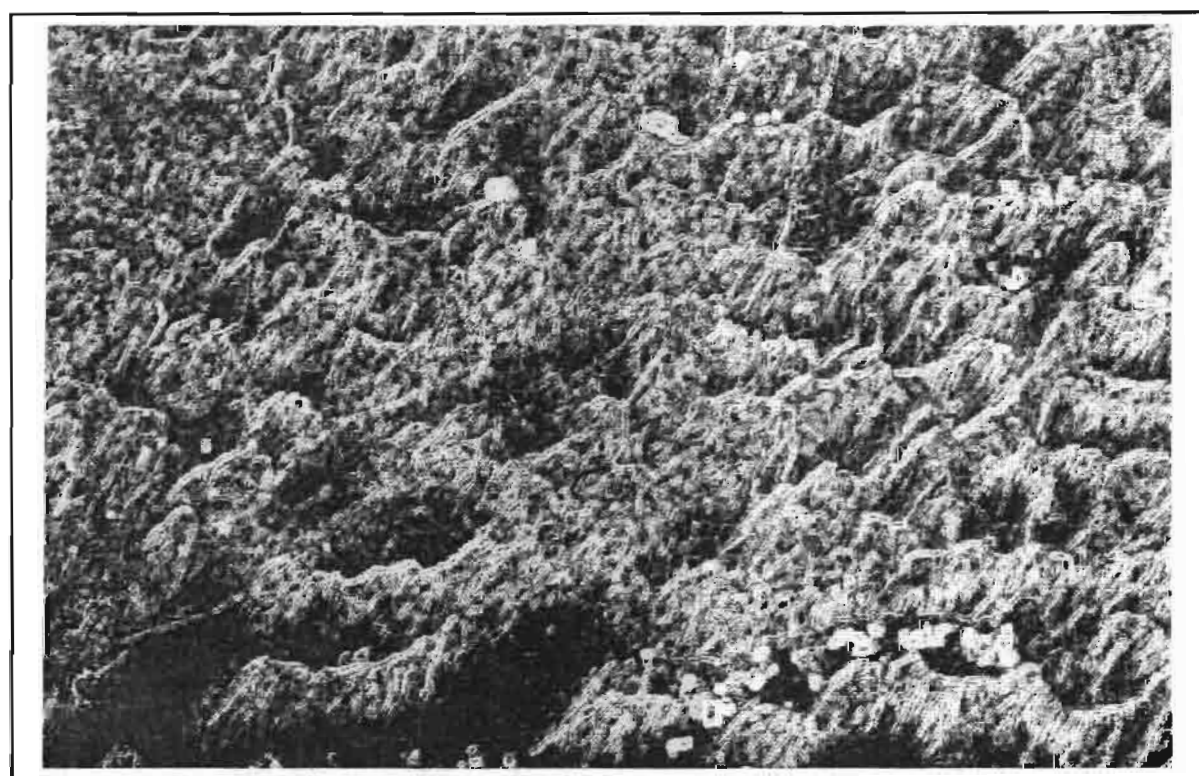


Fig. 83 : Dunes paraboliques, formes en rateaux. Fig. 82 filtrée. 1 cm = 1,1 km.

sud-ouest, c'est-à-dire dans la direction des vents dominants d'été (Fig. 79).

La végétation constitue un paysage de "pseudo-steppe" désertique -au sens de Legris- composé d'herbacées et de buissons appartenant au groupe des formations sèches épineuses (1963, p. 259) parmi lesquelles dominent *Calligonum polygonoides* (phog), *Haloxylon salicornicum* (lana), *Crotolaria burhia* (chag), *Aerva javanica* (bui), *Lasiurus hirsutus* (gorkha), *Dipterogium glaucum* (fehl), *Aristida depressa* (lamb), *Leptadenia sparticum* (khip), espèces que l'on retrouve en dehors des dunes si le sol est sableux. Les arbres sont le plus souvent absents du paysage. Acacia et Prosopis prennent des formes buissonnantes (Photo 10, 11, 12). La quantité d'eau disponible, elle-même en grande partie déterminée par la micro-topographie, conditionne la distribution des plantes et la composition des groupements. L'homme et le bétail sont également sur ce plan des facteurs déterminants.

La présence de végétation sur les dunes met en évidence sur les images la morphologie dunaire (Fig. 80 à 83). C'est aussi un indicateur des caractéristiques, mise en place et évolution, de ces ensembles géomorphologiques. Les formes les plus couramment rencontrées se rattachent au groupe des dunes paraboliques. Il s'agit de "formes de remaniement issues de la lutte entre le vent et les végétaux, elles naissent de l'allongement de bras freinés dans leur progression par la végétation, de chaque côté d'un couloir de déflation fermé par leur soudure (...)" à l'arrière (Coque, 1982, p. 311) (Fig. 79, 80, 81).

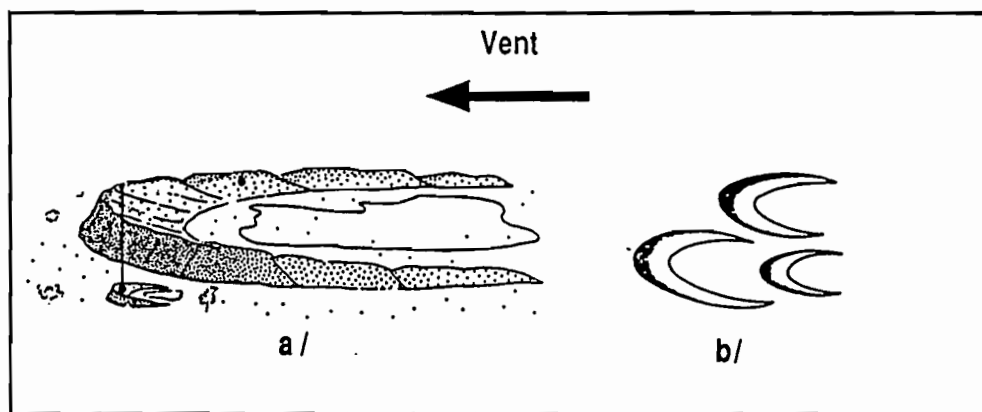


Fig. 79 : Les dunes paraboliques a: (Mainguet, 1984, p. 48) b : (Cooke *et al.* 1973, p. 288)

La concavité est tournée au vent, les bras allongés traînent à l'arrière, parce qu'ils ont été fixés par la végétation. Ce sont des accumulations anciennes, encore mobilisées par le vent mais ne se déplaçant plus. Egalement appelées dunes en U ou en épingle à cheveux (*U-shaped*, *blowout* ou *hairpin dunes*) ces formes transverses sont caractéristiques du désert indien. Ces constructions sont de plus en plus nombreuses vers l'est (quart sud-est de l'image) où, de formes isolées, elles donnent par coalescence latérale des dunes en rateau (Fig. 82, 83), stade intermédiaire de l'évolution des dunes paraboliques vers des formes longitudinales (Verstappen, 1968 ; Kar, 1987).

1.3.3. Surfaces salées

L'ensemble alluvial, plus réfléchant et avec un couvert végétal moins dense que le secteur des sables éoliens, ne constitue pas à une autre échelle d'observation, un ensemble homogène. Au niveau IV de l'analyse, il se scinde en effet en trois sous-ensembles (2.2.1, 2.2.2, 2.2.3). Ces deux dernières classes, qui couvrent respectivement 8 et 5 % de la surface totale de l'image (Fig. 76), sont celles qui présentent les luminances les plus fortes (Fig. 67 et 75). Sur une composition colorée utilisant les trois bandes spectrales du visible, TM1 (en bleu), TM2 (en vert) et TM3 (en rouge), elles apparaissent en blanc ce qui évoque une forte luminance dans ces trois canaux. Sur le terrain, leurs limites correspondent aux secteurs déprimés du paysage, même si les dénivellations sont à peine perceptibles, quelques décimètres tout au plus. En secteur dunaire, elles caractérisent des cuvettes et des couloirs interdunaires. Elles correspondent à ce que l'on appelle "*dahars*" sur les cartes topographiques, terme qui signifie "vallée". Nos informations de terrain et des analyses chimiques réalisées par le *Pakistan Desertification Monitoring Unit* (PCRWR, 1986), permettent d'associer ces fortes luminances à la présence d'évaporites, sels et carbonate de calcium, dans la composition sédimentaire de ces surfaces (Photo 13 à 15).

Le comportement spectral de l'unité 2.2.2 (Fig. 71) traduit la présence de gypse. Le gypse, ($\text{So}^4\text{Ca } 2\text{H}_2\text{O}$) qui est un sulfate hydraté, peut en effet être mis en évidence sans ambiguïté, sa luminance, à la différence de celle des surfaces calcaires ou salines-alcalines étant moyenne à forte dans le visible et faible dans le canal 7 (Escadafal et Pouget, 1989). La présence de gypse en plus ou moins forte concentration dans les surfaces décrites par la classe 2.2.2 est aussi mise en évidence sur la composition colorée associant TM1 (en bleu), TM3 (en vert) et TM7 (en rouge) elle apparaît en cyan (Fig. 55).

Les classes 2.2.2 et 2.2.3 correspondent à des dépôts argileux de texture fine formant des surfaces parfaitement planes et dures, comme le montre la trace de chenaux dans les dépressions ou la forme même, anguleuse, de ces dépressions (Photo 13,14). 17 % (soit 441900 ha) des sols du Cholistan présentent des concentrations excessives de sels (PCRWR, 1986). Ce sont des conditions salines - sodiques qui sont les plus représentées. Les sols salins-sodiques sont caractérisés par un excès du sodium échangeable et par un total excessif de sels solubles. Du fait de leur compacité qui détermine une très forte imperméabilité et une difficile pénétration des racines, et du fait de la présence de sels en excès, les sols, peu profonds à moyennement profonds, sont généralement dépourvus de tout couvert végétal, en particulier le fond des dépressions où les teneurs en sels sont les plus fortes. Autour de ces formations, on trouve quelques halophytes tels que *Haloxylon recurvum* (*khar*), *Salsola foetida* (*kali lani*), *Tamarix aphylla*, *Calotropis gigantia* (*ak*). Imperméables à la saison humide, ils se craquent en prismes durcis à la saison sèche (Photo 15).



Photo 10 : Paysages du Cholistan autour de Fort Dingarh : une pseudo-steppe désertique. A droite : un puits (2-1990)



Photo 11 : Les étendues sableuses faiblement ondulées du Cholistan sont le lieu des activités pastorales (2-1990)

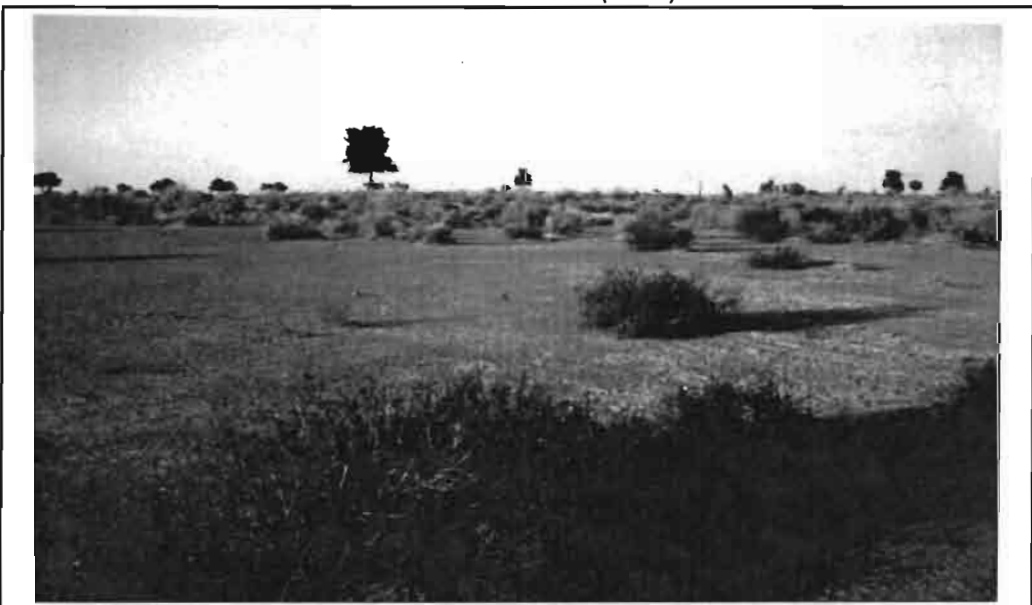


Photo 12 : Surfaces planes et sableuses aux limites des formations alluviales, végétation herbacée et buissonnante (2-1992)



Photo 13 : Le petit Chollistan. Forte réflectance des surfaces salées (2-1990)



Photo 14 : Les "dahars" constituent de très légères dépressions parfaitement planes (2-1990)

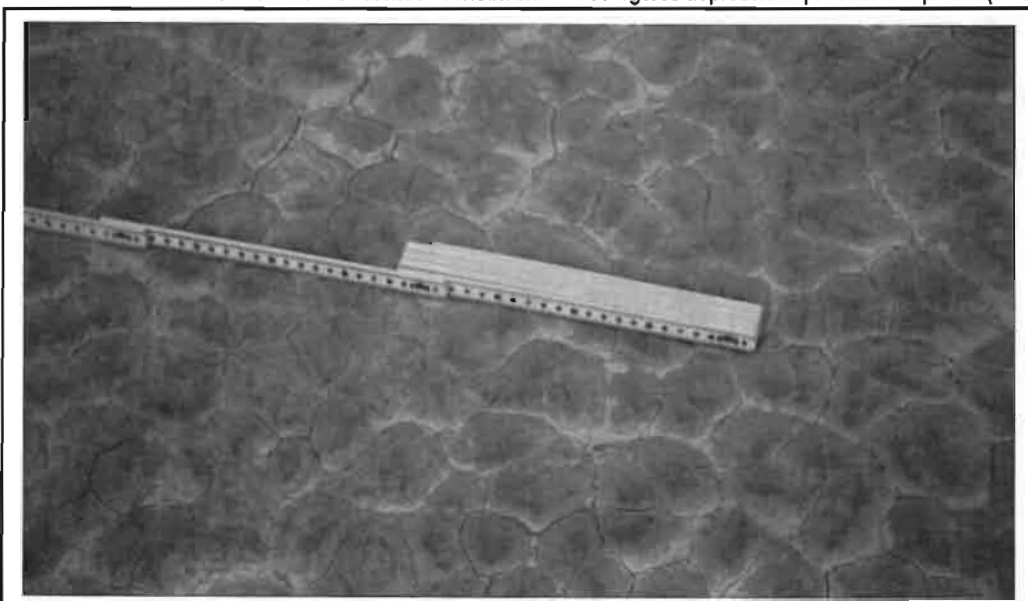


Photo 15 : Les dépôts argileux de texture fine se craquellent en prismes durcis dès qu'ils s'assèchent (2-1992)

La présence de sel ne constitue pas une contrainte irréversible comme cela est parfaitement perceptible sur l'image du niveau IV (Fig. 78), les mêmes surfaces salées qui, du côté pakistanaïse de la frontière, ont été abandonnées sont, en territoire indien, irriguées et mises en culture.

1.3.4. Dépôts limono-sableux

Plus claires (Fig. 77) que les sables éoliens, mais plus sombres que les sols argileux salins-alcalins ou gypseux, les surfaces affectées à la classe 2.2.1, qui couvrent les plus vastes superficies (17 % de l'image), occupent une position intermédiaire tant sur le plan spectral que spatial. Mélange de sables et de limons faiblement ou non salés ou carbonatés, elles sont de texture plus grossière, et moins compacte. La topographie associée à ces surfaces est généralement plane, d'autant plus que les sols sont limoneux, ou ondulée là où la proportion de sable est plus importante. Actuellement non cultivées, comme l'ensemble des unités qui composent le Cholistan, ce sont de vastes aires de pâturage pour les animaux. C'est là, davantage que sur les dunes, que se trouvent les meilleures espèces végétales. Les plus courantes sont *Cymbopogon jawarancusa* (khavi), *Eleusine compressa* (chhimber ou gandhi), *Cenchrus ciliaris* (dhaman), *Haloxylon salicornium* (lana), *Aerva javanica*, *Aristida depressa*, *Lasarus hirsutus* (Photos 12).

1.3.5. A propos de la rivière Hakra

Si le grand Cholistan présente les caractéristiques communes aux régions désertiques, topographie, morphologie dunaire, rareté de l'eau, en somme des conditions écologiques si contraignantes qu'elle réduisent naturellement l'occupation humaine, l'ensemble alluvial situé entre la rivière et le désert proprement dit, n'a, lui, de désertique que sa faible densité de population. Il offre des potentialités qui n'interdisent en aucun cas sa mise en culture. Que des canaux d'irrigation amènent l'eau, et ces sols argilo-limoneux ou limono-sableux prendront le même aspect qu'ils ont là où l'irrigation est actuellement pratiquée, au nord, à l'est, et à l'ouest sur les marges de la région.

A l'exposé de leurs hypothèses concernant l'évolution du réseau hydrographique, nombre d'auteurs qui depuis la fin du siècle dernier se sont intéressés à cette question, ajoutèrent une carte ou un croquis où ils figurèrent d'un trait plein ou en pointillé la localisation de ce qu'ils nommaient "l'ancien lit de la rivière Hakra" (Fig. 21 à 26). Les cartes du *Pendjab Revenue Survey* éditées en 1875-1876, font également très nettement mention du cours d'eau asséché, jalonné par des forts depuis Pulchra jusqu'à Derawar. On l'y suit d'est en ouest au nord de Mirgarh, de Jamgarh (Fig. 84) et de Marot (Fig. 85), puis vers le sud-ouest. Le fort de Mojgarh est situé au bord de la rivière (Fig. 86) qui vers l'ouest se serait écoulée entre Fort Dingarh (au sud) et Fort Bara (au nord) (Fig. 87). Fort Derawar serait également situé

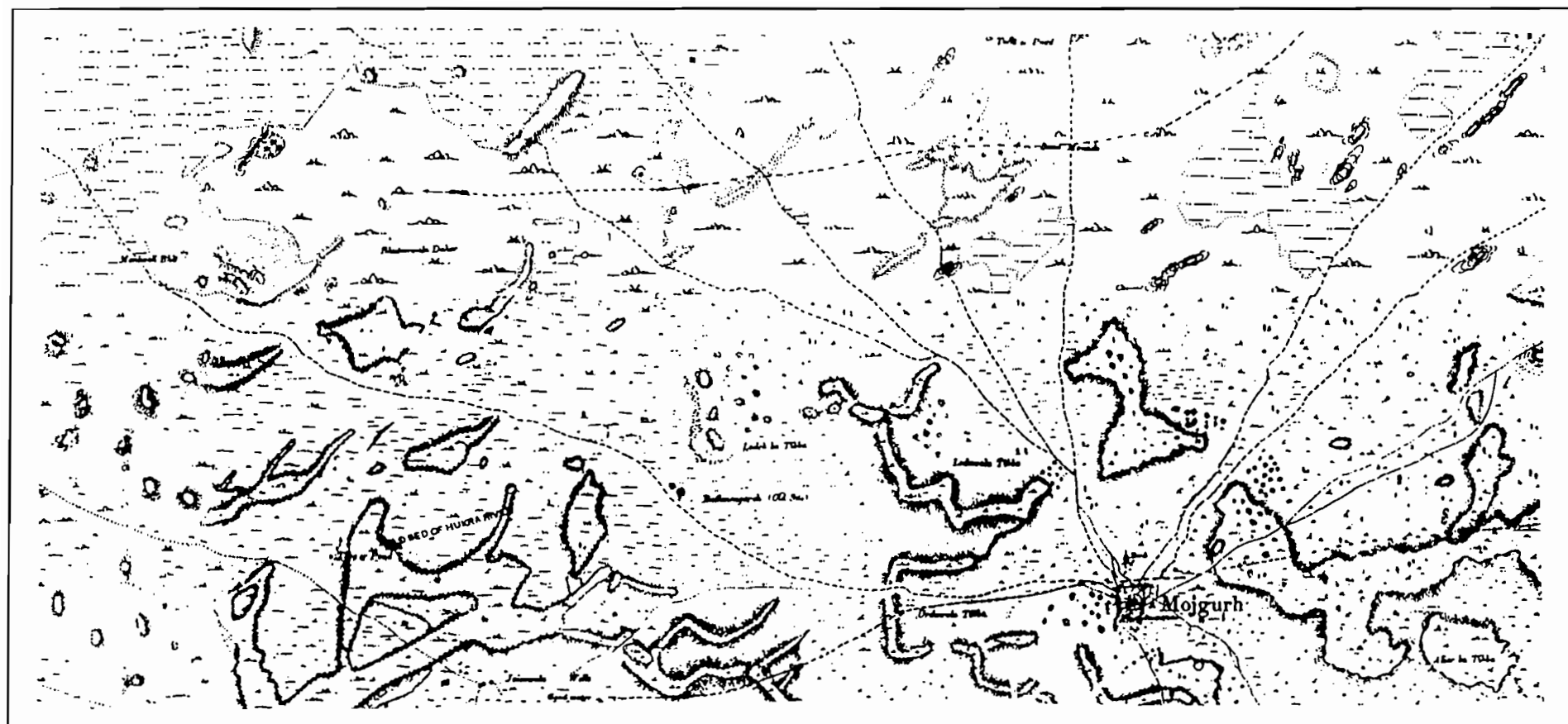


Fig. 86 : "L'ancien lit de la rivière Hakra" aux environs du fort de Moigarth (Moigurh) *Punjab Revenue Survey Map*, Bhawalpoor State, 1875, feuille n° 18.(extrait réduit).

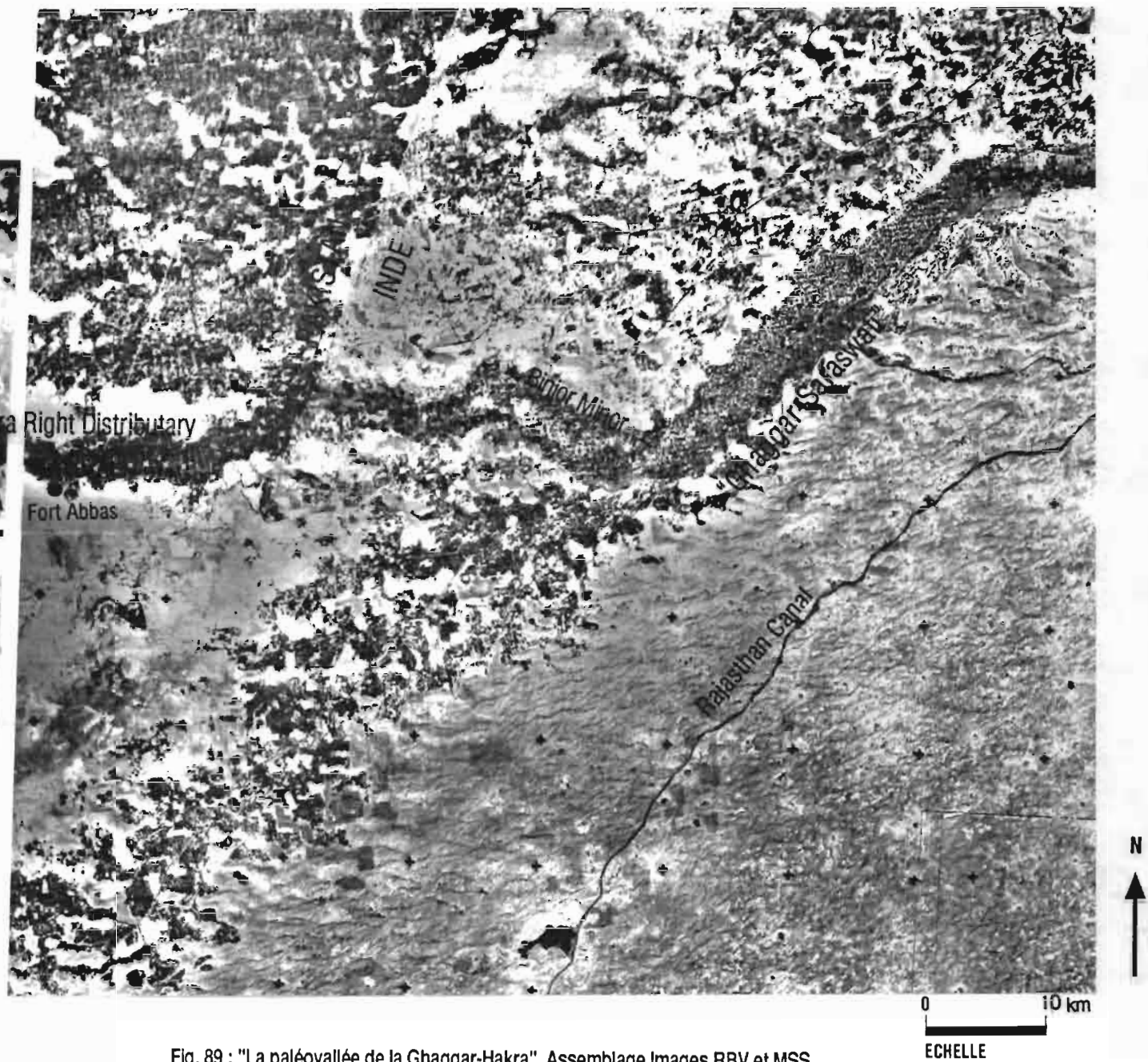
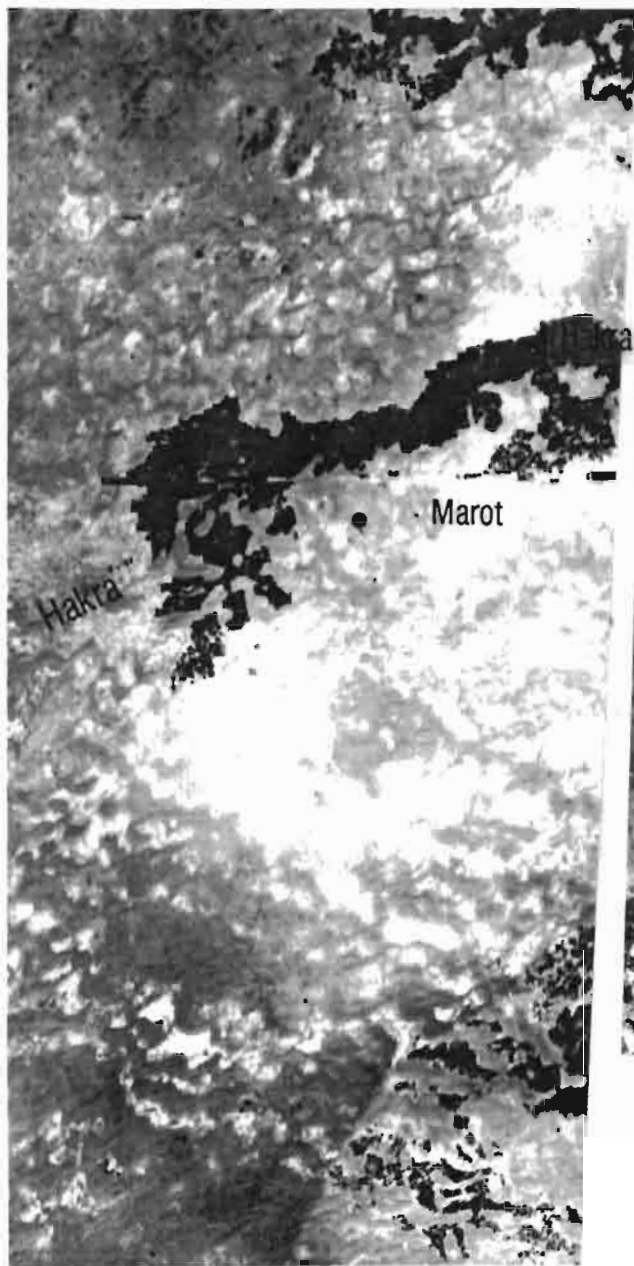


Fig. 89 : "La paléovallée de la Ghaggar-Hakra". Assemblage Images RBV et MSS

en bordure de la vallée (Fig. 88). Reporté sur les images décomposées en niveaux (Fig. 98), ce tracé ne correspond pas à une possible concentration de l'écoulement, ni d'ailleurs à aucun trait morphologique particulier. En 1940-1941, au cours de son expédition dans la région, Aurel Stein (1942b, p.7) apprend du directeur du *Map Publication Survey of India* que lors des levés effectués en vue d'une nouvelle édition de la carte topographique, au 1/4 inch, devant servir de base à la réalisation du *Sutlej Valley Project*, il fut demandé aux ingénieurs topographes de porter une attention particulière au tracé de cet ancien cours qui figurait sur les cartes plus anciennes. Ceux-ci n'ayant rien observé qui puisse être assimilé aux berges d'un cours d'eau, le tracé de l'Hakra disparut des cartes topographiques. Stein souligne cependant qu'il continue d'être considéré comme tel par les habitants de la région.

Aucun des tracés identifiés, qui pour la plupart sont différents les uns des autres, n'a pu être mis en coïncidence avec les représentations satellitaires, ni celui de Barns en 1872, ni celui de R. D Oldham en 1886 (Fig. 21) ou de C. F. Oldham en 1893 (Fig. 22), de Wilhelmy en 1969 (Fig. 23), pas davantage celui de Ghose *et al.* en 1979 (Fig. 24) ou de Mughal en 1980 (Fig.26).

L'incertitude qui régnait quant au tracé du cours d'eau tient au caractère même de l'écoulement. Au niveau IV de notre analyse, il apparaît très nettement et sans ambiguïté que les formes mises en évidence ne témoignent pas d'un écoulement pérenne, concentré dans une vallée définie, mais sont caractéristiques d'une vaste plaine d'épandage endoréique, composée de multiples chenaux, de dépressions salées assimilables à des sebkhas, formes vastes à fond plat qui sans l'éloignement suffisant ont pu être considérées comme un seul lit fluvial.

Les limites de l'épandage sont nettement visibles au sud où leurs caractéristiques spectrales et morphologiques ne peuvent être confondues avec celles des formations éoliennes. Ses marges septentrionales et occidentales sont actuellement irriguées et la limite avec les plaines d'inondation du Sutlej et du Panjnad sont masquées. À l'est, la bande de terre de 3 à 6 km de large actuellement irriguée, considérée (*op. cit.*) comme "l'ancien lit de la Ghaggar Saraswati-Hakra", constitue un axe d'écoulement par lequel les eaux auraient pu parvenir jusqu'à ce secteur plus déprimé. Comme l'écrivait Stein en 1942, il ne s'agit pas là non plus d'un lit fluvial qui aurait été inondé en permanence (Fig. 89).

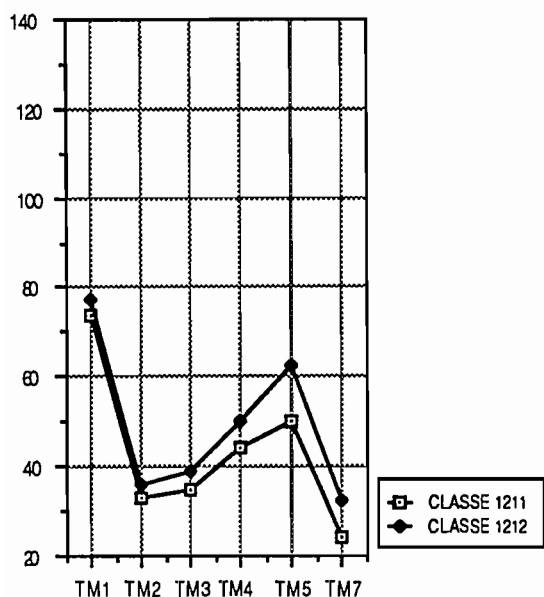


Fig. 90 : Niveau V : comportement spectral moyen des classes issues de la classe 1.2.1

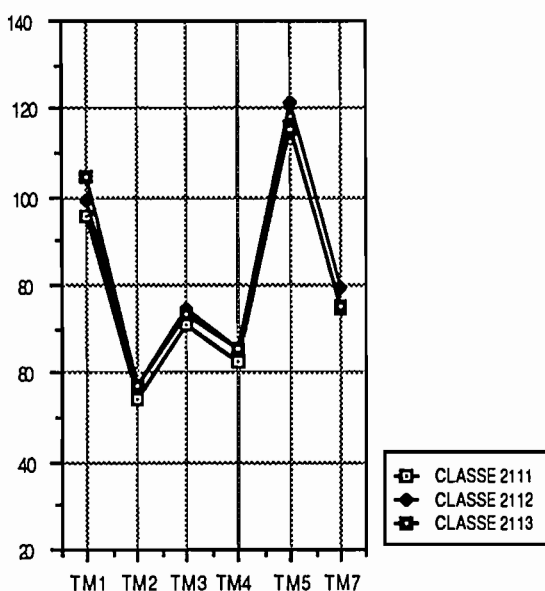


Fig. 91 : Niveau V : comportement spectral moyen des classes issues de la classe 2.1.1

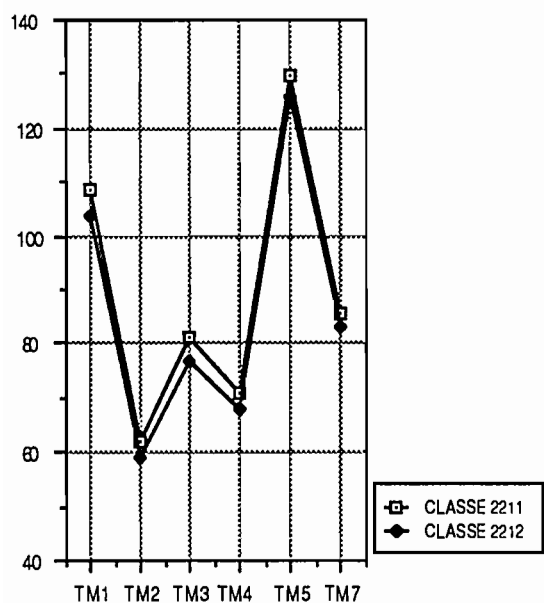


Fig. 92 : Niveau V : comportement spectral des classes issues de la classe 2.2.1

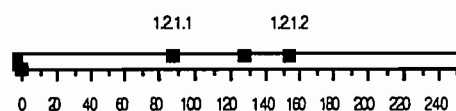


Fig. 93 : Niveau V : coordonnées des centres de gravité des classes sur l'axe discriminant

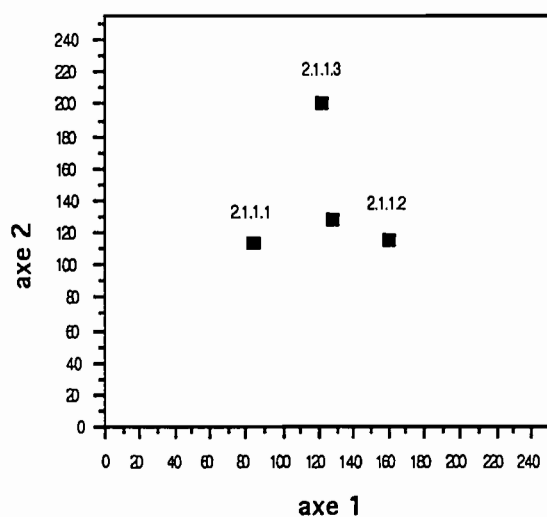


Fig. 94 : Niveau V : comportement spectral des classes issues de la classe 2.1.1

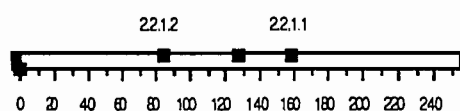


Fig. 95 : Niveau V : comportement spectral des classes issues de la classe 2.2.1

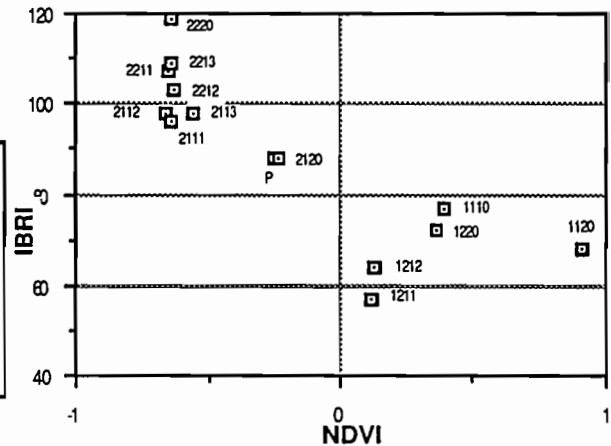
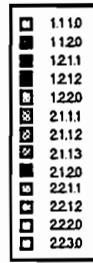
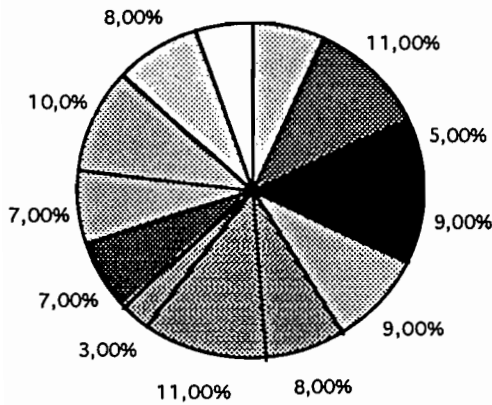


Fig. 96 : Surfaces couvertes par les classes du niveau V

Fig. 97 : Valeurs moyennes de l'indice de végétation (NDVI) et de l'indice de brillance (IBRI) calculées pour chaque classe du niveau V

1.4. Niveau V : quelques traits d'une évolution récente

1.4.1. Sables actifs (211.2) et sables stables (211.1)

Le caractère fortement stabilisé par la végétation de certains ensembles dunaires a été mis en évidence au niveau précédent. La densité du couvert végétal, explique aussi les différences mises en évidence au niveau V entre les unités 2.1.1.1 et 2.1.1.2. Cette dernière, plus claire (Fig. 91, 94 et 97) est également caractérisée par un indice de végétation légèrement plus faible que celui de la classes 2.2.1.1.

A ce niveau, sont distinguées les dunes stabilisées, les *ratta-tibba* (Gazetteers *Bahawalpur*, 1908), par un couvert végétal (classe 2.1.1.1.), et les *kakra-tibba* ou *thal*, dunes ou accumulations de sables vifs (classe 2.1.1.2). Ces dernières, réparties dans l'image au contact ou au sein de l'ensemble alluvial, sont le fait du remaniement éolien des dépôts alluviaux ou de la dégradation des dunes jusqu'alors stabilisées, par suite du surpâturage et ou d'un arrachage excessif des plantes.

Il est plus difficile d'interpréter la signification de la classe 2.1.1.3. Les pixels qu'elle caractérise sont en effet situés en majorité au sein des espaces irrigués dans des secteurs où nous manquons d'information de terrain.

1.4.2. Sables limoneux et limons sableux

Sablo-limoneux, les espaces représentés par la classe 2.2.1 ont été dits de transition entre *dahars* et *tibba*, entre ensemble alluvial et éolien. Au niveau V, une limite apparaît entre ces sous-ensembles. Le plus proche du coeur des dépressions argileuses salées carbonatées est le plus clair (2.2.1.1) (Fig. 92), le plus brillant (Fig. 94). Plus on s'éloigne de la dépression, plus le matériel est grossier, sableux, et moins il est clair (2.2.1.2) (Fig.92, 95, 97).

1.5. Des éléments pour une reconstitution des paléoenvironnements

Les formes qui résultent de l'action des eaux courantes, telles qu'elles apparaissent sur l'image satellitaire aux différents niveaux de détail considérés, ne sont en aucune façon caractéristiques d'un écoulement pérenne comme certains -Mughal (1980) par exemple- l'ont prétendu (cf. § I.4). Comme cela a été mis en évidence dès le niveau III de l'analyse, et confirmé par un examen à plus grande échelle, les dépôts alluviaux se sont accumulés selon un axe est-ouest, nord-est/sud-ouest dans une zone déprimée à l'intérieur des terres, formant ainsi une vaste plaine d'épandage.

Comme nous avons pu l'observer sur le terrain en février 1990, en période de pluies, l'eau stagne sur les surfaces argileuses salines alcalines qui constituent des secteurs légèrement déprimés (quelques décimètres) dans le petit Cholistan (Photo 17, 18), ou dans des cuvettes plus profondes dans le secteur des plus hautes dunes. Les pluies rares ne pénètrent pas assez profondément dans les sols, très compacts, pour provoquer une infiltration appréciable. L'absence de percolation et en même temps la forte évaporation de l'eau font augmenter l'accumulation sur et dans les sols des sels solubles. Les dépôts proviennent du ruissellement des eaux au bas des dunes. L'eau stagne mais ne s'écoule pas. Cette plaine d'épandage ne fonctionne que très faiblement car elle n'est plus atteinte par les crues. Actuellement seuls les cours d'eau himalayens ont une alimentation suffisante pour progresser jusqu'à la mer (chap. I.4). Les rivières issues des monts Siwaliks se perdent en formant un épandage de piémont (la Markanda par exemple), ou, comme la Ghaggar, progressent vers l'aval mais n'atteignent pas la mer.

La plaine est donc un héritage de périodes antérieures et témoigne d'oscillations paléoclimatiques. Des conditions particulières de la morphogenèse des plaines d'épandages connues et décrites à partir d'études effectuées dans d'autres régions (Tricart 1969, p. 266-290), il est possible de déduire un certain nombre d'enseignements sur l'évolution morphoclimatique de secteur.

"Les plaines d'épandage sont caractérisées par une submersion généralisée par des crues très espacées dans le temps (...) .L'eau s'étale dans les cuvettes endoréiques en une pellicule peu turbulente puis s'élève doucement. En certains endroits cependant, des concentrations de courants se produisent qui prolongent les principaux chenaux par où débouche la crue. (*op. cit.* p. 267). "L'inondation n'est jamais violente. En effet, au cours de sa progression sur les formations meubles et poreuses abandonnées par les crues précédentes, l'écoulement s'affaiblit rapidement par infiltration. Le transport est donc limité à du matériau fin et



Fig. 98 : Niveau V: partition des classes du niveau IV: 13 classes
A : Amadhpur East - B : Bahawalpur - De : Derawar - Di : Dingarh - M : Marot

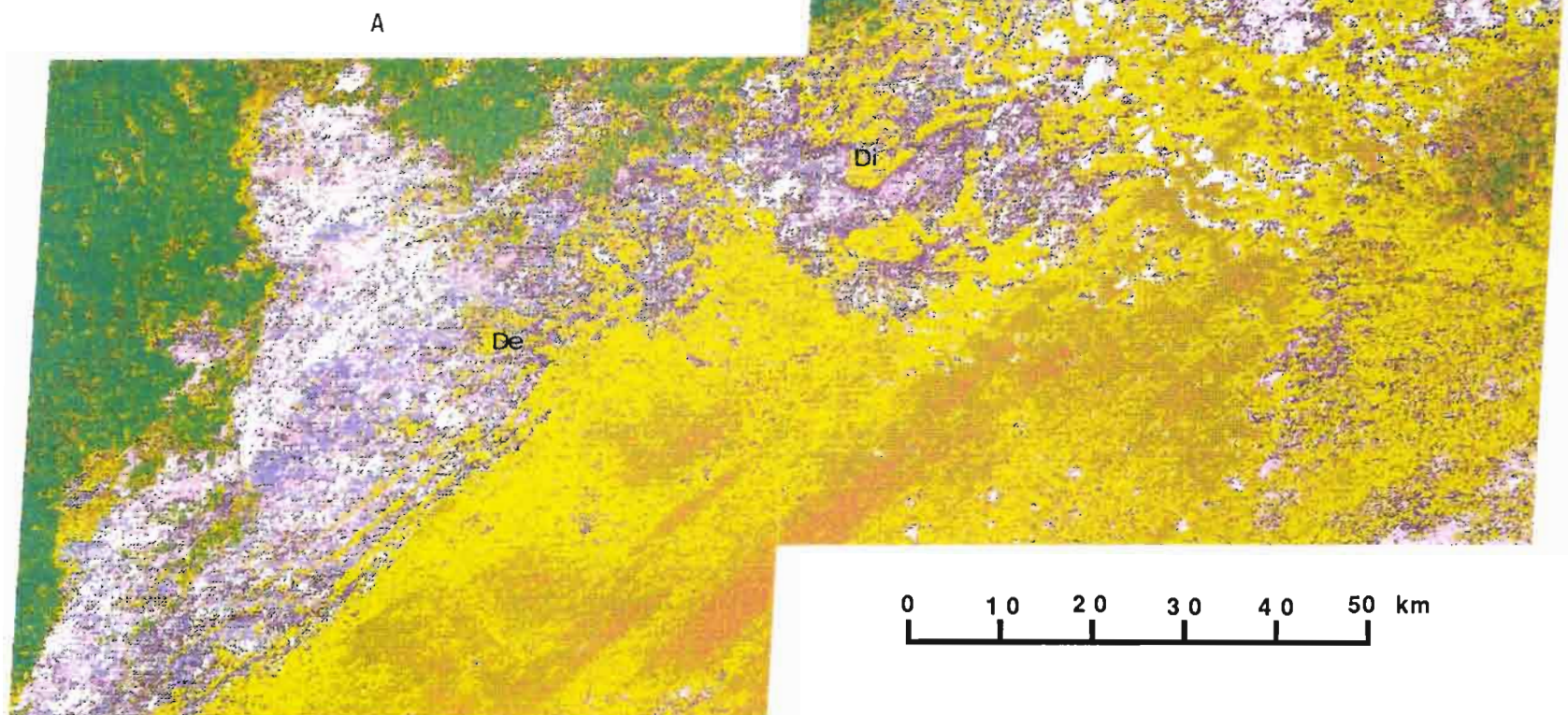




Photo 16 : Surface parfaitement plane et dure des dépôts argileux. Compacité et sels en excès excluent tout couvert végétal (2-1990)



Photo 17



Photos 17 et 18 : En février, à la suite d'une grosse pluie. Une mince pellicule d'eau peut stagner ainsi pendant plusieurs jours sur ces surfaces argileuses imperméables (15-2-1992)

aux matières dissoutes. (...) Les périodes de submersion alternent avec de longues périodes d'exposition à l'air caractérisées par une très forte évaporation."

Ces mécanismes caractérisent des milieux secs et un type d'écoulement spasmodique, temporaire ou saisonnier fonctionnant principalement en période de crue. Ce type de forme n'a pas d'équivalent en effet dans les régions humides où l'écoulement est permanent (Tricart *et al.*, *ibid.*). La distance qui sépare cette plaine d'épandage de l'impluvium est d'environ 350 km. Il s'agit donc d'un épandage lointain qui ne peut être le fait que de crues importantes et durables déclenchées par des pluies persistantes donnant des débits suffisamment élevés pour permettre à la crue de progresser au-delà du piémont.

On peut donc émettre l'hypothèse que cette plaine d'épandage, qui n'est plus aujourd'hui alimentée par des apports fluviaux d'aucune sorte, est un héritage de périodes déjà caractérisées localement par un climat sec (endoréisme, dépôt des alluvions), cependant accompagné de conditions climatiques dans l'impluvium marquées par des pluies plus abondantes qu'actuellement. Si l'on tient pour acquis le fait que les écoulements dont les traces apparaissent en amont, dits de la Ghaggar-Saraswati ou de la Chautang-Drishadwati et dont la Hakra serait un prolongement, sont issus du piémont et non de la zone interne de l'Himalaya (travaux de M.-A. Courty, 1990), ces formes héritées pourraient être compatibles avec une humidité locale à peine plus marquée qu'actuellement, ce qui serait en accord avec les arguments sédimentologiques (Courty, 1990). La période en question est datée entre 10500 et 7000 B. P.

La fin de la période humide, datée (*op. cit.* p. 136)) d'à partir de 7000 BP, et l'installation de conditions plus sèches correspondraient à la dégénérescence des épandages, de moins en moins bien alimentés en eau. Les crues de plus en plus faibles se perdent de moins en moins loin des collines d'où elles prennent naissance. Le vent devient le principal agent morphogénique : il remanie les formations alluviales. Les zones argileuses compactes sont les moins modifiées. Là où affleuraient des sables, ils sont repris en dunes orientées dans le sens des vents de mousson. Les formations argileuses apparaissent par taches disséminées au sein des formations sableuses ; elles interrompent l'organisation et beaucoup de formes de dunes irrégulières sont "moulées sur leurs bords" (Tricart, *op. cit.*) .

Tels sont les traits particuliers de la plaine d'épandage parvenus jusqu'à nous. Ils ont été beaucoup modifiés par des facteurs naturels on vient de le dire, mais aussi par l'homme, qui en mettant en culture grâce à l'irrigation ces marges autrefois alimentées par les crues, en a changé le modelé. Cela est particulièrement visible dans le secteur de Kudwala ou plus à l'ouest dans celui de Derawar.

2. LA PLAINE ALLUVIALE DE LA CHAUTANG ENTRE BHADRA ET BHIWANI

Hisar en Haryana est située à la jonction des deux images étudiées. Celles-ci se recouvrent sur une largeur de 2499 lignes et de 622 colonnes, soit 12 km de large et 50 km de long. La région considérée se trouve ainsi artificiellement partagée en deux secteurs. L'un, occidental, correspondant à l'image 203-292 du 22 mai 1986, comprend l'espace situé entre Bhadra au Rajasthan et Hisar ; l'autre, oriental, correspondant à l'image 204-292 enregistrée à la même date, celui entre Hisar et Bhiwani. Les deux scènes constituent des ensembles distincts. Même si les données ont été enregistrées le même jour à la même heure, elles ne peuvent être assemblées pour constituer un fichier unique. Les deux espaces ainsi délimités présentent en effet des caractéristiques spectrales différentes. L'hétérogénéité, exprimée par la valeur de l'écart-type, est plus grande à l'est (204-292) qu'à l'ouest (203-292) (Tabl. 19 et 20).

Tabl. 19 : Caractéristiques spectrales de l'image Spot 203-292 du 22 mai 1986
(secteur ouest : Bhadra - Hisar)

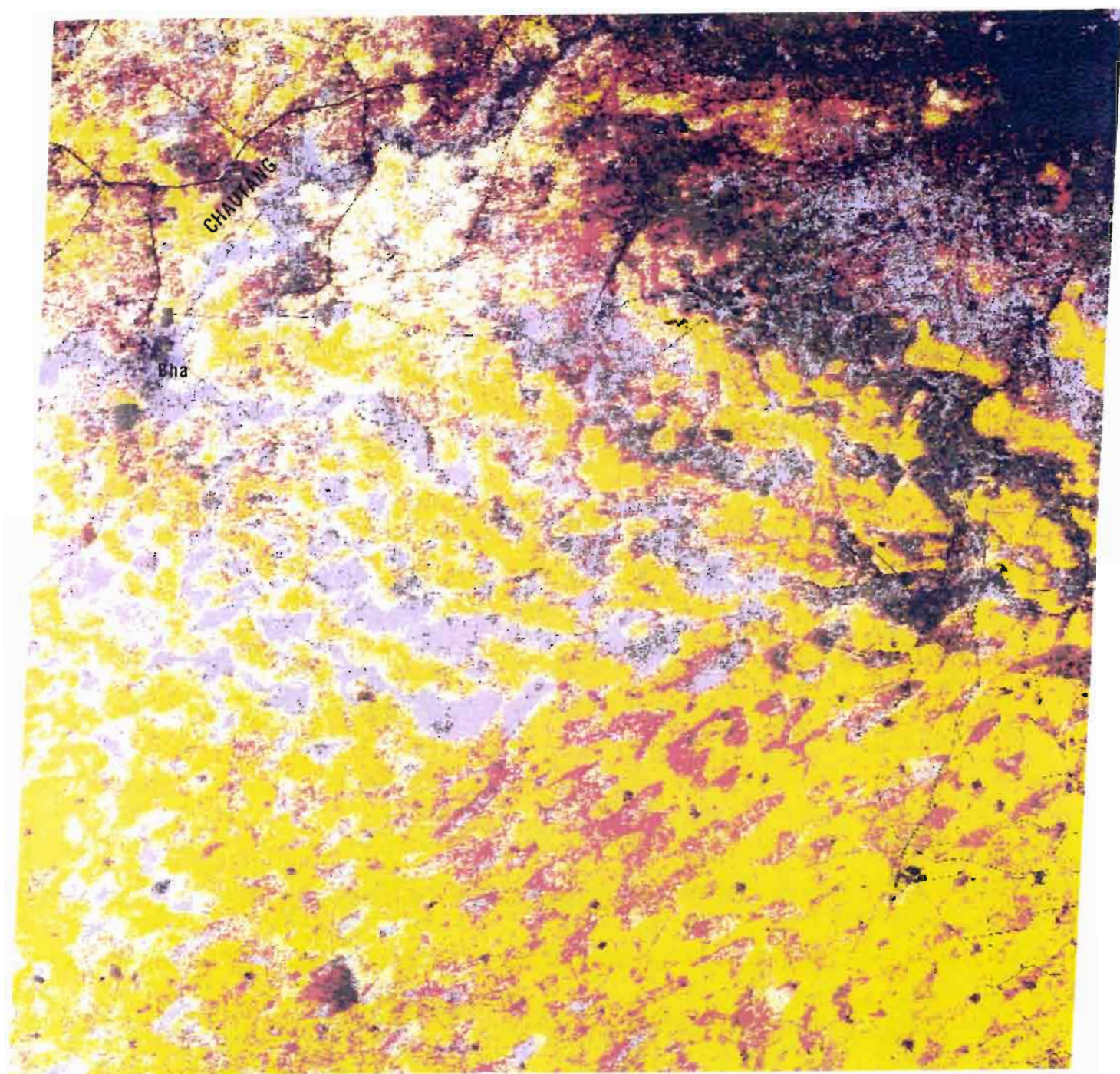
CANAL	MOYENNE	ECART-TYPE	MINIMA	MAXIMA
XS1	104,8	6,4	52	159
XS2	111,3	8,2	40	157
XS3	108,0	5,4	32	155

Tabl. 20 : Caractéristiques spectrales de l'image Spot 204-292 du 22 mai 1986
(secteur est : Hisar - Bhiwani)

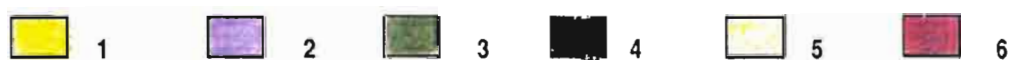
CANAL	MOYENNE	ECART-TYPE	MINIMA	MAXIMA
XS1	98,9	8,2	54	160
XS2	107,8	12,0	44	182
XS3	101,1	7,7	32	164

L'analyse typologique dont l'objectif est ici la délimitation d'unités homogènes sur le plan spectral et la découverte de l'organisation spatiale telle qu'elle est modélisée par le satellite, a donc été réalisée sur les deux images de façon séparée. Des correspondances ont cependant pu être établies entre leurs résultats respectifs à partir de la surface de recouvrement.





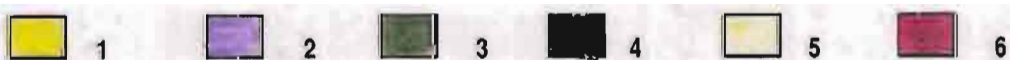
0 10 km



H : Hisar - B : Bhadra - S : Siswal - N : Ninan - J : Jhansal - Si : Siwani - Sid : Sidhmukh
 Fig 99 : Secteur ouest (Bhadra-Hisar) - Classification, niveau II : 6 classes



0 10 km



H : Hisar - B : Bhadra - S : Siswal - N : Ninan - J : Jhansal - Si : Siwani - Sid : Sidhmukh
 Fig 99 : Secteur ouest (Bhadra-Hisar) - Classification, niveau II : 6 classes



● Siswal

HISAR



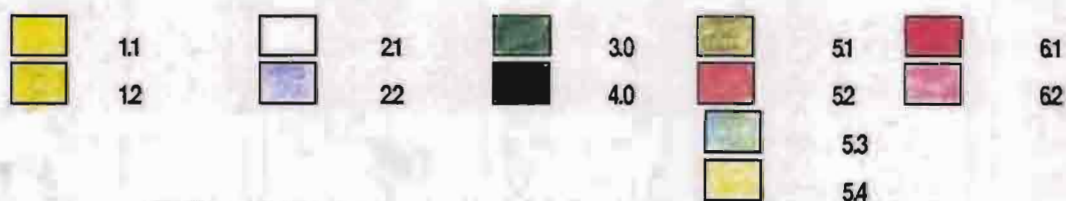
0 10 km



H : Hisar - B : Bhadra - S : Siswal - N : Ninan - J : Jhansal - Si : Siwani - Sid : Sidhmukh
 Fig 100 : Secteur ouest (Bhadra-Hisar) - Classification, niveau III : 12 classes



0 10 km



H : Hisar - B : Bhadra - S : Siswal - N : Ninan - J : Jhansal - Si : Siwani - Sid : Sidhmukh
Fig 100 : Secteur ouest (Bhadra-Hisar) - Classification, niveau III : 12 classes

2.1. Le secteur ouest : entre Bhadra et Hisar

L'analyse typologique a été effectuée sur un échantillon représentatif de 6944 individus (Tab. 21).

Tabl. 21: Caractéristiques de l'échantillon extrait de l'image Spot 203-292 du 22 mai 1986 (secteur ouest : Bhadra - Hisar)

CANAL	MOYENNE	ECART-TYPE	MINIMA	MAXIMA
XS1	104,8	6,5	61	136
XS2	111,2	8,3	49	138
XS3	108,0	5,5	50	136

L'image est décomposée en deux niveaux de détail emboîtés (Tabl. 22) :

- niveau II : 6 classes (Fig. 99)
- niveau III : 12 classes (Fig. 100).

Tabl. 22: Structure hiérarchique de l'image SPOT 203-292

NIVEAU I	NIVEAU II	NIVEAU III
P	1	1.1
		1.2
	2	2.1
		2.1
	3	3.0
	4	4.0
	5	5.1
		5.2
		5.3
		5.4
	6	6.1
		6.2

Si l'on considère comme indicateurs des différences qui existent entre les classes, les valeurs moyennes de l'indice de végétation verte (NDVI) et de l'indice de brillance calculées pour chacune d'entre elles, on remarque qu'au niveau II de l'analyse, quatre types de comportement peuvent être individualisés (Fig. 101). La classe 4 est caractérisée par la plus forte valeur moyenne de l'indice de végétation et au contraire par la plus faible valeur de l'indice de brillance. A la classe 3 est associé un indice de végétation supérieur à la moyenne mais un indice de brillance faible. La classe 6 a un comportement moyen quelle que soit la variable considérée. Les classes 1, 5 et 2 enfin, sont caractérisées par un indice de brillance supérieur à la moyenne de la population totale et par un indice de végétation inférieur.

2.1.1. Végétation arborée et sols argileux : la classe 4

La classe 4, outre le fait qu'elle est caractérisée par un indice de végétation élevé, signe d'une forte absorption dans le rouge (XS2) et d'une forte réflectance dans le proche infra-rouge (XS3) est aussi celle qui globalement, dans les trois bandes spectrales (Fig. 101) ainsi que sur les deux premiers axes discriminants (Fig. 102), présente les plus faibles luminances. Son centre de gravité (Tabl. 23) est le plus éloigné des autres, ce qui souligne sa particularité. Les pixels appartenant à cette classe s'organisent spatialement en plages et en traits (Fig. 99 et 119). Superposés aux cartes topographiques, ces derniers correspondent au tracé des canaux d'irrigation (quelle que soit leur largeur) et des routes, qui comme cela est indiqué pour les plus importants d'entre eux, sont bordés d'arbres.

Les contrôles effectués sur le terrain montrent que la classe 4, qui couvre seulement 4 % de l'image (Fig. 104), correspond :

- aux surfaces caractérisées par un couvert végétal dense et vert, c'est-à-dire en grande majorité aux arbres. *Acacia arabica* (kikar), *Prosopis specigera* (jand), *Salvadora oleoides* (jal), ou *Zyzyphus nummularia* (Ber) qui bordent les routes (Photo 19) et les canaux d'irrigation (Photos 20), sont disséminés dans les champs ou encore, sont groupés en bosquets sur les dunes, *Ficus religiosa* (pipal) ou *Ficus bengalensis* (banyan) près des tanks (Photo 21), représentent à la fin du mois de mai, période la plus chaude et une des plus sèches de l'année (chap. I.1), les rares points verts du paysage, les cultures *rabi* ayant été récoltées au printemps et les cultures *kharif* n'étant pas encore semées.
- La classe 4 correspond également aux surfaces les plus sombres du paysage, c'est-à-dire les sols limoneux à argileux ou/et aux surfaces humides. Il s'agit pour tous les cas observés de sols irrigués faisant l'objet le plus souvent d'une double récolte, *rabi* et *kharif*. Parmi les espaces présentant des luminances faibles, la classe 4 compte également la ville d'Hisar dans le quart nord-est de l'image.

Tabl. 23 : Secteur ouest (Bhadra - Hisar) - Niveau II : distances entre les centres de gravité des classes

	C 1					
C 1	0,0	C 2				
C 2	97,8	0,0	C 3			
C 3	119,1	80,4	0,0	C 4		
C 4	181,6	160,9	87,9	0,0	C 5	
C 5	37,9	66,3	109,4	184,4	0,0	C 6
C 6	56,5	63,5	65,8	132,2	52,9	0,0

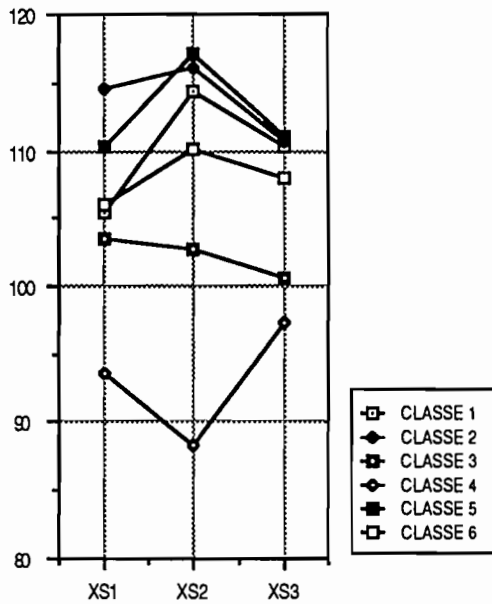


Fig. 101 : 203-292 (ouest) : niveau II : comportement moyen des classes dans les différentes bandes spectrales

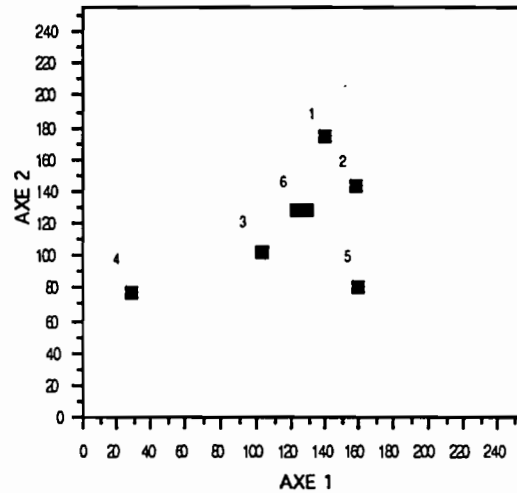


Fig. 102 : 203-292 (ouest) : Niveau II : coordonnées des centres de gravité des classes sur les deux premiers axes discriminants

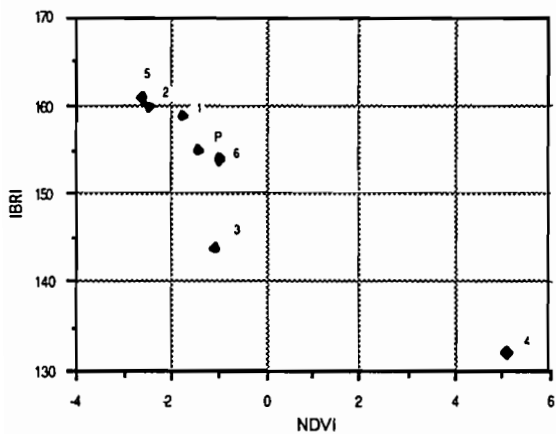


Fig. 103 : 203-292 (ouest) Niveau II : valeurs moyennes des indices de végétation (NDVI) et de brillance (IBRI)

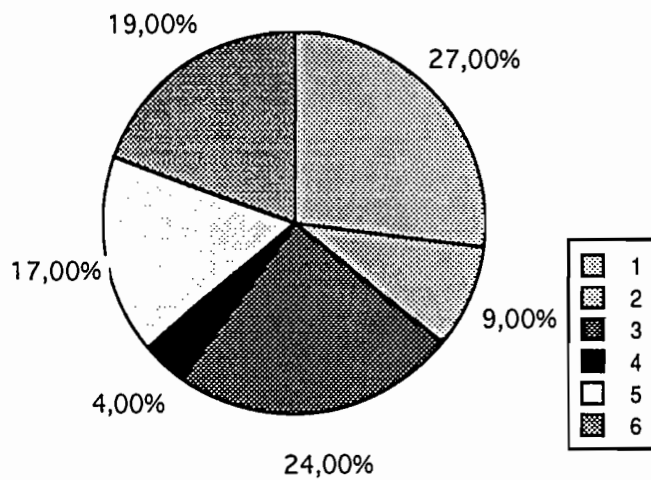


Fig. 104 : 203-292 (ouest) : Surfaces couvertes par les classes du niveau II

2.1.2. Une plaine sablo-limoneuse : la classe 3

La classe 3 présente des luminances moyennes décroissantes du visible au proche infra-rouge, ce qui pourrait attester l'humidité des surfaces qu'elle regroupe. Sur le plan spatial (Fig. 99, 118) comme sur le plan spectral, (Fig. 101, Tabl. 23), c'est l'ensemble le plus proche de la classe 4. La superposition de l'image classée aux cartes topographiques révèle la grande planité des espaces correspondant à cette unité, leur altitude variant de 208 à 210 m. La classe 3, qui couvre 24 % de l'image (Fig. 104), est de moins en moins représentée vers le sud-ouest. Au nord-ouest, elle prend une forme chenalisée. A l'ouest de la diagonale reliant Bhadra à Siwani, elle n'apparaît plus que sous la forme d'un semis de points figurant la trame régulière des villages (Fig. 118). Sur une composition colorée associant les canaux XS1 (en bleu), XS2 (en vert), XS3 (en rouge) enfin, on voit qu'elle correspond à des espaces cultivés, le parcellaire y étant très nettement perceptible.

Sur le terrain, la classe 3 caractérise une plaine constituée de sols limoneux à limono-sableux, irriguée et totalement mise en culture, l'irrigation à partir de puits ou de canaux qui prennent leur eau dans l'une des branches du *Western Yamuna Canal*, autorisant une double récolte annuelle (Photos 22 et 23). Les villages faits de maisons en pisé ou en briques cuites ou crues sont également regroupées dans cette classe.

2.1.3. Un ensemble sableux, dunaire : la classe 1

La classe 1 est l'une de celles qui présentent les plus fortes luminances moyennes (Fig. 101 et 102). C'est aussi celle qui couvre la plus grande partie de l'image, 27 % de sa surface totale (Fig. 104). Sur les cartes topographiques, elle correspond aux points les plus hauts et plus particulièrement aux accumulations sableuses (*sand features*), toutes distinctions confondues : planes, organisées en dunes ou sables vifs (Photo 24, 25, 26). L'altitude moyenne de cet ensemble est de 220 m environ, elle augmente vers le sud et le sud-est, les dunes culminant à 230-240 m.

Au sol, la classe 1 constitue un espace homogène de par sa composition sédimentologique essentiellement sableuse et de ce fait par son utilisation. Non irriguées, les étendues sableuses n'en sont pas moins parfois cultivées. Le *gram* (pois chiche) qui présente de faibles exigences en eau et possède un système racinaire très développé lui permettant de s'adapter à la sécheresse est semé en septembre-octobre jusque sur les pentes des dunes et dans les creux intradunaires, et récolté en avril (Photo 26).

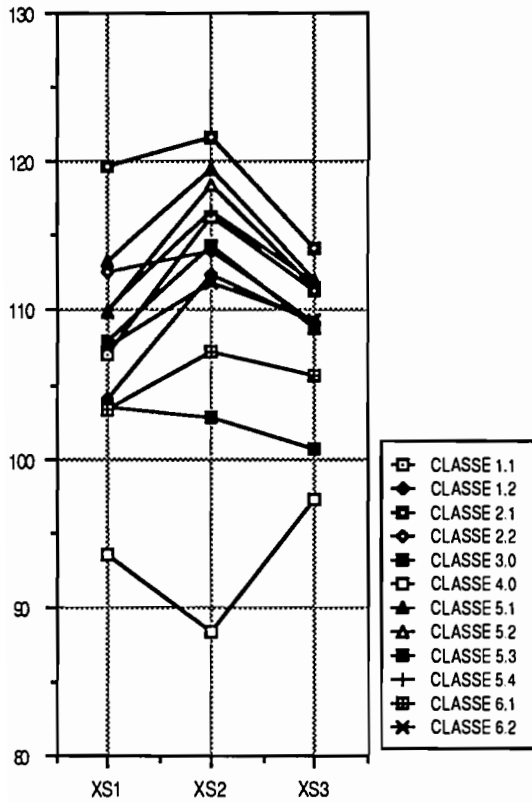


Fig. 105: 203-292 (ouest) : Niveau III comportement moyen des classes dans les différentes bandes spectrales

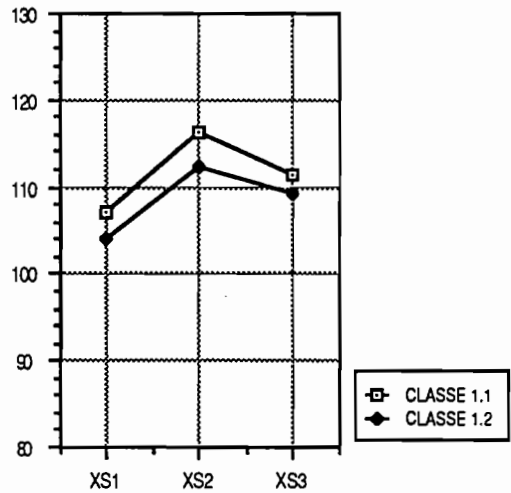


Fig. 106 : 203-292 (ouest) Comportement spectral moyen des classes issues de la classe 1

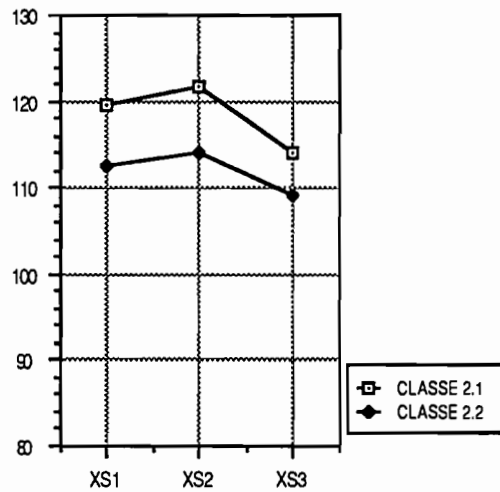


Fig. 107 : 203-292 (ouest) Comportement spectral moyen des classes issues de la classe 2

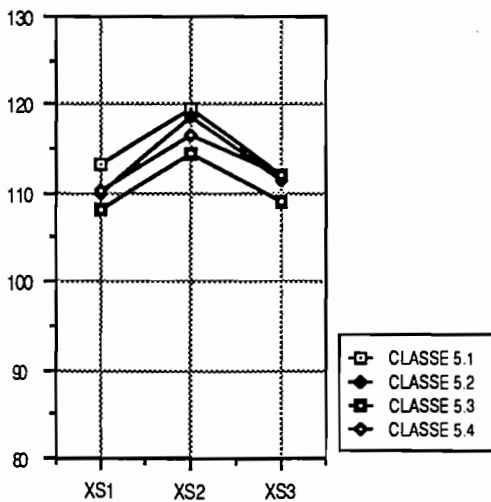


Fig. 108 : 203-292 (ouest) Comportement spectral moyen des classes issues de la classe 5

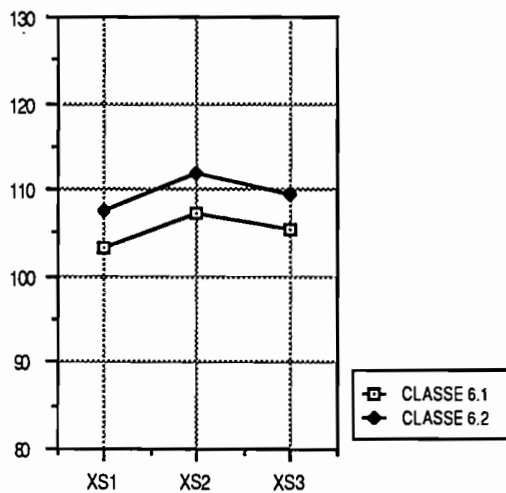


Fig. 109 : 203-292 (ouest) comportement spectral moyen des classes issues de la classe 6

En été ou quand elles ne sont pas cultivées en sec, les dunes ou accumulations sableuses servent d'aire de pâturage naturel aux troupeaux de chèvres ou de moutons (Photo 24).

La classe 1 est divisée au niveau III (Fig. 100) en deux sous-ensembles de surface presque identique (respectivement 13 et 14 % de la surface totale de l'image). La classe 1.2, comme le montre la situation de son centre de gravité sur l'axe discriminant (Fig. 110), présente une luminance moyenne moins forte que la classe 1.1, une brillance plus faible et un indice de végétation légèrement plus élevé (Fig. 114). Les surfaces affectées à la classe 1.2, davantage représentées à l'ouest de l'image, pourraient être caractérisées par un couvert végétal de type sec et épineux, buissonneux ou herbacé, *prosopis*, *acacia* ou *jujubier*, *aerva* ou *calligonum* par exemple, mais nous ne savons pas si ce trait est commun à tous les pixels regroupés dans cette classe (Photo 24). Comme nous l'avons remarqué lors de l'analyse de l'image TM (III.1) représentant la région de la Hakra, à plus grande échelle, les caractères communs aux pixels regroupés dans une classe ont trait à des phénomènes variant rapidement dans le temps et dans l'espace, humidité locale, présence de végétation par exemple, à ce qu'il est convenu d'appeler des "états de surface". C'est pourquoi il est souvent difficile d'interpréter ces sous-divisions de façon fiable même lorsque l'on parvient à les localiser avec précision, ce qui n'est pas toujours le cas.

2.1.4. Formations alluviales sablo-limoneuses carbonatées : la classe 2

La classe 2 (Fig. 117), qui représente 9 % de la surface de l'image (Fig. 104), voisine sur le plan spectral (Tabl. 23) des classes 5 et 6, l'est sur le plan spatial (Fig. 99) des classes 1 et 3. Elle caractérise des surfaces très réfléchantes dans les trois bandes spectrales (Fig. 101 et 102), claires (indices de brillance élevé) et sans végétation (Fig. 103). A l'ouest, cet ensemble correspond à des dépressions que la superposition des cartes topographiques à l'image classée met en évidence, et dont la largeur varie de 400 m à plus de 2 km. Les contours de l'unité radiométrique coïncident pour les ensembles situés au sud et à l'est de Bhadra avec la courbe de niveau 200 m. Le fond de ces dépressions est plat : 197 à 199 m d'altitude. La dénivellation avec les dunes entre lesquelles elles sont situées est de 19 à 50 m (Photo 27). A l'ouest et au nord-est de Bhadra, elle est inférieure à 10 m et les dépressions ne sont plus mentionnées sur les cartes. Toutes ne constituent pas des unités isolées. La plupart sont reliées entre elles de sorte qu'elles forment de véritables rubans pouvant, comme le précisent les cartes, être inondés pendant la mousson. L'influence spatiale de la classe 2 s'estompe au sud (au sud de Sidmukh) : la surface des dépressions diminue, elles sont plus espacées et disparaissent au sud-est de l'image (Fig. 99 et 117).

Dans le quart nord-ouest de la scène, au sud et au sud-ouest de Hisar, la classe 2 correspond également nous l'avons vérifié sur le terrain, à des dépressions. A peine perceptibles dans le paysage, puisque leur profondeur est inférieure à 1 m, ces dépressions ne sont pas

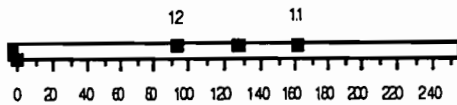


Fig. 110 : 203-292 (ouest) niveau III : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 1 sur l'axe discriminant

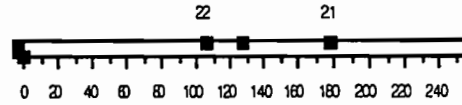


Fig. 111 : 203-292 (ouest) niveau III : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 2 sur l'axe discriminant

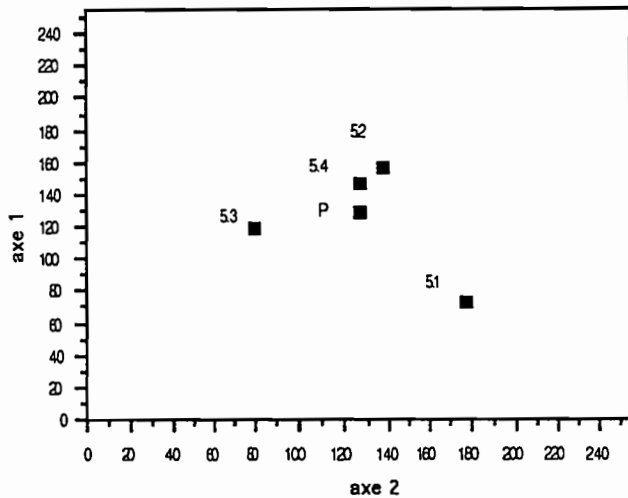


Fig. 112 : 203-292 (ouest) niveau III : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 5 sur l'axe discriminant

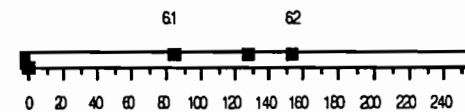


Fig. 113 : 203-292 (ouest) niveau III : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 6 sur l'axe discriminant

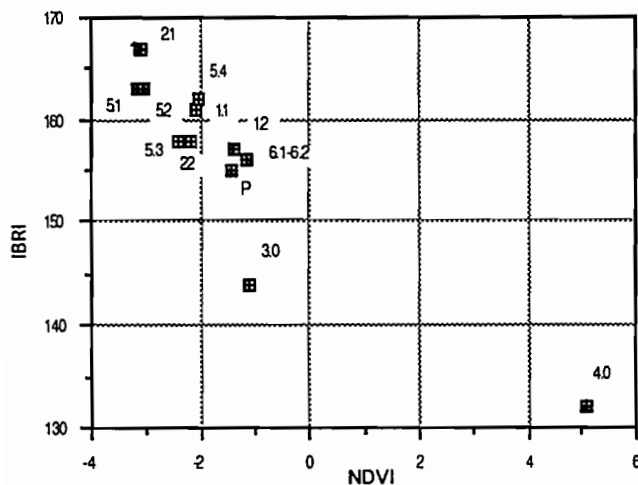


Fig. 114 : 203-292 (ouest) niveau III : valeurs moyennes des indices de végétation (NDVI) et de brillance (IBRI) calculées pour chaque classe

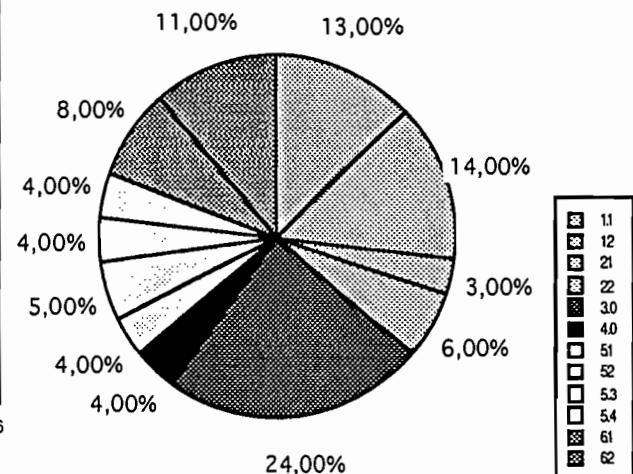


Fig. 115 : 203-292 (ouest) : surfaces couvertes par les classes du niveau III

indiquées sur les cartes topographiques (Photos 28, 29). Leur largeur est plus faible qu'à l'ouest: 350 m (+- 150m). Elles ont une forme sinueuse ; certains tronçons forment même des méandres. Leur fond, presque calibré, est d'environ 100 m de large. On voit sur l'image (Fig. 99) que la majorité de ces chenaux ont été comblés par des matériaux caractéristiques de la classe 3, de sorte que ceux qui caractérisent l'unité 2 se trouvent uniquement situés sur les

bords et non dans le fond. On retrouve cette configuration à l'ouest, entre Siswal et Ninan, et de façon très discontinue ailleurs.

L'homogénéité radiométrique de cette classe tient, nous l'avons mis en évidence sur le terrain, à la présence dans les sédiments limono-sableux ou sablo-limoneux, de carbonates, sous une forme pulvérulente et/ou sous la forme de concrétions appelées *kankars* (Photo 30, 31). De couleur blanche, ces formations sont très réfléchantes. A l'ouest, les dépressions interdunaires ne sont pas irriguées. On y cultive cependant du *bajra*, du *moth* et autres cultures *kharif*, ainsi que du blé, notamment dans les environs de Bhimsana. Au nord-est, en revanche, les dépressions carbonatées, comblées ou non, perceptibles uniquement par leur couleur plus claire sont, comme les autres terres, irriguées et mises en culture.

La classe 2.1 est celle qui, au niveau III, présente l'indice de brillance le plus élevé (Fig. 114), davantage que les sous-ensembles issus de la classe 5, pourtant la plus brillante au niveau II. Elle ne couvre que 3 % de la surface de l'image contre 6 % pour la classe 2.2 (Fig. 115). Ces deux unités traduisent non une différence de nature ou de composition, leur courbe radiométrique a la même allure (Fig. 107), mais une différence d'état de surface liée à une utilisation différente du sol. Ceux qui ont été labourés ou cultivés pendant l'hiver présentent une rugosité plus forte et sont plus sombres. Au contraire, les surfaces non cultivées, tassées et lisses, notamment celles qui sont situées à proximité des villages, sont très réfléchissantes .

2.1.5. Ensemble sableux non dunaire : la classe 5

La classe 5 est au niveau II, avec la classe 2, celle qui présente les plus fortes luminances (Fig. 101). Son comportement spectral moyen est semblable à celui de cette dernière dans le proche infra-rouge mais diffère dans le vert où elle montre une plus forte luminance. Proche sur le plan spectral, la classe 5 l'est avant tout de la classe 1 (Tabl. 23). Cette proximité est d'ailleurs aussi spatiale puisque les pixels appartenant à cette unité sont en majorité situés au contact des dépressions interdunaires (classe 2) et des dunes (classe 1) (Fig. 99). Cet ensemble, qui constitue donc une unité de transition, correspond sur le terrain à des étendues sableuses planes ou à des accumulations non dunaires de faible hauteur. Elles sont généralement cultivées (cultures *kharif* principalement) .

Au niveau III, la classe 5 est scindée en quatre sous-ensembles qui couvrent des aires de même superficie, 4 à 5 % de l'image (Fig. 115). L'unité 5.4 est la plus proche par ses caractéristiques spectrales de l'unité mère. Les classes 5.1 et 5.2 sont caractérisées par une même valeur moyenne de l'indice de brillance (Fig. 114), la plus élevée des quatre

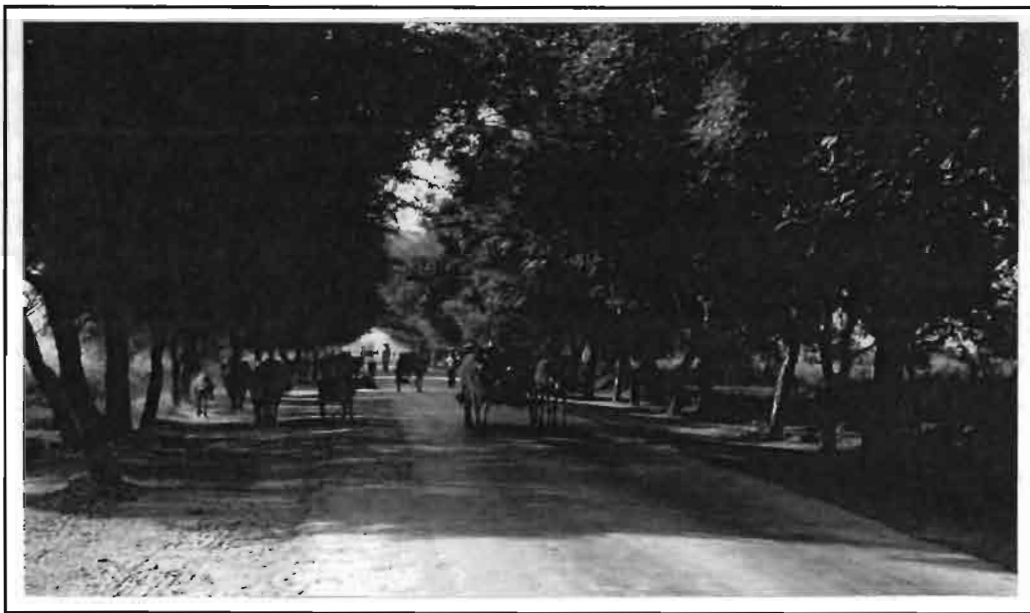


Photo 19 : Une route typique d'Haryana, bordée d'acacia et de prosopis



Photo 20 : Bordure continue d'acacia le long d'un canal d'irrigation

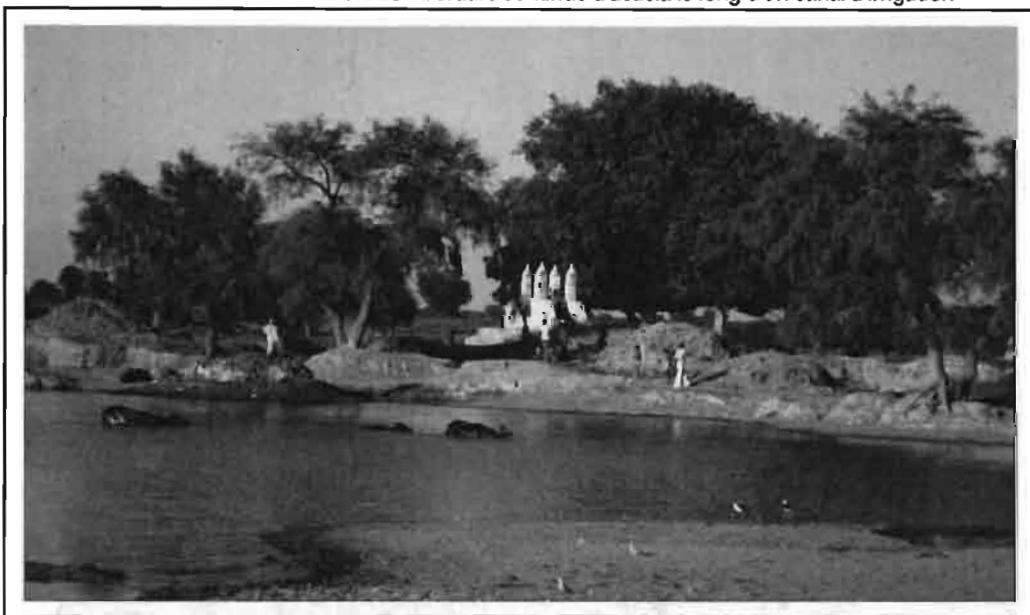


Photo 21 : *Pipal*, *banyan* ou acacia au bord d'un tank en Haryana



Photo 22 : Culture du blé dans la plaine sablo-limoneuse irriguée, aux environs de Hisar en Haryana



Fig. 23 : Champ cultivé. Texture limono-sableuse des sols dans la plaine de Hisar (Haryana)

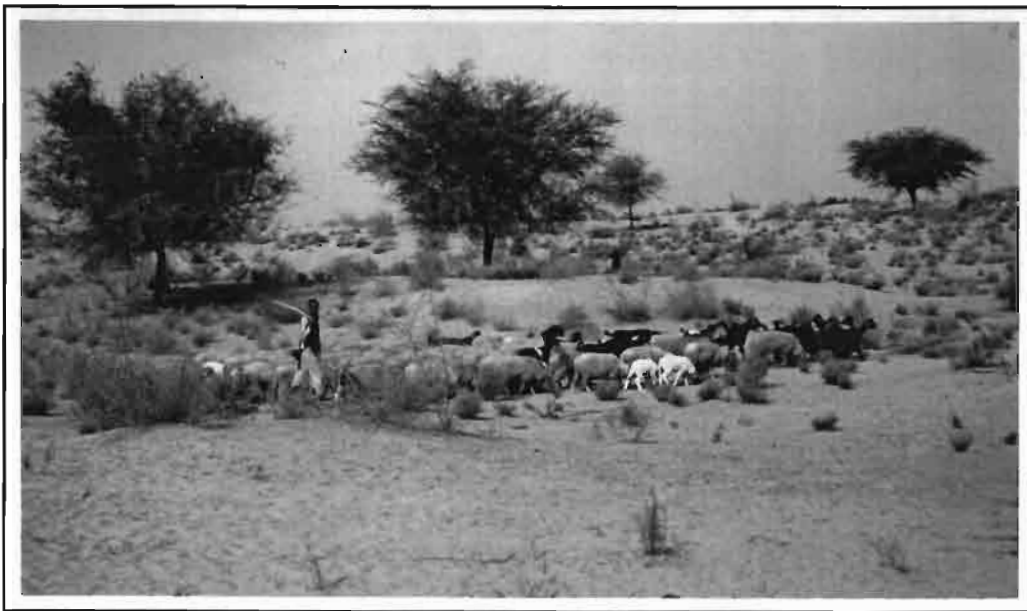


Photo 24 : Ensemble sableux dunaire servant d'aire de pâturage naturel. Végétation herbacée clairsemée. Végétation arborée épineuse (Prosopis)

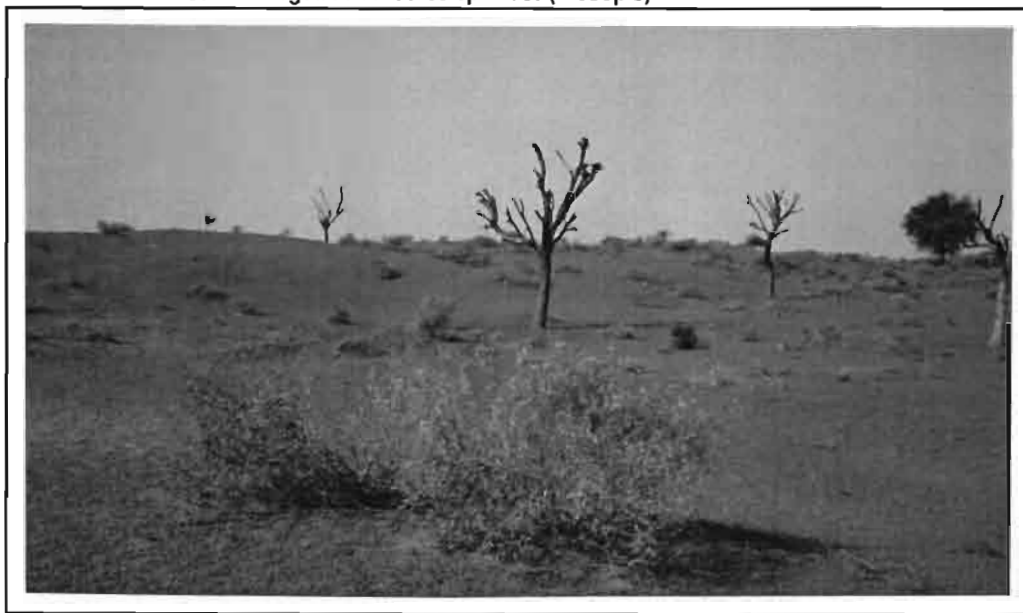


Photo 25 : Paysage dunaire aux environs de Gorchi au sud-ouest de Hisar. Les arbres sont coupés pour le bois ; les branches fines et le feuillage servent de nourriture pour les animaux



Photo 26 : Culture du gram (pois chiche) sur les dunes en hiver



Photo 27 : Dépression sablo-limoneuse carbonatée aux environs de Sidmukh, entourée par les dunes . Le blé y est cultivé en hiver sans recours à l'irrigation artificielle



Photo 28 et 29 : Au sud-ouest de Hisar, les linéaments mis en évidence sur les images des composantes principales correspondent à des dépressions très peu marquées. Des différences de couleur entre les bords (clairs) et le fond plus sombre permettent de les repérer (au 3e plan), sur la photo 28. (au second plan sur la photo 29)



Photo 29



Photo 30 : Nodules carbonatés ou kankars en surface

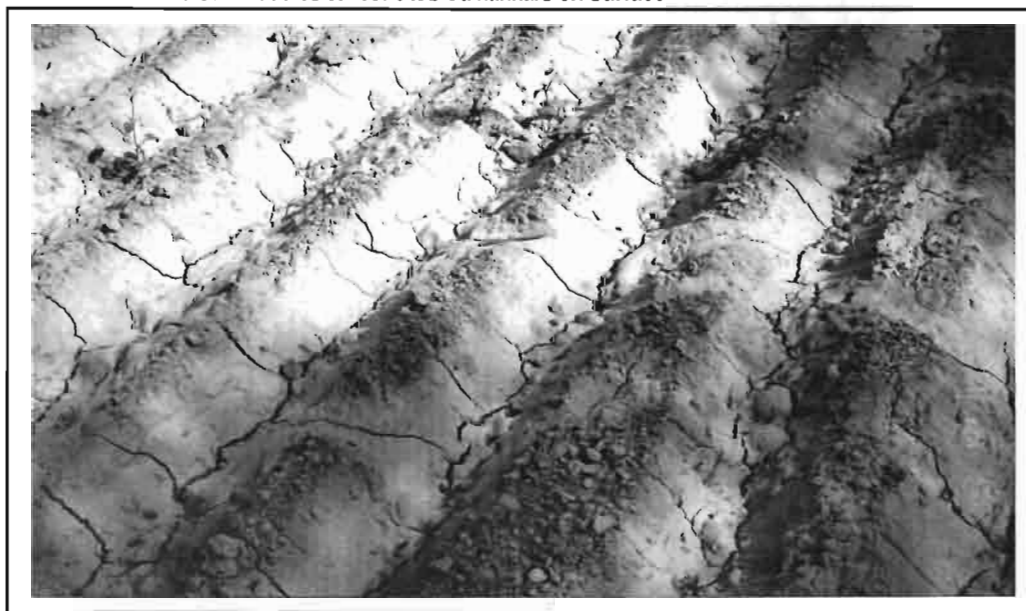


Photo 31 : Forte réflectance des sols carbonatés

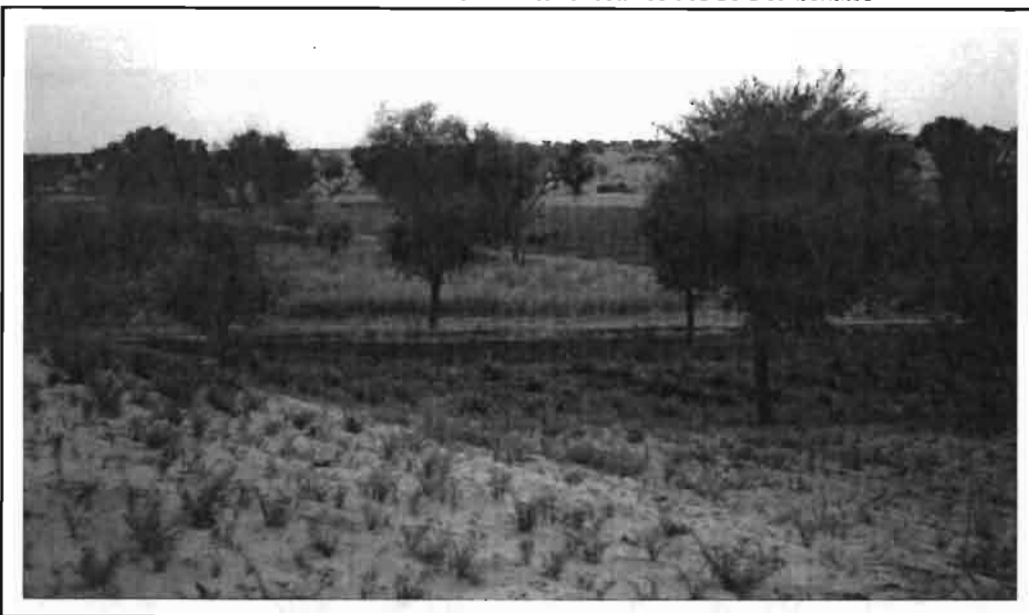


Photo 32: Dépression intradunaire cultivée en sec (blé)

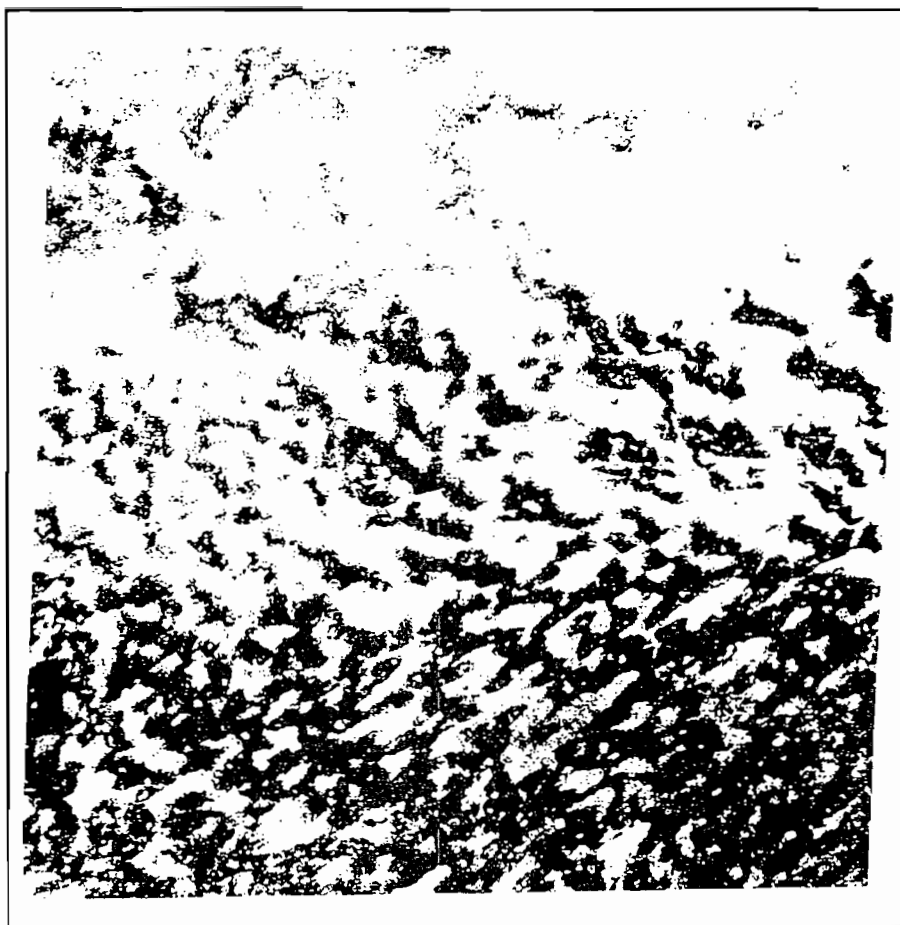


Fig. 116 : Secteur ouest (Bhadra - Hisar) - classification, niveau III : classes 1.1 et 1.2 (échelle 1 cm=5,5 km)

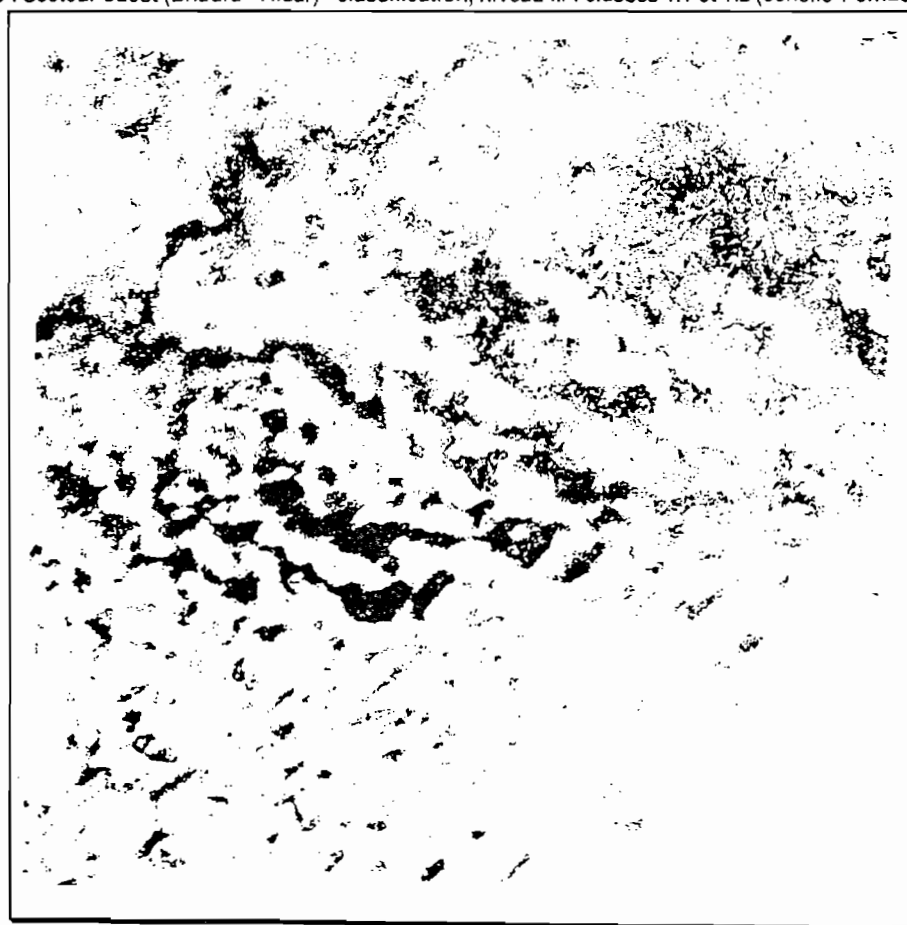


Fig. 117 : Secteur ouest (Bhadra - Hisar) - classification, niveau III : classes 2.1 et 2.2

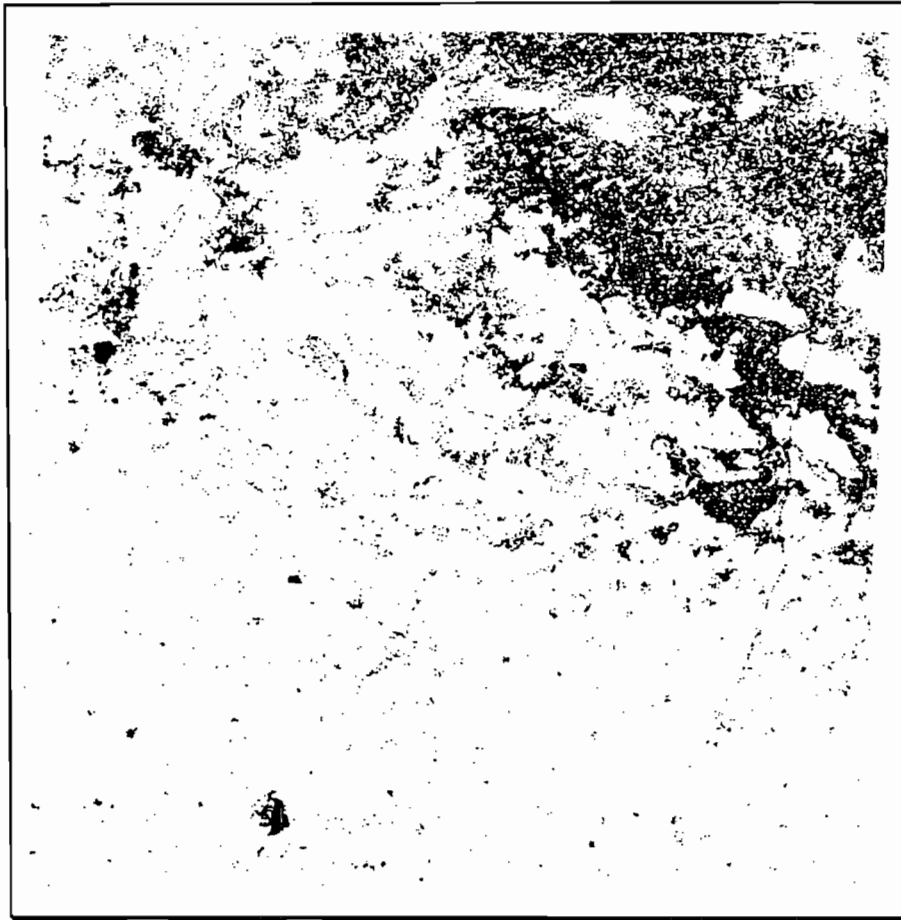


Fig. 118 : Secteur ouest (Bhadra - Hisar) - classification, niveau III : classe 3.0 (échelle 1cm=5,5 km)

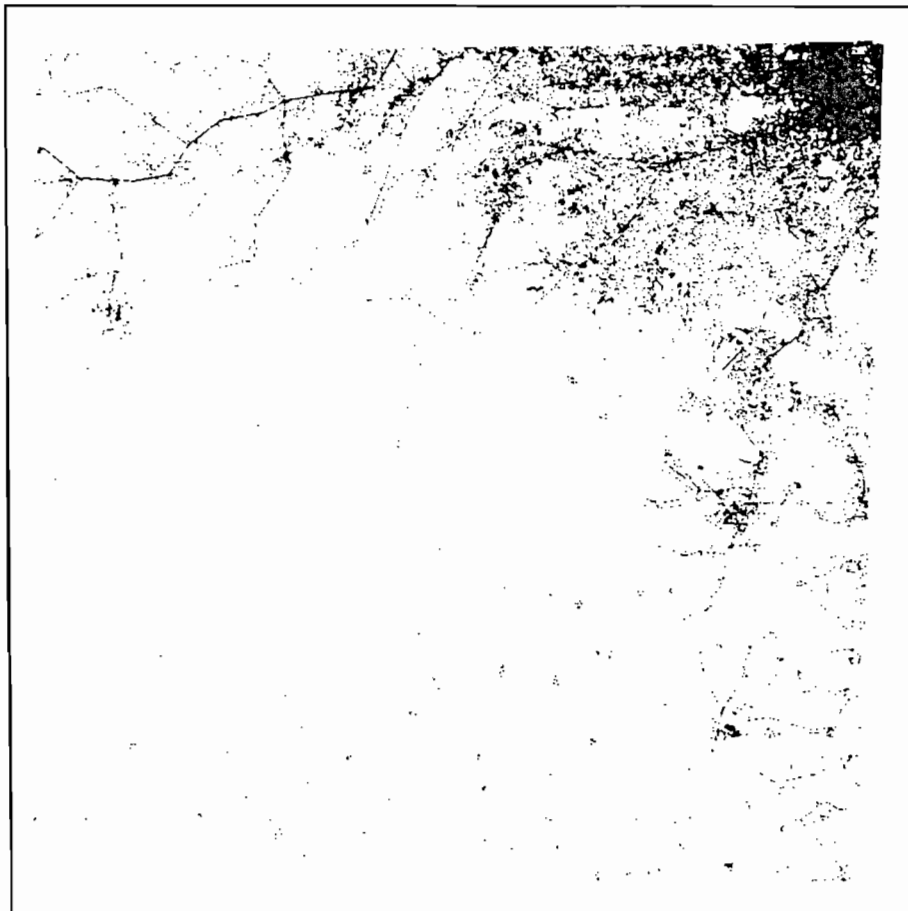


Fig. 119 : Secteur ouest (Bhadra - Hisar) - classification, niveau III : classes 4.0 (échelle 1 cm=5,5 km)

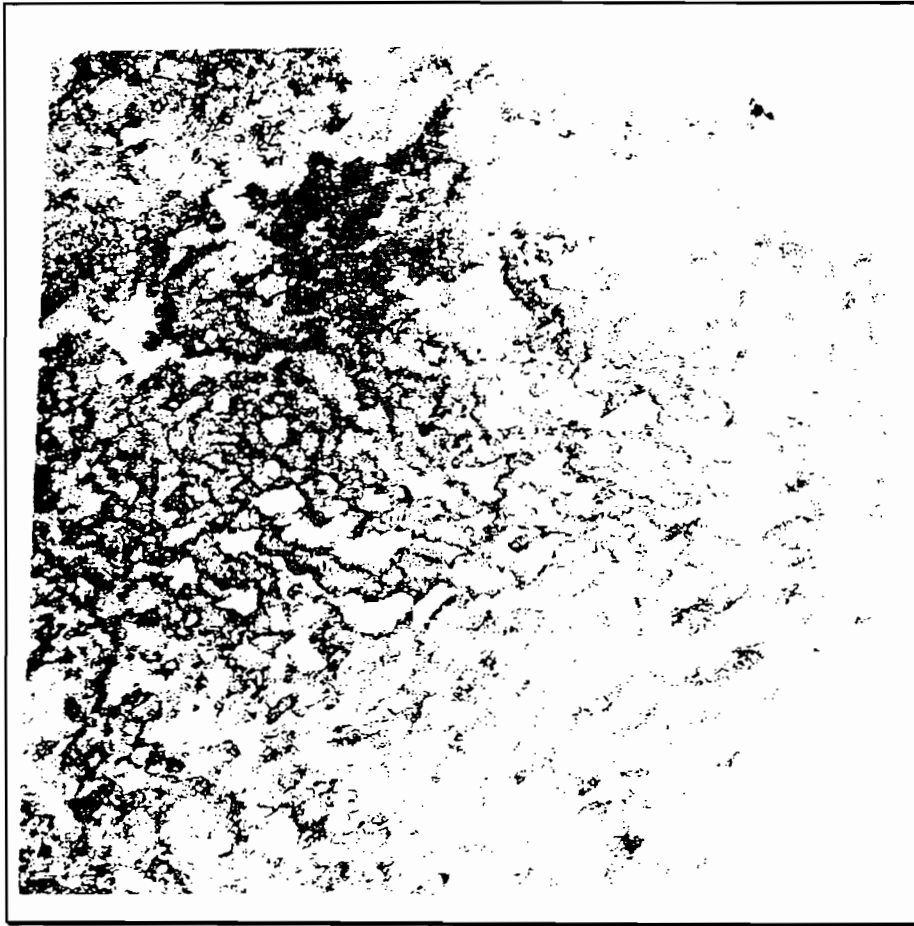


Fig. 120 : Secteur ouest (Bhadra - Hisar) - classification, niveau III : classes issues de la classe 5 (échelle 1 cm=5,5 km)

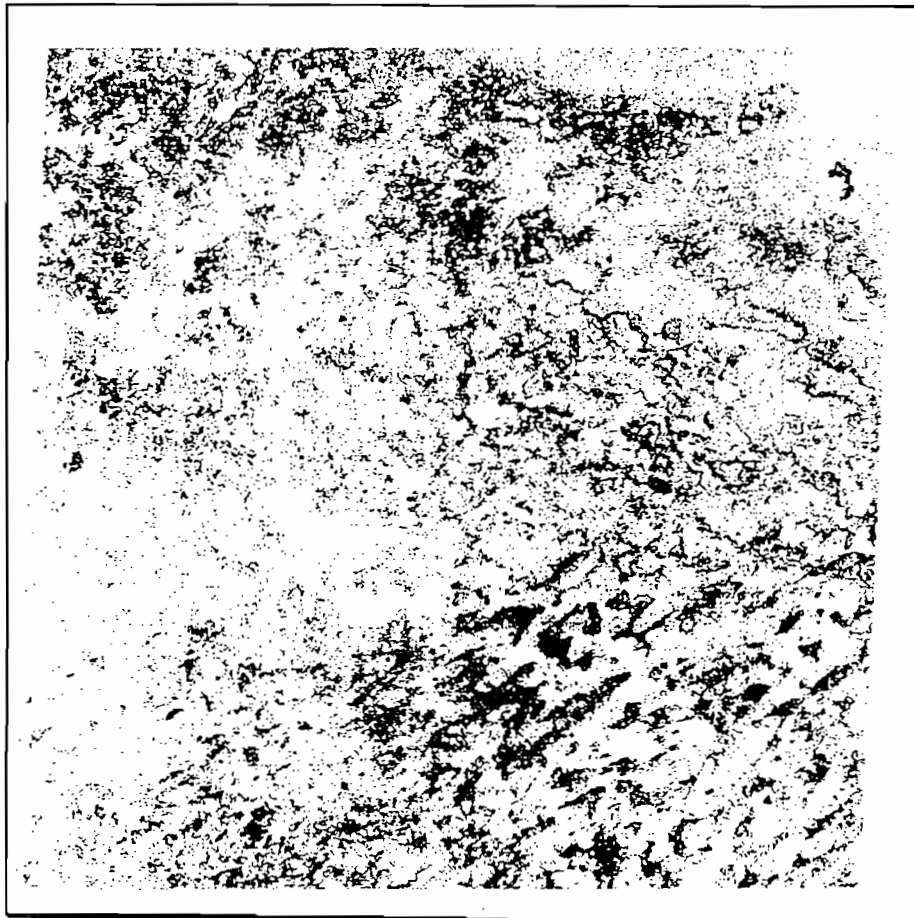


Fig. 121 : Secteur ouest (Bhadra - Hisar) - classification, niveau III : classes 6.1 et 6.2 (échelle 1 cm=5,5 km)

classes qui, par ailleurs, s'ordonnent sur les deux premiers axes discriminants entre les unités 5.1 (la plus claire) et 5.3 (la plus sombre) (Fig. 112). La répartition spatiale des pixels appartenant à chacune des classes nous éclaire davantage sur leur signification que l'examen de leur comportement dans les différentes bandes spectrales (Fig. 100 et 120).

- La classe 5.1 est située au contact de la classe 2, c'est-à-dire des dépressions interdunaires carbonatées ; la forte luminance des surfaces peut donc s'expliquer par une "contamination latérale des sables", phénomène analysé par M.-A. Courty (1990, p. 143-173) .
- La classe 5.2 n'est représentée qu'à l'ouest de l'image, en particulier au nord-ouest, secteur où l'unité 5 apparaissait sous la forme d'une plage continue. Située en général au contact des formations dunaires (classe 1) et de l'unité 5.1, elle pourrait représenter des surfaces composées de matériaux à la fois plus sableux et moins carbonatés.
- Les unités 5.3 et 5.4 sont les seules à être représentées à l'est de l'image. La première semble correspondre à des surfaces moins réfléchantes du fait de leur texture. Il pourrait s'agir d'après leur localisation, au contact ou sur les surfaces dunaires (classe 1), des secteurs cultivés. En effet, même si le *gram* a été récolté en avril , l'état de ces surfaces a été modifié.
- Les surfaces qui correspondent à la classe 5.4 sont quant à elles situées aux mêmes endroits que celles de la classe 5.2 ou entre les classes 5.1 et 5.2. La signification de ce sous-ensemble n'a pu être interprétée. En effet, dans des secteurs où les points de repère font défaut, il est la plupart du temps impossible de superposer avec certitude information-terrain et information-image, ceci d'autant plus quand la répartition des pixels affectés à chaque classe tend à être pointilliste et donc à varier sur de faibles surfaces.

2.1.6. Un ensemble sablo-limoneux composite : la classe 6

Un peu plus étendue que la classe 5 puisqu'elle couvre 19 % de la surface de l'image, la classe 6, située sur le plan spectral entre les unités 3 et l'ensemble des unités 1, 2 et 5 (Fig. 101, 102), constitue aussi un ensemble de transition. Dans le quart sud-est celui-ci caractérise des dépressions interdunaires orientées nord-est/sud-ouest -moins profondes que celles caractérisées par la classe 2 (inférieures à 10 m)- recouvertes, nous l'avons vu sur le terrain, par des dépôts éoliens. Les formes du parcellaire visibles sur les compositions colorées indiquent que cet ensemble correspond à des surfaces cultivées. Mais elles ne sont pas irriguées, les canaux n'atteignant pas le secteur dunaire. Au nord et au nord-ouest, la classe 6 est également présente au contact de la plaine limono-sableuse (classe 3) et de l'ensemble strictement sableux (classe 1). Elle est alors en position légèrement plus haute que la plaine. Une topographie plane ou légèrement ondulée, des sols sablo-limoneux non carbonatés, cultivés en été ou en hiver (*gram*), sont les traits propres à cette unité qui sont mis en évidence sur le terrain (Photos 32).

Les sous-ensembles 6.1 et 6.2 (Fig. 109 et 121) issus de la classe 6 couvrent respectivement 8 et 11 % de la surface totale de l'image (Fig. 115). Les deux classes ont les mêmes valeurs moyennes de l'indice de végétation et de brillance (Fig. 114). La seule différence repérable entre elles sur le plan spectral est leur luminance, plus élevée pour la classe 6.2 que pour la classe 6.1 (Fig. 105 et 109). Différences d'états de surface ou composition plus sableuse des sols de l'unité 6.2, les informations recueillies sur le terrain n'ont pas permis de décider entre ces deux hypothèses.

2.1.7. Conclusion

De la description des unités radiométriques mises en évidence par l'analyse typologique, il ressort que la partition des classes du niveau II permet d'accéder à une connaissance des surfaces qui, lorsqu'elle peut être interprétée avec certitude, ce qui n'est pas toujours le cas, n'est pas -exception faite des sous-divisions de la classe 5- pertinente par rapport aux questions que nous avons posées. Le niveau III, en effet, met en évidence des états différents pouvant caractériser les ensembles individualisés au niveau II. Ces différents états sont conjoncturels : présence ou absence de végétation, humidité locale pouvant être liée par exemple à l'irrigation, texture ou rugosité, qui dépendent notamment des pratiques culturales (présence ou absence de sillons), etc. Les ensembles qui composent le niveau II constituent en revanche des unités morphologiques, ou sont associés à des différences de paysage nettement perceptibles. A cette échelle la réponse spectrale des classes intègre un grand nombre de paramètres tels que la topographie, la composition sédimentologique, la nature minéralogique, le mode de mise en valeur des surfaces qu'elle décrit, ce qui signifie que les limites sont peu variables dans le temps et qu'elles sont significatives dans le cadre d'une recherche qui vise à mettre en évidence et à individualiser des ensembles géomorphologiques.

2.2. Secteur est entre Hisar et Bhiwani

L'analyse typologique a été effectuée sur un échantillon représentatif de 2218 individus (Tabl. 24).

Tabl. 24: Caractéristiques de l'échantillon extrait de l'image Spot 204-292 du 22 mai 1986
(secteur Hisar - Bhiwani)

CANAL	MOYENNE	ECART-TYPE	MINIMA	MAXIMA
XS1	99,0	8,0	59	126
XS2	107,9	11,8	47	136
XS3	101,2	7,5	54	122

L'image 204-292 du 22 mai 1986, qui représente le secteur oriental de la région étudiée, situé entre Hisar au nord-ouest et Bhiwani au sud-est, est décomposée en trois niveaux de d'analyse :

- niveau II : 6 classes
- niveau III : 8 classes
- niveau IV : 9 classes (Tabl. 25).

Seules les classes 1 et 4 sont divisées au niveau III et seule la classe 4.1 l'est au niveau IV (Tabl. 25).

Tabl. 25 : Structure hiérarchique de l'image SPOT 204-292

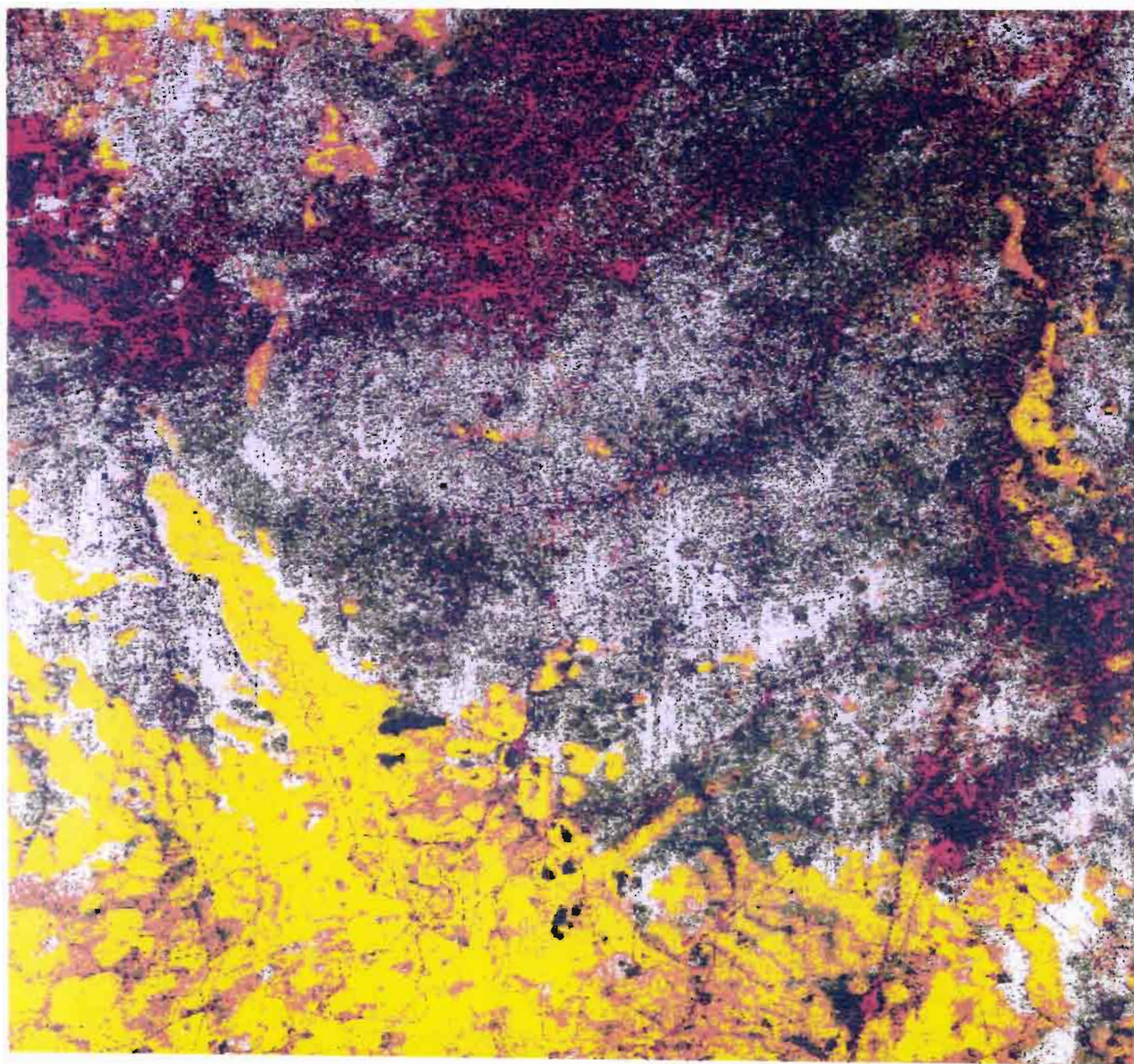
NIVEAU I	NIVEAU II	NIVEAU III	NIVEAU IV
P	1	1.1	1.1.0
		1.2	1.2.0
	2	2.0	2.0.0
	3	3.0	3.0.0
	4	4.1	4.1.1
			4.1.2
		4.2	4.2.0
	5	5.0	5.0.0
	6	6.0	6.0.0

Des plus sombres aux plus claires, les six classes qui composent le niveau II, premier niveau de la typologie issue de l'ensemble initial, s'ordonnent sur les deux premiers axes discriminants : 5, 2, 6, 3, 4, 1 (Fig. 126)

2.2.1. Classe 5 : végétation verte

Caractérisé par une luminance moyenne forte dans le proche infra-rouge (XS3) et faible dans le rouge (XS2), le comportement spectral de la classe 5, la seule dont l'indice de végétation verte soit positif, peut être associé à la présence d'un couvert végétal vert sur les surfaces qu'elle regroupe (Fig. 125 et 127). Ces dernières sont essentiellement situées le long des canaux d'irrigation et des routes, dans les villages ou autour des villes, Hisar et Bhiwani (Fig. 122 et 143) (Photos 19, 20, 21)

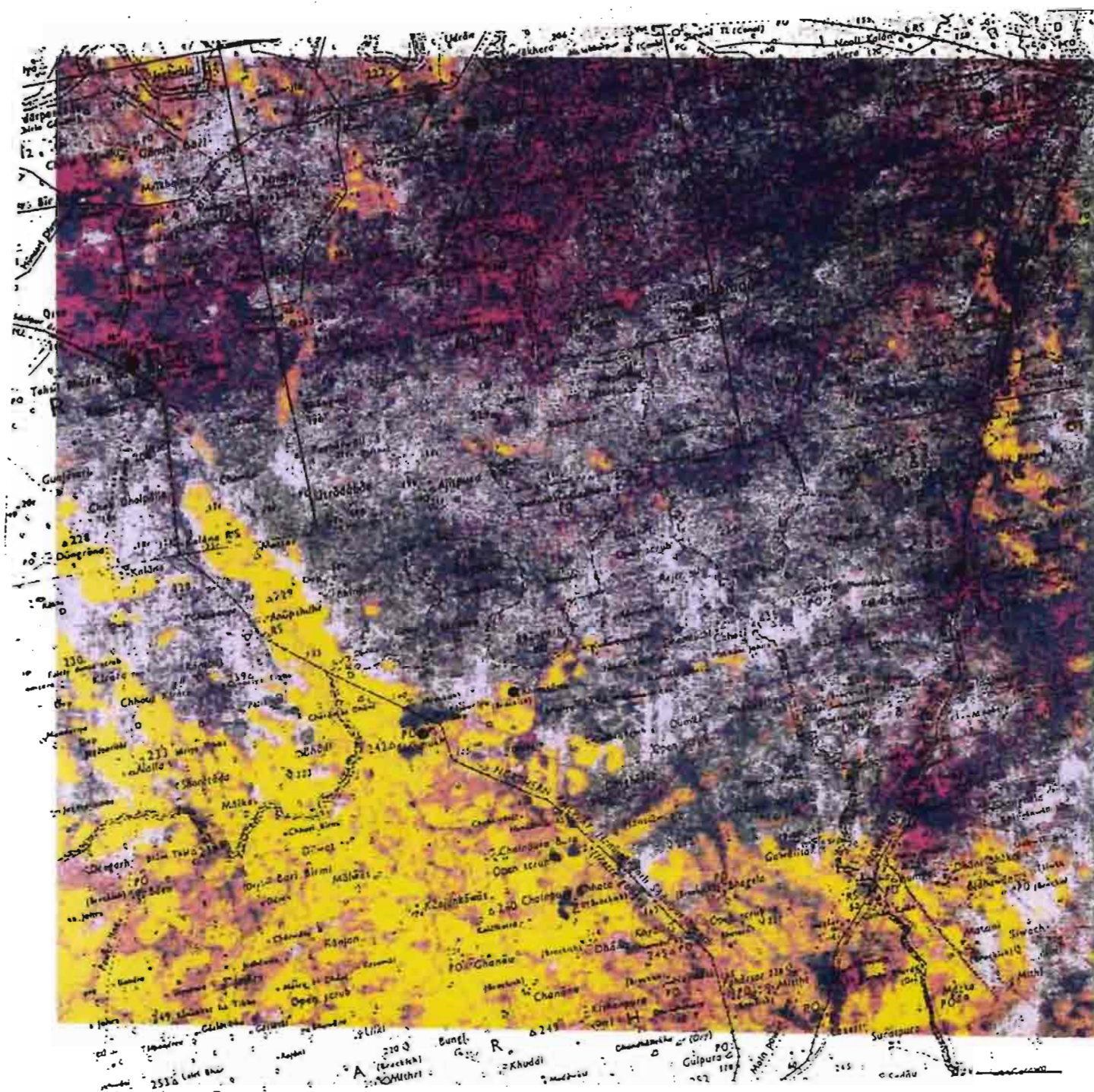




0 10 km



H : Hisar - Ha : Hansi - M : Mangali - T : Tosham - B : Bhiwani
 Fig 122 : Secteur est (Hisar - Bhiwani) - Classification, niveau II : 6 classes



0 10 km



H : Hisar - Ha : Hansi - M : Mangali - T : Tosham - B : Bhiwani
Fig 122 : Secteur est (Hisar - Bhiwani) - Classification, niveau II : 6 classes



HISAR

HANSI

Mangali

Mitthal

Tosham

BHIWANI

0 10 km



H : Hisar - Ha : Hansi - M : Mangali - T : Tosham - B : Bhiwani

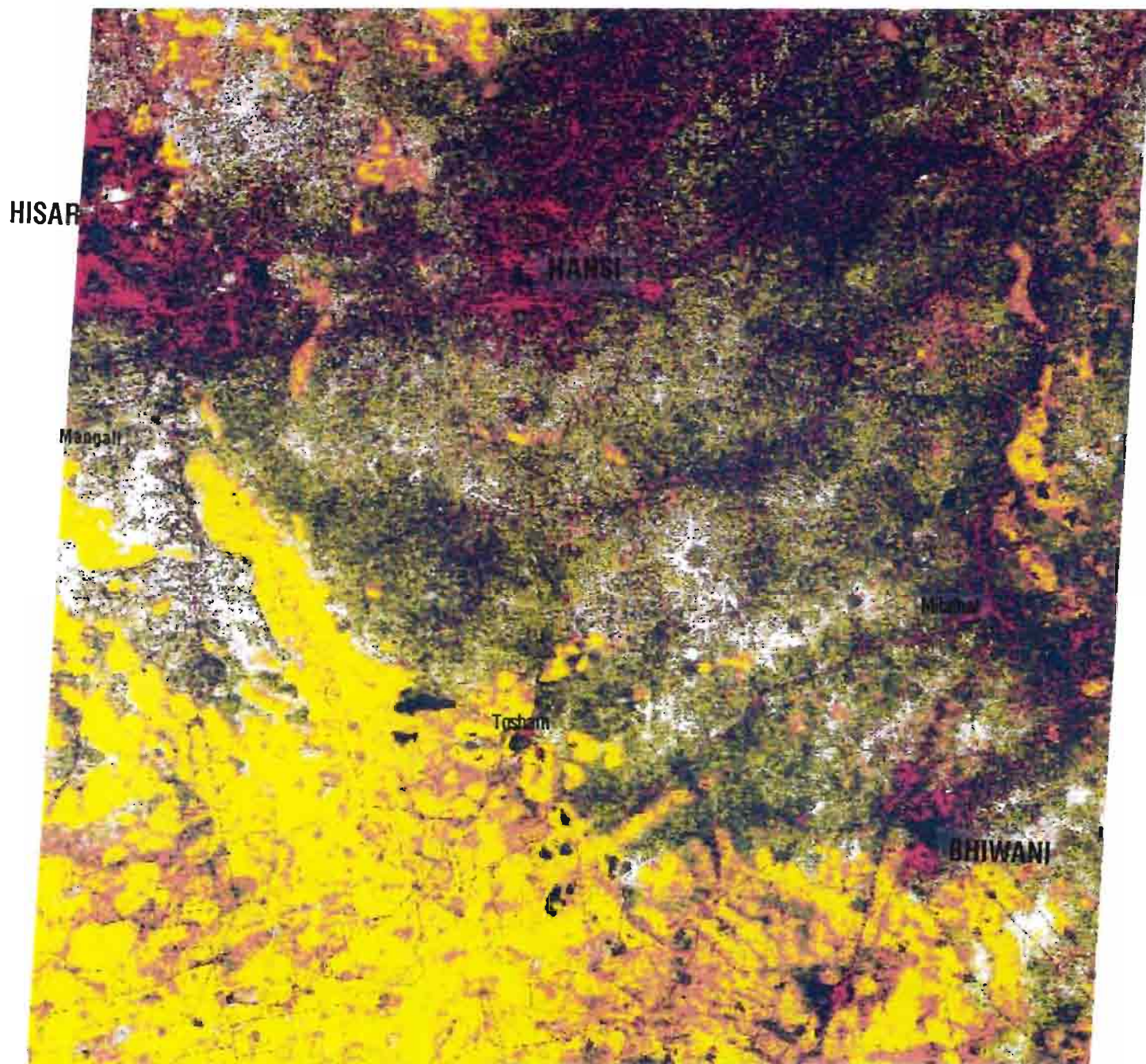
Fig 123 : Secteur est (Hisar - Bhiwani) - Classification, niveau III : 8 classes

HISAR



H : Hisar - Ha : Hansi - M : Mangali - T : Tosham - B : Bhiwani
 Fig 123 : Secteur est (Hisar - Bhiwani) - Classification, niveau III : 8 classes





0 10 km



H : Hisar - Ha : Hansi - M : Mangali - T : Tosham - B : Bhiwani
 Fig 124 : Secteur est (Hisar - Bhiwani) - Classification, niveau IV : 9 classes



H : Hisar - Ha : Hansi - M : Mangali - T : Tosham - B : Bhiwani
 Fig 124 : Secteur est (Hisar - Bhiwani) - Classification, niveau IV : 9 classes

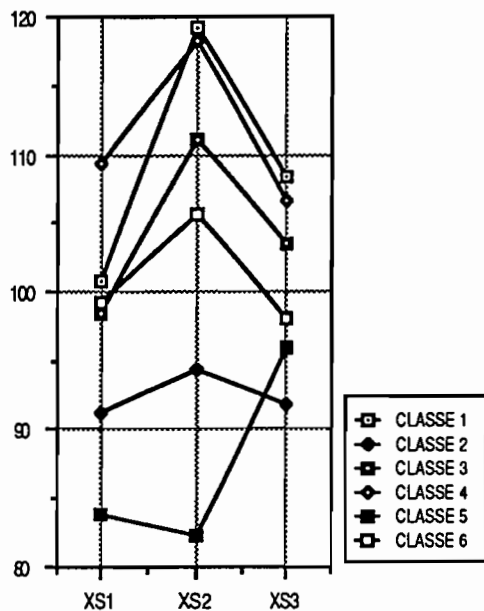


Fig. 125 : 204-292 (est) : niveau II : comportement moyen des classes dans les différentes bandes spectrales

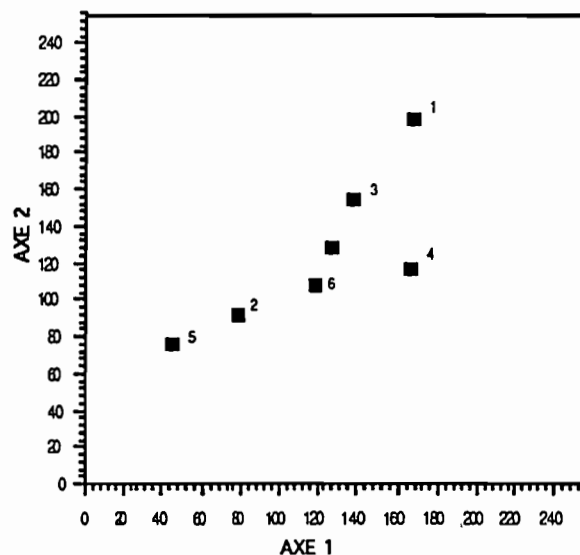


Fig. 126 : 204-292 (est) : Niveau II : coordonnées des centres de gravité des classes sur les deux premiers axes discriminants

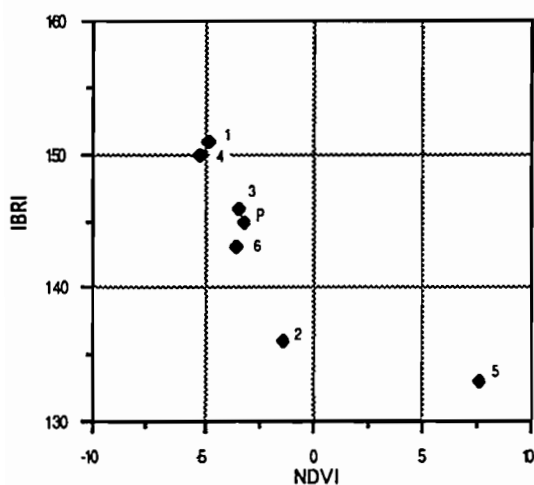


Fig.127 : 204-292 (est) : niveau II : valeurs moyennes de l'indice végétation (NDVI) et de l'indice de brillance (IBRI) calculées pour chaque classe

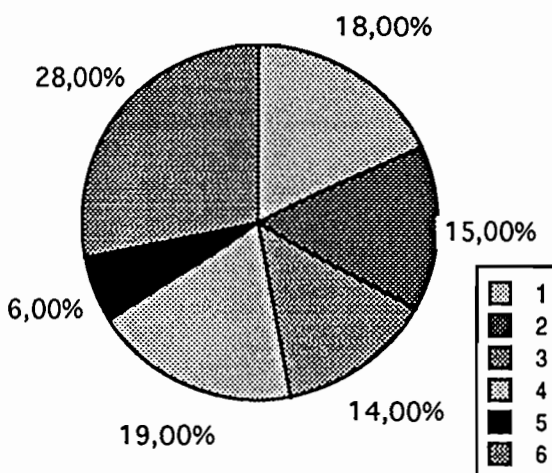


Fig. 128 : 204-292 (est) : Surfaces couvertes par les classes du niveau II

2.2.2 Classe 2: surfaces argilo-limoneuses ou humides

La végétation verte est peu représentée par la classe 2 caractérisée par une valeur de NDVI faiblement négative. Après celles décrites par l'unité 5, à laquelle elle est associée sur le plan spatial, et dont elle est la plus proche sur le plan spectral, elle représente les surfaces les plus sombres de l'image (Fig. 127) montrant une faible luminance dans les trois bandes spectrales (Fig. 125). Les tanks et autres points d'eau ou surfaces fortement humides, les sols argileux, mais aussi les deux villes Hisar et Bhiwani, les roches nues comme celles qui constituent les collines situées aux environs de Tosham -petits massifs de roches métamorphiques- composent l'essentiel de cette unité radiométrique (Fig. 140) .

2.2.3. Classe 6 : plaine argilo-limoneuse

La classe 6, qui couvre plus du quart de la surface de l'image (Fig. 128 et 141), possède des luminances moyennes plus faibles dans le proche infra-rouge que dans le rouge (Fig. 125). Ses indices de végétation et de brillance sont proches des valeurs moyennes calculées pour l'ensemble de l'image (Fig. 127). Elle caractérise des surfaces sombres et peut être humides. Situées dans l'axe des canaux d'irrigation, ces surfaces sont associées à un parcellaire régulier (Fig. 122). Les observations effectuées sur le terrain montrent que cet ensemble correspond à des sols limoneux à limono-argileux. Les villages, construits en pisé ou en briques, sont, naturellement, classés dans cette unité (photo). Elle correspond aux points les plus bas du paysage, 213 m en moyenne (Photos 22, 23).

2.2.4. la classe 4 : sols sablo-limoneux

La classe 4 (Fig. 142) rassemble les surfaces parmi les plus claires de l'image (Fig. 127). Elle comprend des sols plus sableux que ceux des deux unités précédentes et qui, au contraire de ces dernières, ne sont pas tous cultivés. Ces sols ne sont pas forcément irrigués et sont souvent affectés à la culture du *bajra* ou d'autres plantes *kharif*.

Homogènes par rapport aux autres classes du niveau II, les espaces décrits par la classe 4 se différencient au niveau III. Deux niveaux de luminance s'individualisent (Fig. 129, 131, 133). Plus sombres et associées sur le plan spatial à celles de la classe 6.0, les surfaces qui caractérisent la classe 4.2 peuvent être décrites comme représentant une transition entre les sols limoneux (classe 6.0) et les sols limono-sableux carbonatés nettement plus réfléchissants (classe 4.1). Au sol, ces différences n'ont pu être mises en évidence car la transition s'effectue sur de trop petites surfaces. En revanche, les fortes luminances qui caractérisent la classe 4.1 ont pu être expliquées par la présence de concrétions carbonatées (*kankar*) en

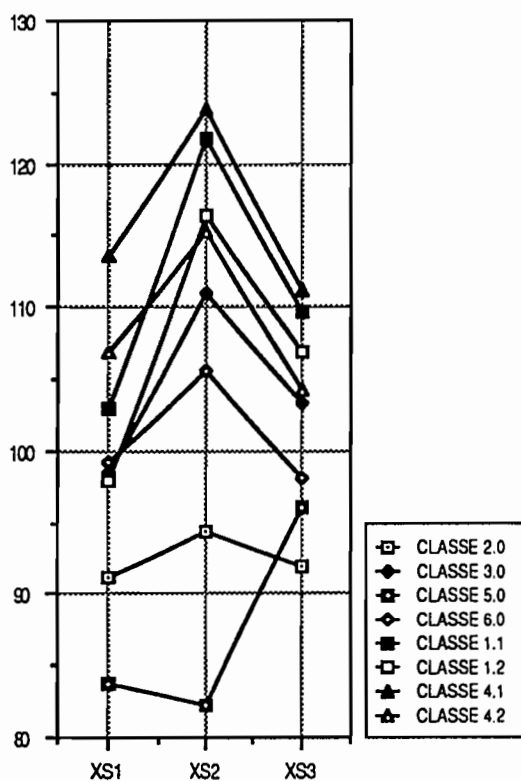


Fig. 129 : 204-292 (est) : niveau III : comportement moyen des classes dans les différentes bandes spectrales du niveau III

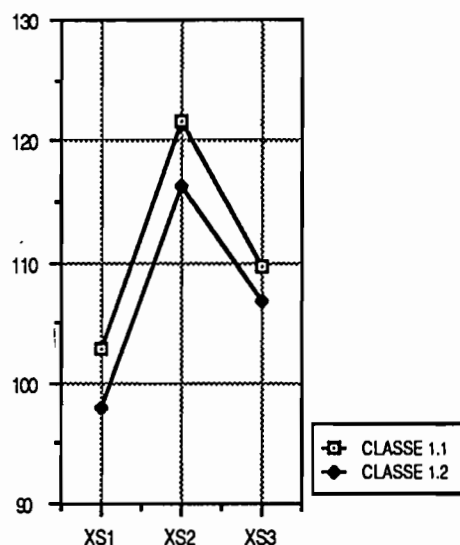


Fig. 130 : 204-292 (est) : niveau III : comportement spectral moyen des classes issues de la classe 1

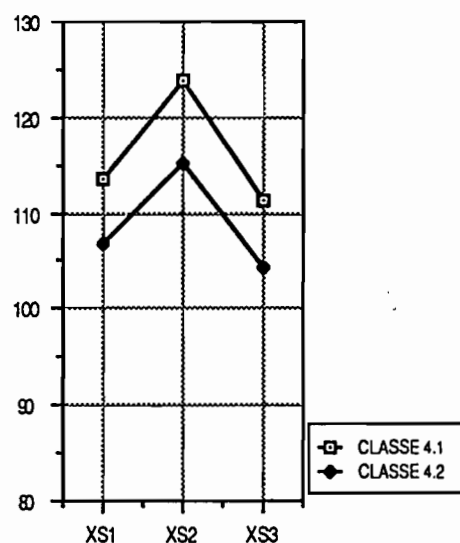


Fig. 131 : 204-292 (est) : niveau III : comportement spectral moyen des classes issues de la classe 4

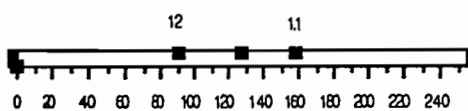


Fig. 132 : 204-292 (est) niveau III : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 1 sur l'axe discriminant

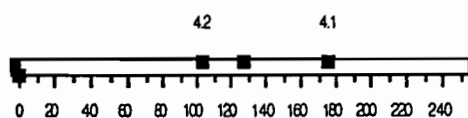


Fig. 133 : 204-292 (est) niveau III : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 4 sur l'axe discriminant

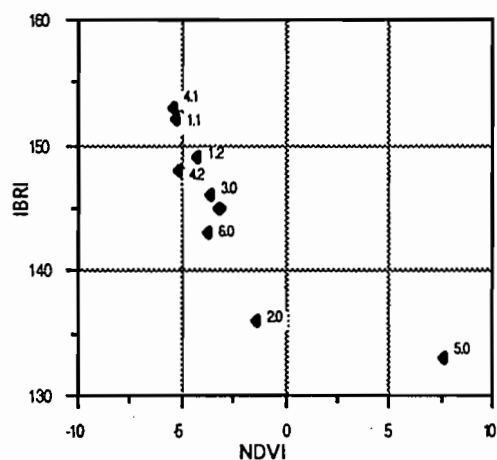


Fig. 134 : 204-292 (est) niveau III : valeurs moyennes de l'indice de végétation (NDVI) et de l'indice de brillance (IBRI)

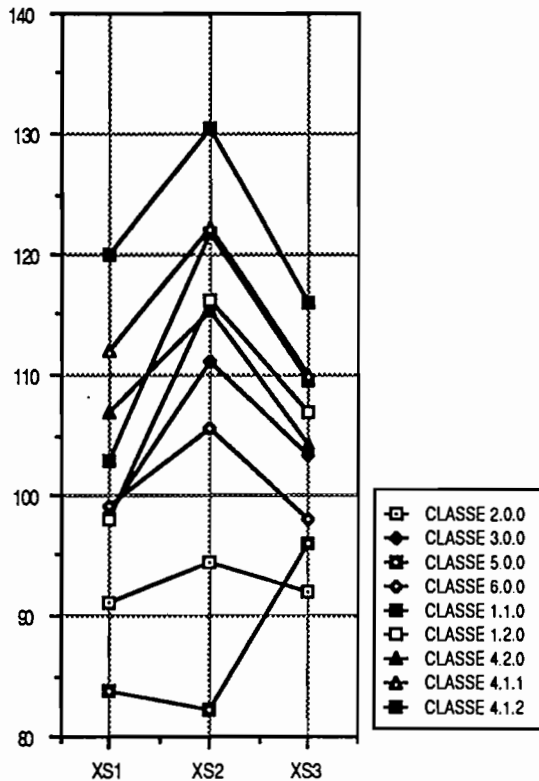


Fig. 135 : 204-292 (est) : niveau IV : comportement moyen des classes dans les différentes bandes spectrales

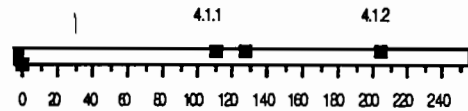


Fig. 136 : 204-292(est) niveau IV : coordonnées des classes issues de la classe 4.1 sur l'axe discriminant

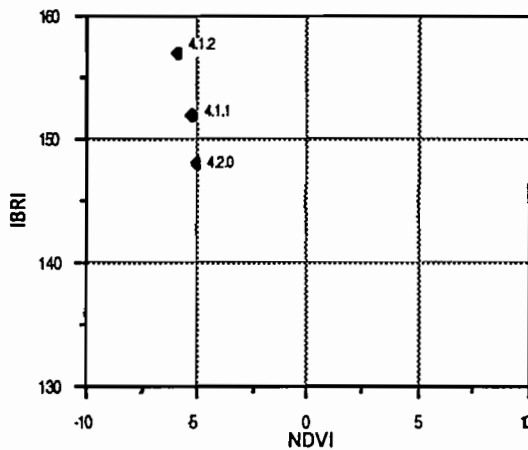


Fig. 137 : Niveau IV - classes issues de la classe 4 : valeurs moyennes de l'indice de végétation (NDVI) et de l'indice de brillance (IBRI)

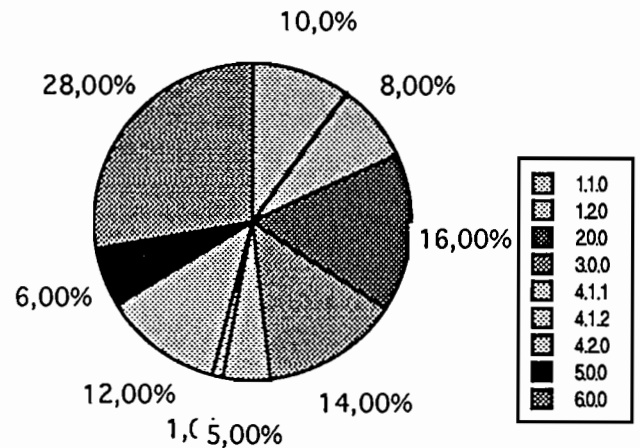


Fig. 138 : 204-292 (est) : niveau IV : surfaces couvertes par les classes du niveau IV

surface (Photos 30 à 31), *kankars* que l'on trouve également sous forme pulvérulente dans la composition de ces surfaces sablo-limoneuses à sableuses. Elles sont situées principalement au contact de l'ensemble sableux ou au coeur même de la plaine. Les différences topographiques si elles existent ne sont pas perceptibles dans le paysage entre cet ensemble et celui des surfaces argilo-limoneuses ; d'après les cartes topographiques elles semblent cependant correspondre à des points légèrement plus élevés ; l'altitude moyenne de ces

secteurs, autant que l'imprécision des cartes permette de le calculer, serait en effet de 215 m.

Au niveau IV, les deux sous-ensembles qui résultent de la partition de la classe 4.1 (Fig. 135, 136) sont la traduction de différences d'états de surface ou de concentration des carbonates. Ce niveau met en évidence la très forte luminance des surfaces regroupées dans la classe 4.1.2.

2.2.5. Classe 1

Dans la classe 1 se trouvent regroupés les pixels ayant les plus fortes luminances pour le niveau de détail considéré (Fig. 125 et 126). Située principalement au sud d'une diagonale reliant Mangali à Bhiwani (Fig. 122 et 139), cette classe caractérise les ensembles dunaires. Comme le montre la superposition des cartes topographiques à l'image classée, l'altitude moyenne de cet ensemble est de 230 m, la hauteur relative des dunes (entre 8 et 25 m) étant de 13 m en moyenne (Photos 24, 25, 26).

Au niveau III, la classe est scindée en deux sous-ensembles (Fig. 129, 130). L'un, 1.2, davantage représenté dans la partie sud-est de l'image et caractérisé par des luminances plus faibles (Fig. 126 et 128) que l'autre, a pu être identifié grâce aux cartes topographiques et à des observations effectuées au sol comme regroupant des accumulations sableuses moins élevées que celles caractérisant la classe 1.1. Ces accumulations peuvent également porter un couvert végétal arboré (*acacia*, *prosopis*, *zyzyphus*) ou buissonneux (*aerva*, *calligonum*, *agroporium*) plus dense.

2.2.6. Classe 3 : une unité sablo-limoneuse composite

La classe 3 est sur le plan spatial associée à la classe 1 puisqu'elle se trouve située au coeur de l'ensemble dunaire (au sud de l'image) ou au contact de cet ensemble et de la plaine alluviale (classes 2, 6, 4) (au nord-ouest et à l'est de l'image). Les surfaces qu'elle représente correspondent, comme l'indiquent les cartes topographiques, à de légères dépressions interdunaires planes ou ondulées, qui peuvent être irriguées et cultivées, ou à des espaces de transition entre les dunes et la plaine, plus ou moins nivelés et également mis en culture (Photos 32).

2.3. Correspondances entre les deux scènes

A partir de la surface de recouvrement qui existe entre les deux images représentant les secteurs situés à l'est et à l'ouest d'Hisar, nous avons cherché à estimer dans quelle mesure il était possible d'établir des correspondances entre les ensembles issus de la classification

des deux images. La superposition des scènes montre où se situent dans l'autre, les pixels affectés à l'une d'entre elles (Tabl. 26, 27, 28 et 29).

Tabl. 26 : Distribution des classes du niveau II de l'image 204-292 (est) dans celles du niveau II de l'image 203-292 (ouest) (%)

	204-1	204-2	204-3	204-4	204-5	204-6
203-1	79		5			
203-2				35		2
203-3		24	37	36	3	60
203-4		74	7	5	96	32
203-5	5			3		
203-6	16	2	51	21	1	6

Tabl. 27 : Distribution des classes du niveau II de l'image 203-292 (ouest) dans celles du niveau II de l'image 204-292 (est) (%)

	203-1	203-2	203-3	203-4	203-5	203-6
204-1	98	1			63	29
204-2		1	9	29		1
204-3			15	3	2	32
204-4	2	94	33	5	34	31
204-5			1	38		
204-6		4	42	25	1	7

Il apparaît ainsi que pour la surface de recouvrement (environ 17 % de l'image), aucune des classes issues de l'analyse des deux scènes ne recouvre exactement les mêmes réalités. Des correspondances peuvent cependant être établies qui loin d'être en contradiction avec les interprétations que nous avons données de chacune des classes, les confirment. Au niveau II par exemple, on remarque que les classes 203-1 et 204-1 se superposent presque entièrement. Une partie des pixels (16 %) de la classe 204-1 est cependant située dans la classe 203-6, fait qui n'est pas aberrant puisque cette unité caractérise les dépressions interdunaires sablo-limoneuses. De même, les pixels appartenant à la classe 203-3 sont dispersés dans les classes 204-6, 204-4, 204-2, et 204-3. Or nous avons vu que celles-ci correspondent à des sols limoneux à limono-argileux et à une topographie plane, caractères qui décrivent aussi la classe 203-3.

Tabl. 28 : Distribution des classes du niveau IV de l'image 204-292 (est) dans celles du niveau III de l'image 203-292 (ouest) (%)

	204-1.1.0	204-1.2.0	204-2.0.0	204-3.0.0	204-4.1.1	204-4.1.2	204-4.2.0	204-5.0.0	204-6.0.0
203-1.1	23								
203-1.2	56	66		5					
203-2.1					8	74	1		
203-2.2					40	16	10		2
203-3.0			24	37	17	4	57	3	60
203-4.0			74	7	3	2	7	96	32
203-5.1					3	3			
203-5.2									
203-5.3	4				2		1		
203-5.4	1				1				
203-6.1	5	32	2	44	2		14	1	5
203-6.2	11			7	22	1	9		1

Tabl. 29 : Distribution des classes du niveau III de l'image 204-292 (ouest) dans celles du niveau IV de l'image 203-292 (est) (%)

	203-1.1	203-1.2	203-2.1	203-2.2	203-3.0	203-4.0	203-5.1	203-5.2	203-5.3	203-5.4	203-6.1	203-6.2
204-1.1.0	99	90		1			24	96	74	75	15	39
204-1.2.0		7									6	
204-2.0.0				1	9	29					2	1
204-3.0.0	1	3		1	15	3	2		3	2	47	10
204-4.1.1			23	62	6		53		17	15	2	28
204-4.1.2			72	9			14	1		4		1
204-4.2.0			4	21	27	5	5		5	2	18	16
204-5.0.0						38						
204-6.0.0			1	6	42	25	3	3	1	1	9	5

A l'inverse, on voit également que 96 % des pixels de la classe 203-5 sont inclus dans la classe 204-4, le trait commun à ces deux unités étant la présence de carbonates dans les composants sédimentaires. Les correspondances qui peuvent être établies au niveau IV entre les sous-ensembles qui en sont issus confirment les interprétations que nous en avons donné : le trait commun aux classes 203-5.1 et 204-4.1.1 est la présence de carbonates, le trait commun aux classes 203-5.2, 203-5.3, 203-5.4 et 204-1.1.0 est une composition sableuse.

Sur la base de ces correspondances, il est donc possible de faire des typologies établies une analyse commune, et de rétablir ainsi la continuité de la région, artificiellement rompue.

2.4. Des éléments pour une reconstitution des paléo-environnements

A partir d'une description radiométrique, chorologique et morphologique des données-images, étayée par un ensemble d'informations extrinsèques fournies par les cartes topographiques ou le terrain, nous reconnaissons parmi les six classes qui composent pour l'une comme pour l'autre des deux images étudiées, le niveau II de l'analyse, deux grands ensembles géomorphologiques, l'un alluvial, l'autre éolien. Constitué essentiellement de matériaux à l'origine déposés par les eaux courantes, l'ensemble alluvial est représenté par les classes :

- 203-4, 203-3, 203-2 à l'ouest,
- 204-2, 204-6, 204-4 à l'est,

et par leurs sous-divisions aux niveaux III et IV.

L'action des vents est à l'origine des formations représentées par les unités

- 203-1 à l'ouest,
- 204-1 à l'est,

et par leurs sous-divisions au niveau III.

Ces ensembles sont stables, c'est-à-dire que tels qu'ils ont été délimités, ils constituent des entités non fonctionnelles, en ce sens que les processus qui les ont générées n'agissent plus -cas de l'ensemble alluvial- ou agissent avec une intensité beaucoup plus modérée -cas de l'ensemble éolien. Il s'agit donc de formes héritées qui témoignent d'oscillations paléoclimatiques.

Sous l'action de phénomènes naturels (vent, pluies, reptation, déplacements grain par grain) et anthropiques (intensification de l'irrigation et mise en culture d'un pourcentage de plus en plus élevé de terre) ou de leur combinaison, d'autres ensembles naissent du remaniement des organismes préexistants. Parce qu'ils sont composites, ni tout à fait éoliens, ni tout à fait alluviaux, parce qu'ils sont le plus souvent situés aux marges des ensembles stables, ils ont été qualifiés d'unités de transition. Ce sont :

- les classes 203-5 et 203-6 à l'ouest (et leurs sous-divisions au niveau III),
- la classe 204-3 à l'est.

L'ensemble alluvial couvre 37 % de la surface totale de l'image à l'ouest et 62 % à l'est. Au sein de cet espace, trois sous-ensembles morphologiques peuvent être identifiés qui sont représentatifs d'activités alluviales de type, d'intensité et certainement d'âge, différents. Nous examinerons tour à tour les traits particuliers de la plaine alluviale :

- classes 203-4, 203-3, 203-2 à l'ouest et 204-2, 204-6, 204-4 à l'est

et de deux types d'écoulement concentré :

- classes 203-2 à l'ouest et 204-4 à l'est.

2.4.1. La plaine : des écoulements en nappe

Issus du piémont (les monts Siwaliks) ou de la zone interne de l'Himalaya (il est impossible ici de décider), les écoulements qui sont à l'origine des formations limoneuses ou sablo-limoneuses à argileuses, caractéristiques des unités qui composent l'ensemble alluvial, correspondent d'après la forme des dépôts, à des écoulements en nappes. L'organisation spatiale de l'ensemble éolien (classe 203-1 et 204-1) par rapport à l'ensemble alluvial suggère que la mise en place de ce dernier s'est, dans ses traits principaux, poursuivie postérieurement. La charge alluviale se serait déposée sur une topographie où les ensembles dunaires, témoins d'une phase climatique plus aride, dominaient : les eaux, comme le montrent les dépôts qu'elles ont laissés, ont contourné certains d'entre eux et se sont étalées dans les secteurs déprimés (région sud de Mangali par exemple). Vers le sud-ouest, bloquée par les masses dunaires, l'activité alluviale a laissé des traces moins marquées : la plupart des dépressions tendent à être recouvertes par des dépôts éoliens et comblées (classe 203-6 et 204-3). Plus les obstacles à l'écoulement augmentent et moins

l'étalement est marqué. Ainsi, au sud et à l'ouest de l'image, dans le secteur occidental, les dépôts prennent une forme de couloirs interdunaires allongés.

2.4.2. A propos de la dépression de la Chautang

Dans le quart nord-ouest de l'image, de Siswal à Bhadra, entre des ensembles sableux (classes 203-1 ou 203-5) les traces d'un paléo-écoulement sont nettement visibles (Fig. 99, 100, 117). Elles peuvent être assimilées à une partie de ce qui a été considéré comme le cours asséché de la Chautang, identifiée par certains auteurs (chap. I.4) comme la Drishadwati, un affluent de la Saraswati évoquée dans les textes anciens et décrite comme une rivière de dimensions considérables originaire de l'Himalaya (Sharma, 1974). Bien que moins étudié que le paléo-cours de la Ghaggar-Saraswati, celui dit de la Chautang a fait l'objet d'interprétations diverses ayant trait à son origine, aux causes de son assèchement, et à sa dynamique. Le tracé de ce cours d'eau apparaît ainsi en pointillés ou en traits pleins dans de nombreuses publications relatives aux changements hydrographiques qu'a connus la région (Fig. 22 à 25). On le suivrait en amont de Hisar depuis les monts Siwaliks et à l'est de Bhadra. Pour certains, il rejoindrait le paléocours de la Ghaggar aux environs de Suratgarh. Notre objectif n'est pas ici d'établir si les traces du paléo-écoulement qui apparaissent sur l'image peuvent être assimilées à la Drishadwati

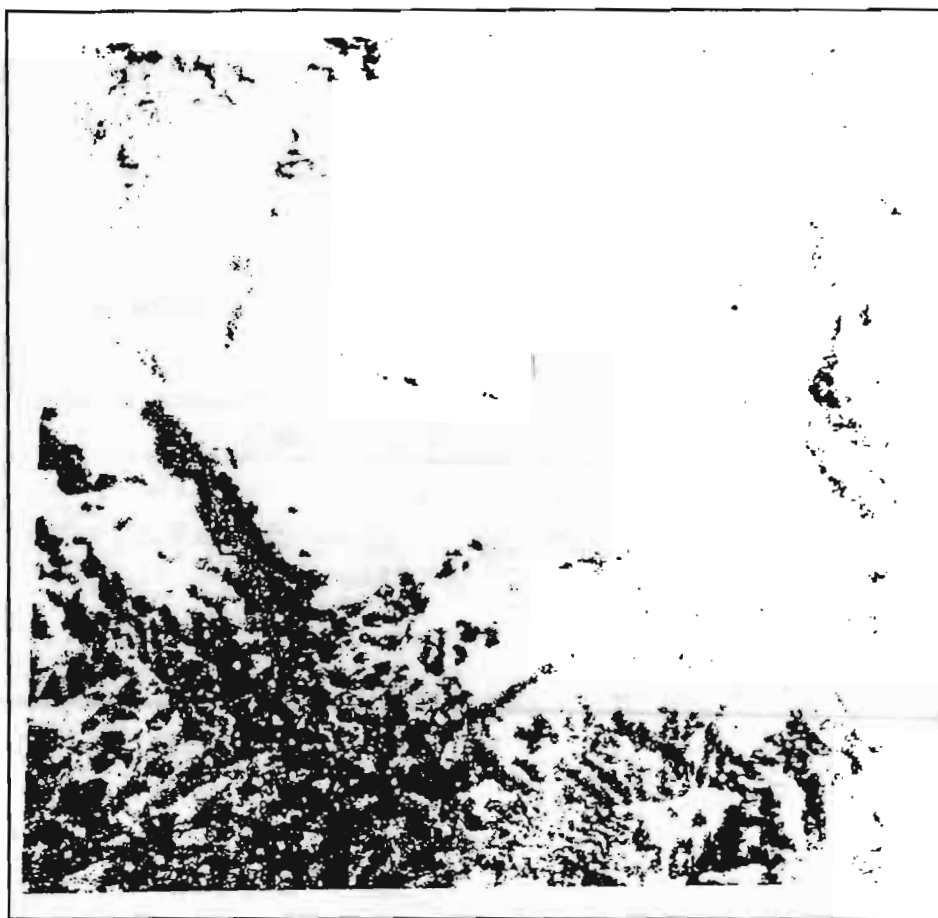


Fig. 139 : Secteur øst (Hisar - Bhiwani) - classes 1. (1 cm =5,5 km)

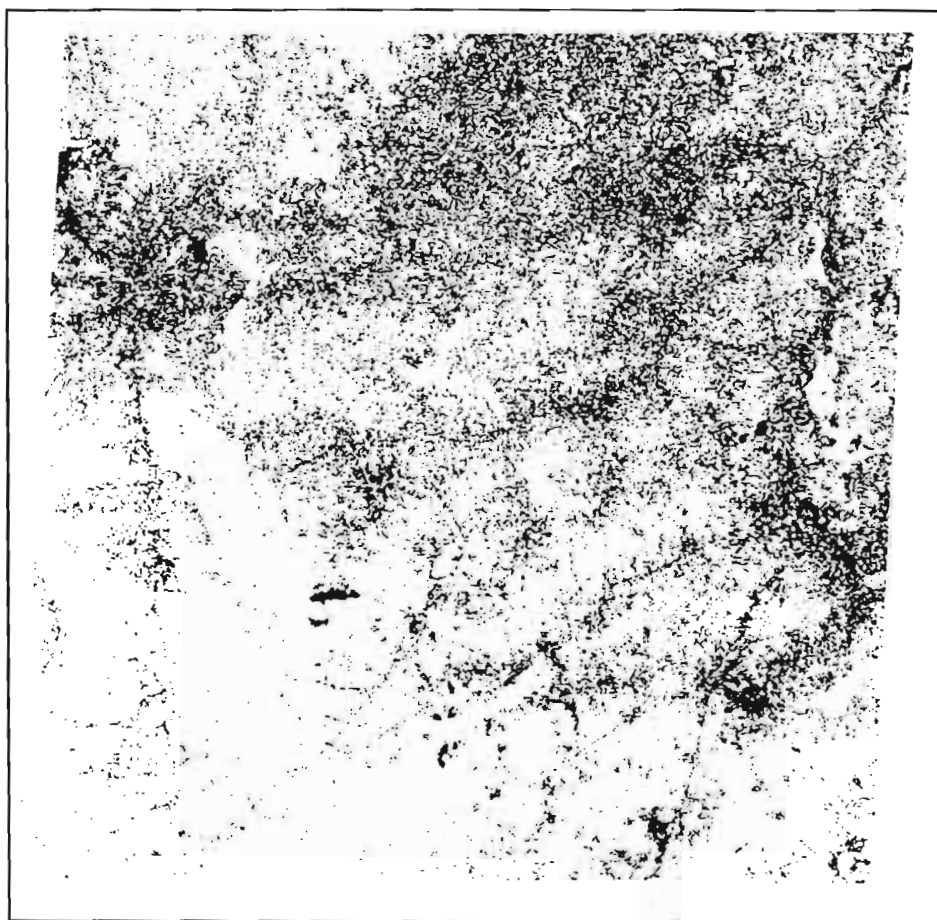


Fig. 140 : Secteur ouest (Hisar- Bhiwani) - classe 2. (1 cm =5,5 km)

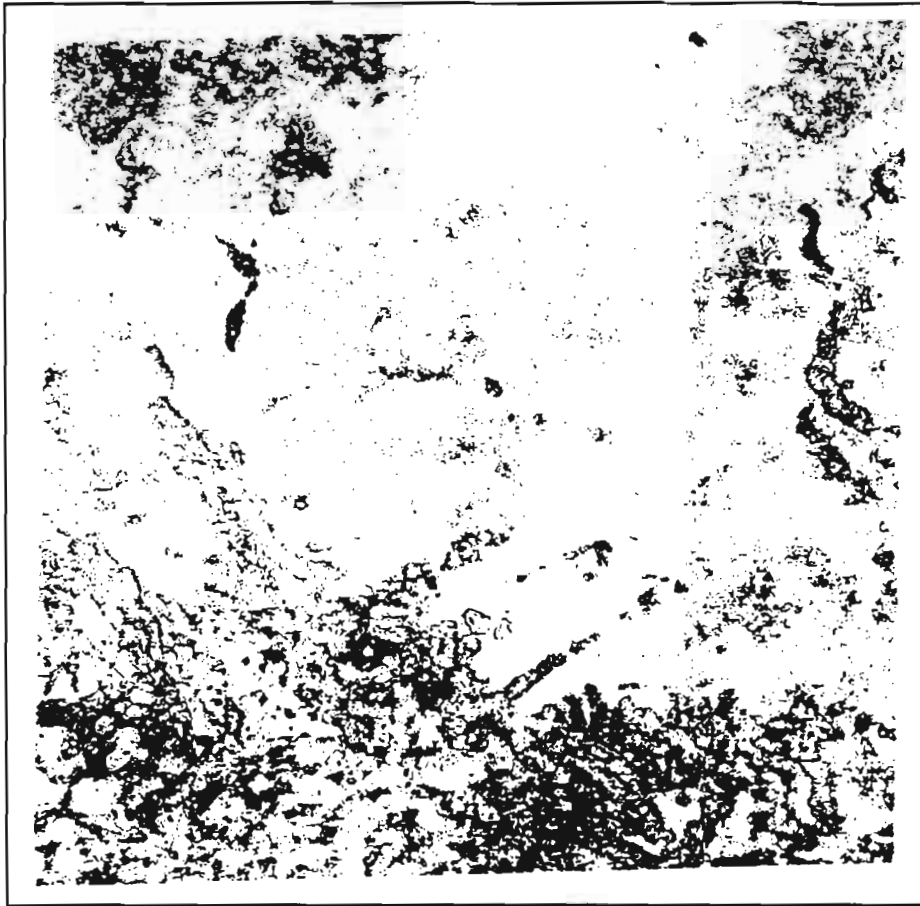


Fig. 141 : Secteur ouest (Hisar - Bhiwani) - classe 3 (1 cm =5,5 km)

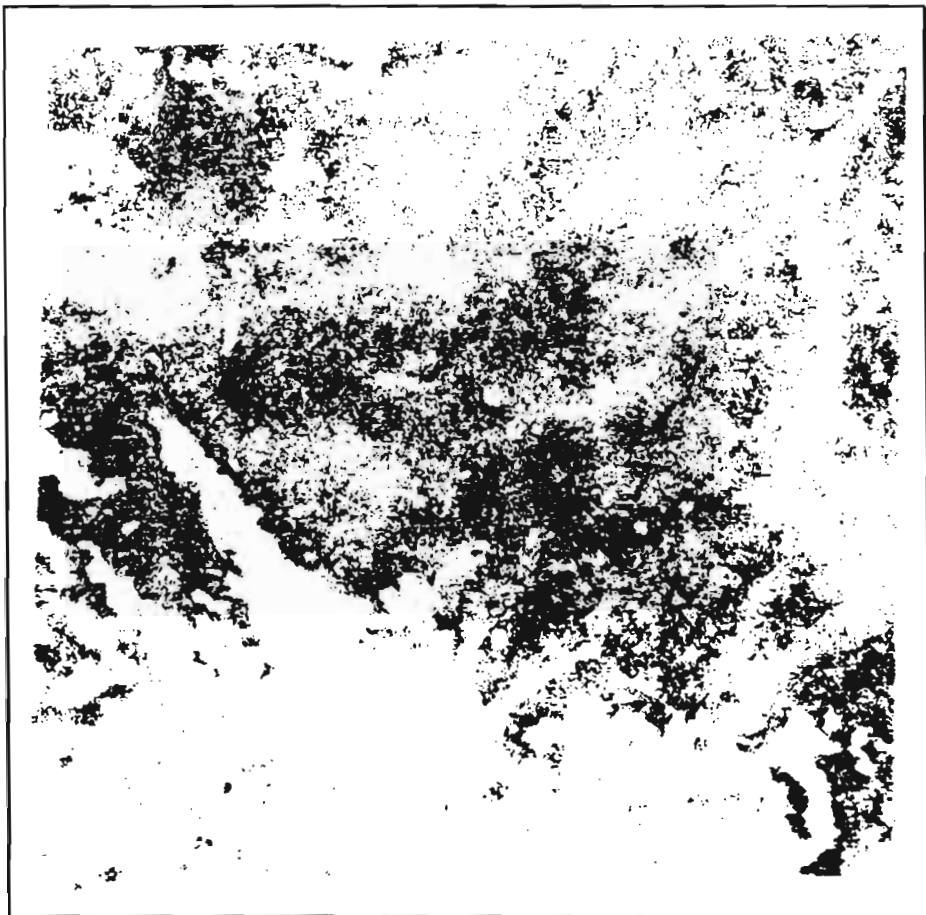


Fig. 142: Secteur ouest (Hisar - Bhiwani) - classe 4 (1 cm =5,5 km)

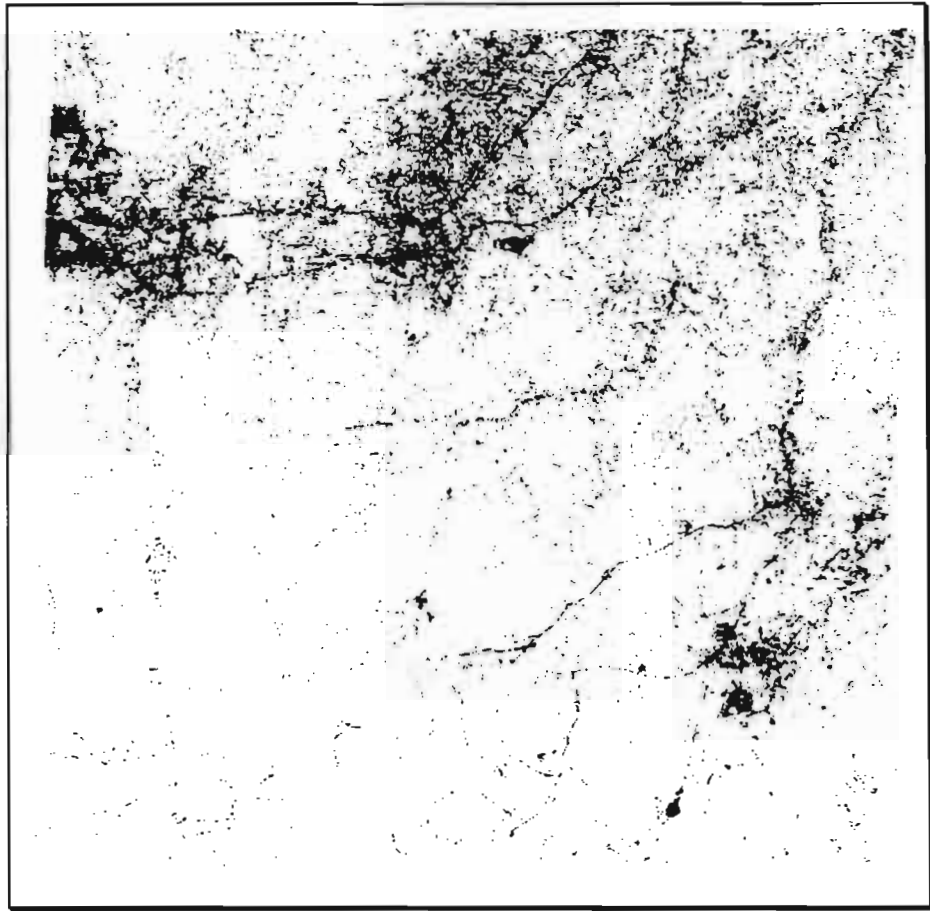


Fig. 143: Secteur ouest (Hisar- Bhiwani) - classe 5. (1 cm =5,5 km)

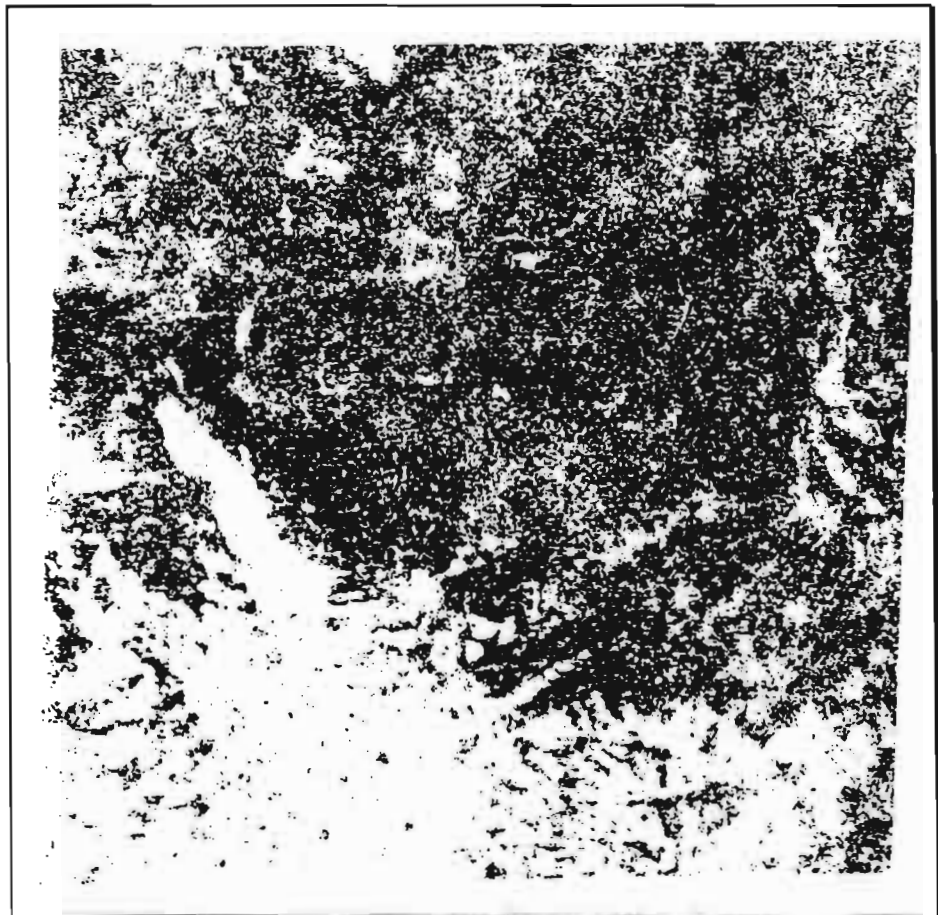


Fig. 144 : Secteur ouest (Hisar - Bhiwani) - classe 6. (1 cm =5,5 km)

mythique, mais bien plutôt de voir si entre Hisar et Bhadra, ces traces sont celles d'un cours d'eau pérenne qui aurait pu comme, cela a été proposé, alimenter en eau la région durant la période protohistorique.

Entre Hisar et Bhadra, les marques d'un écoulement concentré ne sont évidentes qu'à l'ouest de Siswal (Fig. 99). A l'est, les eaux semblent s'être étalées dans la plaine. Ces traces correspondent à une ancienne dépression aujourd'hui presque totalement comblée, dont les limites ne sont pas marquées sur les cartes topographiques, et qui est caractérisée par des dépôts carbonatés (classe 203-2). Les représentations obtenues permettent d'en suivre parfaitement le tracé sinueux, depuis Siswal jusqu'à Bhadra, du nord-est au sud-ouest, et au-delà vers l'ouest. Elle ne disparaît donc pas dans les sables avant Bhadra aux environs de Ninan comme le propose M. -A. Courty (1990, p. 104-105).

Aucune des formes mises en évidence dans ce secteur au sein de la dépression sur les images satellitaires ne peut être assimilée à un lit fluvial. Ce qui a été identifié dans le secteur de Jhansal par M.-A. Courty comme le chenal de la Chautang, "un réel chenal qui se glisse entre deux masses dunaires /.../ pour se perdre au-delà" (*ibid.*), correspond exactement, comme le prouve la superposition de l'image classée à la carte topographique de 1922, aux traces d'un canal aujourd'hui abandonné, le *Hisar Distributary* (chap. I.5), traces caractérisées au sol par une bordure d'arbres ou par des sols plus limoneux que les ensembles voisins, et que l'on distingue sur l'image classée jusqu'à Bhadra. S'il est admis que le tracé des canaux d'irrigation anciens dont le *Hisar distributary* ne serait que la dernière génération (postérieure au moins au canal construit par Firuz Shah au XIV^e siècle (Chap. I.5)) ait été placé au coeur d'une dépression naturelle, rien n'indique que ce tracé coïncide avec le lit d'une rivière.

Sans anticiper sur l'analyse de la localisation des sites archéologiques qui fera l'objet du chapitre IV, nous pouvons d'ores et déjà constater la présence de sites protohistoriques (périodes protoharappéenne et harappéenne mûre en particulier) dans la dépression délimitée :

- n° 114, 193, 194, 195, 197, dans le secteur de Jhansal,
- n° 200, Bair,
- n° 205, Bhairun-chhani,
- n° 18, Shairpura,
- n° 21, Ninan et
- n°14, Bhadra.

Ce fait indique que si l'ensemble de la dépression a pu être un jour recouverte par les eaux, cela n'était plus le cas durant la protohistoire, depuis 3500 av. J.-C. La répartition des sites montre nettement que si à cette époque la dépression était encore alimentée par un écoulement, celui-ci ne pouvait être que de faible intensité, au sein de chenaux de faible

largeur (inférieure en tout cas à celle de la dépression). Se trouve ainsi infirmée l'hypothèse selon laquelle la dépression de la Chautang témoignerait de l'existence dans la région d'un très grand cours d'eau pérenne durant la protohistoire, et par là même celle qui fait de cette dépression un ancien lit de la Yamuna.

Si, comme le confirment les analyses sédimentologiques réalisées dans ce secteur (Courty, 1990), les populations protohistoriques installées dans la dépression ont pu bénéficier d'un apport en eau naturel originaire du piémont, l'évolution qui a conduit à un tarissement, d'origine climatique, a pu affecter l'impluvium sans que la région ait nécessairement connu un processus de même ampleur.

Au sud et au sud-est de Bhadra, et au nord du groupe de vastes cuvettes interdunaires, comme celle de Sidmukh, de Bhimsana ou de Sadpura, les traces d'une dépression comparable par sa forme, ses dimensions et ses caractéristiques spectrales, à celle dite de la Chautang, sont nettement visibles. Elles s'étendent sur une quarantaine de kilomètres du nord-ouest à l'est depuis Bhadra jusqu'aux environs ouest de Siwani. Deux scénarios sont alors envisageables. Bhadra serait situé à la confluence de ces deux écoulements. L'un d'eux (la Chautang), nord-est/sud-ouest constituerait la direction principale, l'autre pourrait résulter de la concentration des écoulements à partir d'un chapelet de dépressions interdunaires et rejoindrait la direction principale à Bhadra. Autre hypothèse : Bhadra serait situé à un point de diffluence, une partie des eaux originaires du nord-ouest se déversant périodiquement dans des dépressions ou couloir interdunaires qui sous l'action d'apports en eau répétés auraient fini par constituer un chenal continu relié à son extrémité orientale à la bordure de la plaine. Les données dont nous disposons ne permettent pas de décider entre ces deux hypothèses.

L'absence de sites archéologiques au sud de Bhadra dans l'une ou l'autre de ces dépressions, à condition qu'elle corresponde effectivement à une "non-occupation" de cet espace et non aux lacunes de la prospection, pourrait indiquer qu'elles étaient moins bien alimentées en eau que l'axe principal d'écoulement (celui dit de la Chautang), sinon totalement asséchées durant la protohistoire. Cette hypothèse viendrait à l'appui de la thèse de l'installation des populations protohistoriques au sein d'ensembles morphologiques hérités de périodes antérieures et en voie de disfonctionnement.

2.4.3. Un réseau de dépressions dans la plaine

Au sud de Hisar, des dépressions aujourd'hui comblées, dont les bords sont caractérisés par des sédiments sablo-limoneux carbonatés, et le fond par des limons sableux, ont été mises en évidence au sein même de la plaine alluviale (§ III.2.1.3) et non, comme à l'ouest, en contexte dunaire. Sur les images brutes, sur les compositions colorées, et davantage encore sur les images classées, seuls quelques tronçons de couloirs sinueux sont visibles. Au sud-est

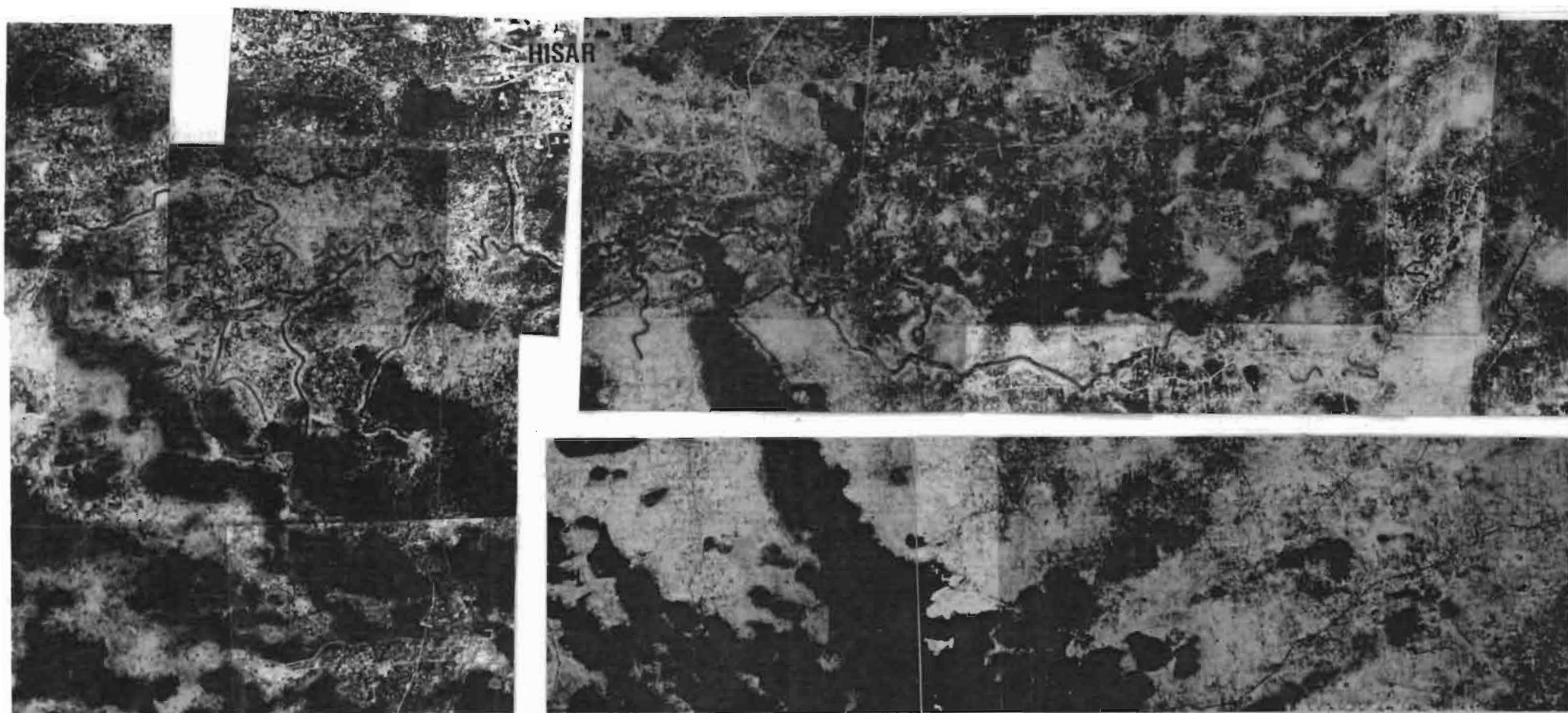


Fig. 145 image de la troisième composante principale - l'ensemble du réseau de paléochenaux mis en évidence dans la plaine de Hisar (203-292 et 204-292)



Fig. 146 : secteur ouest (203-292) - image de la troisième composante principale
Réseau de paléochenaux dans la plaine

0 10 km



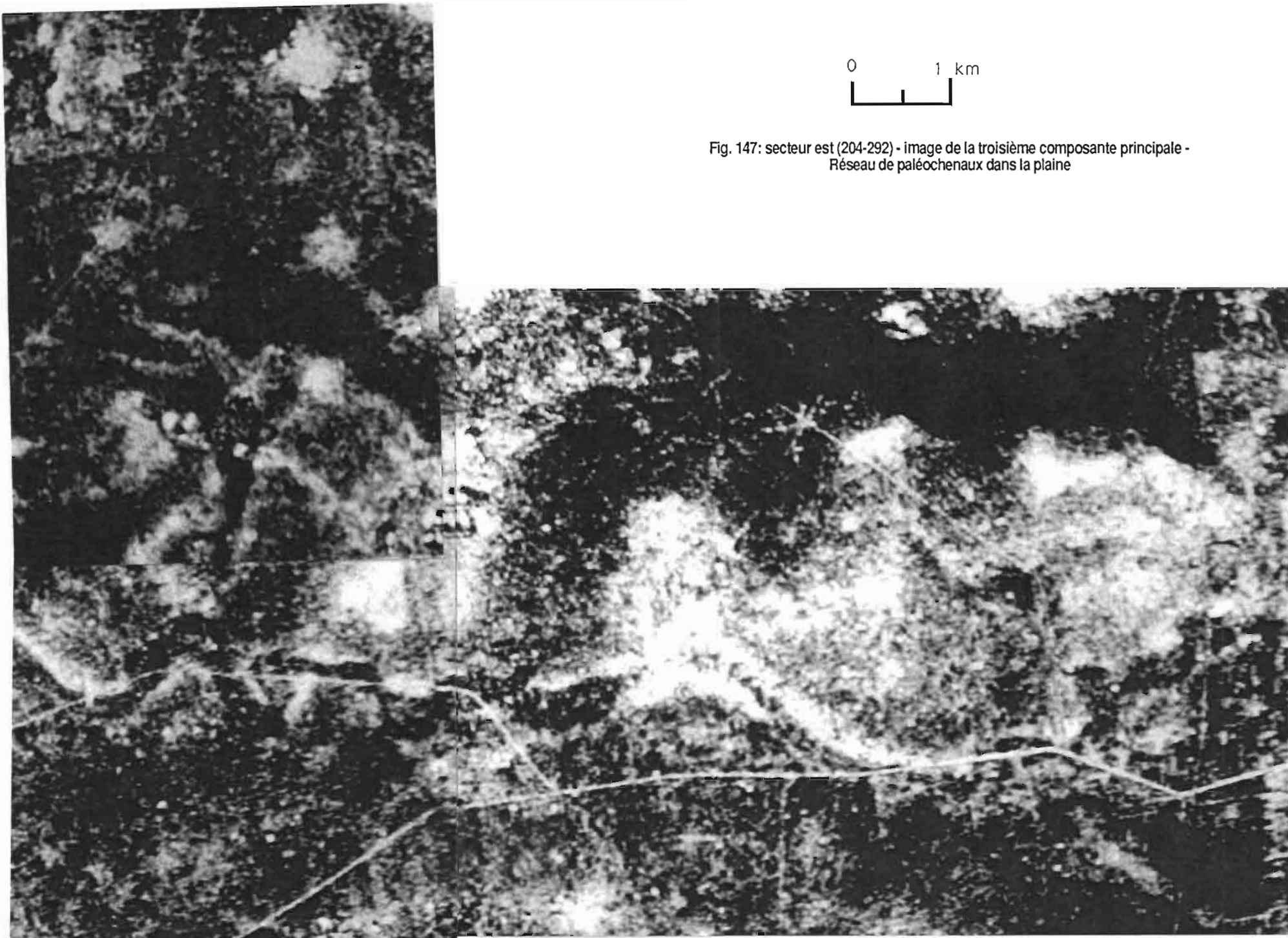
Mangali

N



0 1 km

Fig. 147: secteur est (204-292) - image de la troisième composante principale -
Réseau de paléochenaux dans la plaine



de Hisar, la classe 204-4 caractérise aussi des dépôts sédimentaires carbonatés, mais ceux-ci ne présentent pas de caractères morphologiques particuliers. Une analyse en composantes principales effectuée sur l'ensemble des trois canaux a permis de mettre en évidence, sur la troisième composante, un véritable réseau hydrographique (au sens littéral du terme). Les tronçons déjà visibles à l'ouest ont pu être reliés entre eux et leur continuité rétablie (Fig. 146). A l'est de Hisar, l'application de la même analyse, a permis la découverte d'un chenal qui n'était pas même soupçonné et qui prolonge vers l'est, sur environ 45 km les linéaments repérés au sud-ouest de la ville (Fig. 147).

Le réseau dans son ensemble (Fig. 145) est composé d'un chenal orienté est-ouest d'environ 75 km de longueur, sinueux sinon méandrique, les deux extrémités étant distantes de 60 km (indice de sinuosité = 1,25). La sinuosité de ce chenal et surtout l'examen de ses traits morphologiques, méandres et méandres recoupés (Fig. 147) attestent son caractère naturel. Ces formes n'ont pu être repérées au sol. Seule la présence de *kankars* en surface sur leurs bords a pu être mise en évidence (Photos 28, 29, 30, 31). Dans le schéma classique des différents modèles fluviaux (Fig. 148) proposé par Schumm (1981), ce chenal correspondrait aux types 3b et 4, où la largeur du lit à méandres est importante, la stabilité médiocre, l'ampleur de la charge sédimentaire en suspension encore forte.

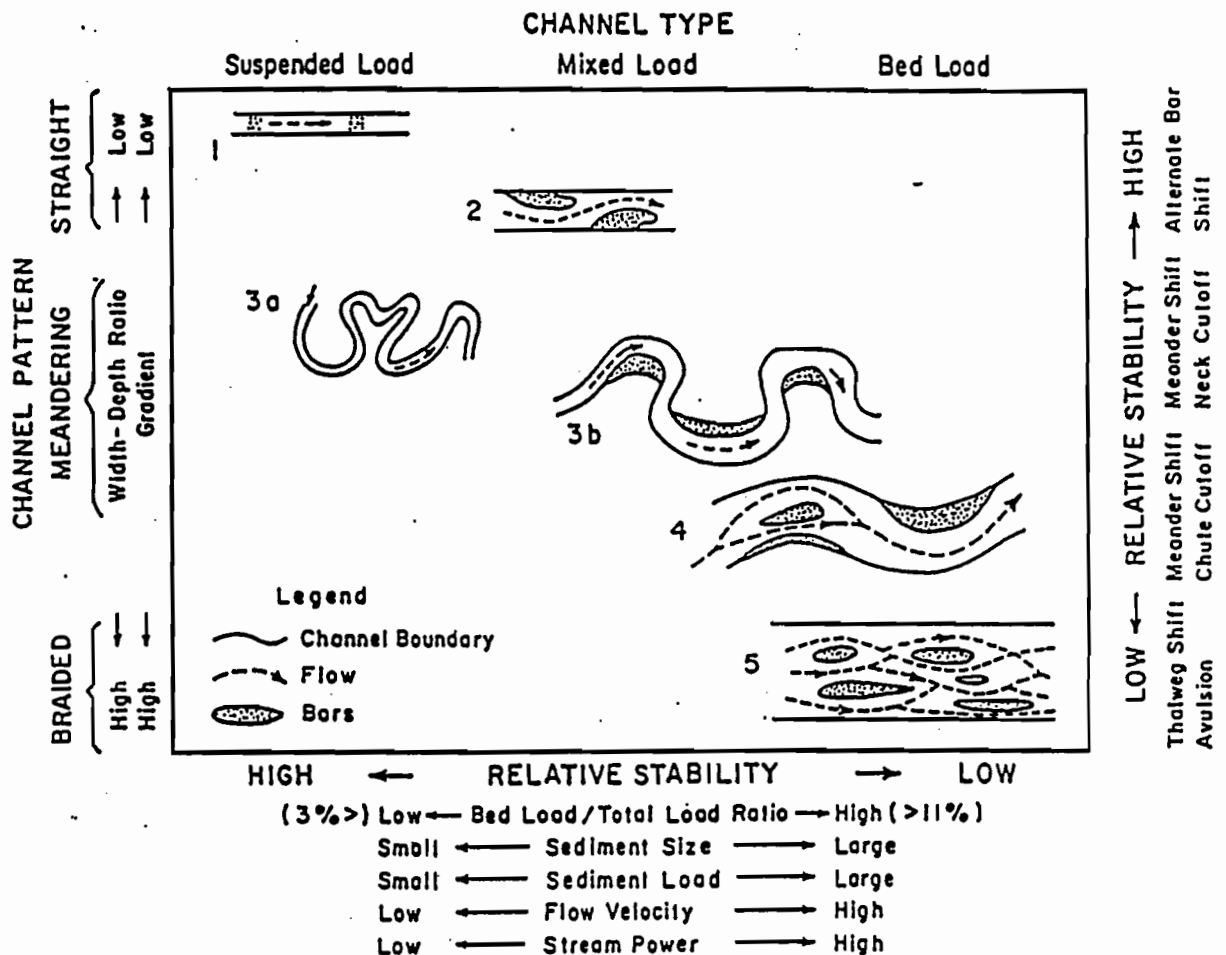


Fig. 148: Les modèles fluviaux (Schumm, 1981)

L'origine de cet écoulement pourrait être située au nord-ouest ou au nord, où des tronçons de linéaments comparables à celui-ci sont repérables sur des scènes Landsat RBV de la région. La direction de l'écoulement serait dans ce cas est-ouest. Mais aucune continuité n'a pu être établie entre ces éléments et le réseau mis en évidence au sud et à l'ouest d'Hisar. Si l'origine de l'écoulement reste donc incertaine, on voit en revanche nettement qu'il se perd à l'ouest et au sud au contact des dunes. Perpendiculairement à cet axe de drainage se greffent des chenaux de même largeur, orientés nord-sud ou nord-ouest/sud-est. Au sud-est de Hisar, on en dénombre trois principaux, parallèles les uns aux autres, d'une longueur de 20 à 25 km. Au sud-est de Hisar, des traces de paléocélements de même direction sont repérables autour et au sud de Mangali (Fig. 147), le long du massif dunaire situé à l'est du village en direction de Tosham. D'autres traces sont visibles dans le secteur de Mitathal, qui n'ont pu être reliées à un axe principal. La question du sens de ces écoulements : confluent-ils vers l'axe est-ouest ou diffluent-ils à partir de cet axe ? n'a pu être résolue.

Plusieurs tranchées ont été effectuées au fond et sur les bords de l'un de ces chenaux au cours de la campagne de 1988, en un des rares secteurs où ils pouvaient être repérés sur le terrain, aux environs de Gorchi (Fig. 146). La présence de tessons de poterie dans les dépôts tendrait à montrer qu'ils ont été utilisés par l'homme et peut être remaniés. La forme plus rectiligne de certains éléments du réseau notamment celui, nord-sud, qui "relie" Hisar au chenal principal (Fig. 146) tend à confirmer cette hypothèse. Mais il est impossible de dire *dans quelle mesure* ces chenaux qui peuvent être partiellement artificiels, empruntent des couloirs naturels. Deux problèmes se posent, comme pour le cas des dépressions et chenaux repérés en environnement dunaire, celui de la datation des formes et de l'écoulement qui leur est associé : pendant quelle durée et à jusqu'à quelle époque ce réseau était-il fonctionnel ? Là aussi, l'examen des critères morphologiques n'apporte pas de réponses absolues. On peut cependant dire qu'ils correspondent à un écoulement plus ou moins bien organisé dont la mise en place s'est poursuivie postérieurement à l'édification de la plaine alluviale ; écoulement tributaire de larges dépressions interdunaires situées dans la partie ouest de l'image 203-292. La largeur et la forme des chenaux s'accorderaient avec la réduction d'un débit qui pourrait correspondre (mais ce n'est qu'une hypothèse) à la fin d'une phase alluviale.

3. CONCLUSION

La méthode qui a été utilisée pour rechercher un niveau d'échelle pertinent pour la mise en évidence d'unités spatiales pérennes et évoluant sur des périodes longues, s'est révélée parfaitement efficace, tant pour l'exploration de la région désertique du Cholistan que pour celle, intensément cultivée, de la Chautang. La décomposition automatique de l'espace en différents niveaux d'échelle emboîtés a permis de choisir au sein d'un ensemble

de représentations, créées par le recours à des critères statistiques, celle qui après interprétation, fournissait le plus d'information par rapport à nos interrogations.

Dans les deux régions d'étude, il a été possible d'accéder, à travers une image du présent, à des faits et à des événements appartenant au passé, ce, par l'intermédiaire d'indicateurs morphologiques. La plaine d'épandage de la Hakra, dont on ne possédait jusqu'alors aucune représentation globale, la dépression de la Chautang, dont on ne discernait pas nettement le tracé, le réseau de chenaux, découvert sur les images brutes et mis en évidence sur les images de la troisième composante principale, sont les indicateurs d'épisodes paléoclimatiques.

Des "milieux" que nous avons considérés comme significatifs ayant été délimités, la localisation des sites archéologiques peut être étudiée.



Chapitre IV

OCCUPATION HUMAINE ANCIENNE ET PALEOENVIRONNEMENTS

1. L'OCCUPATION HUMAINE ANCIENNE DANS LA PLAINE DE LA CHAUTANG ENTRE BHADRA ET BHIWANI

Les sites archéologiques sont considérés comme un ensemble composé d'éléments dont la caractéristique commune est qu'il s'agit de formes mortes ayant cessé de remplir la fonction pour laquelle elles ont été créées. 11047 pixels représentent les 162 sites étudiés (93 entre Bhadra et Hisar -image ouest 203-292- et 69 entre Hisar et Bhiwani -image est 204-292). Toutes les unités reconnues précédemment comme significatives ont été habitées (Fig. 149, tabl. 30) mais les surfaces occupées au sein de chacune de ces unités ne sont pas proportionnelles à leur étendue.

Tabl. 30 : Nombre de pixels-sites correspondant à chacun des types d'environnement retenus à l'ouest (203-292) et à l'est (204-292)

1	2	3	4	5	6	T
84	1849	1662	401	512	914	5422

1	2	3	4.1	4.2	5	6	T
49	742	226	1111	1387	198	2272	5985

Tabl. 31: Surfaces couvertes par les différentes classes du niveau II de l'image ouest (203-292) en pourcentage du nombre total de pixels

1	2	3	4	5	6
27	9	24	4	17	19

1	2	3	4.1	4.2	5	6
15	28	12	6	10	6	23

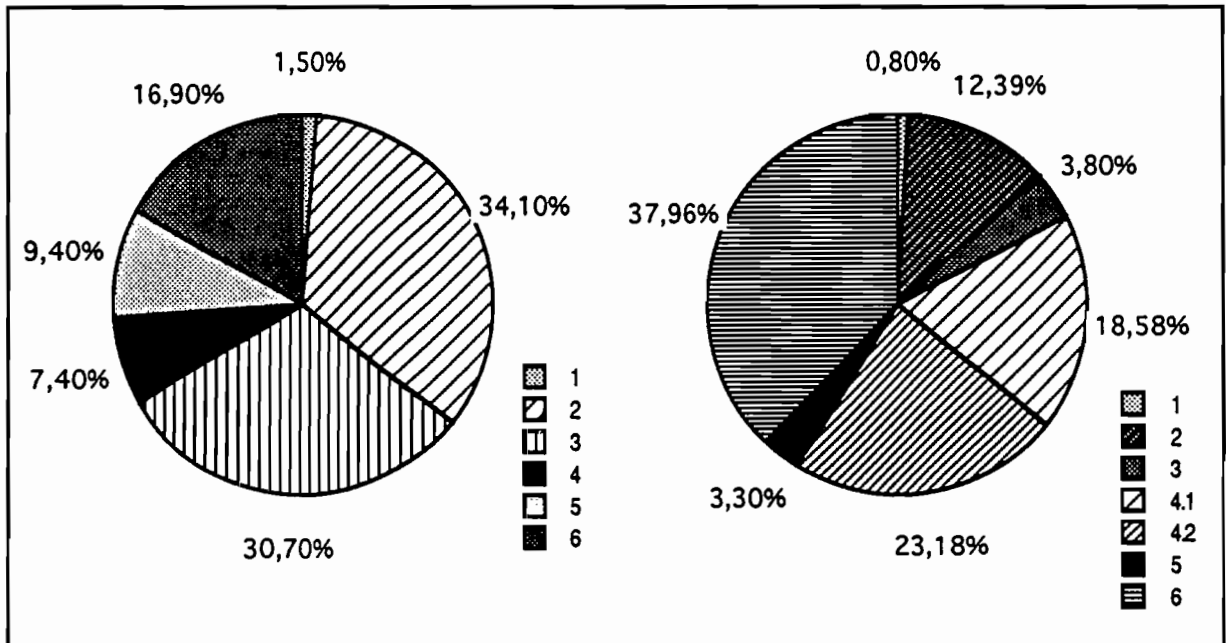


Fig. 149 : Distribution (%) par type d'environnement de l'ensemble des pixels-sites à l'ouest (203-292) et à l'est (204-292)

Tabl. 32 : Distribution des pixels sites dans chacune des unités retenues pour le secteur ouest (203-292)

	1	2	3	4	5	6	T
PH	0	319	480	114	4	75	992
H	0	527	316	54	3	113	1013
LH	0	209	268	75	3	57	612
PGW	0	0	0	0	0	0	0
NBPW	0	0	0	0	0	0	0
K	1	261	72	27	9	110	480
RM	81	1571	1336	240	429	681	4338
EMA	45	1032	908	131	403	394	2913
LMA	45	1064	811	127	348	465	2860

Tabl. 33: Distribution des pixels sites dans chacune des unités retenues pour le secteur est (204-292)

	1	2	3	4.1	4.2	5	6	T
PH	47	169	177	344	395	49	569	1750
H	47	234	30	176	369	46	542	1444
LH	0	308	26	312	438	59	740	1883
PGW	0	40	0	85	126	19	86	356
NBPW	0	5	0	3	17	0	25	50
K	46	124	20	35	155	47	382	809
RM	48	557	71	1018	1031	157	1573	4455
EMA	1	162	30	231	380	65	832	1701
LMA	1	238	11	659	548	73	906	2436

1.1. Des sites dans la plaine

Entre Bhadra et Hisar, c'est sur l'ensemble alluvial (Fig. 99), c'est-à-dire la plaine et les dépressions, soit 37 % de la surface de l'image, que se trouvent 72 % des pixels-sites (Fig. 149). Entre Hisar et Bhiwani, c'est 95,5 % des surfaces couvertes par des vestiges d'habitat ancien qui sont situés dans la plaine (Fig. 122 et 149), cette dernière représentant il est vrai 73 % de la surface totale de l'image (Tabl.31).

Agrawal (1979), Bhan (1973, 1975), Dikshit (1977, 1979a, 1979b), Ghosh (1952), Indras (1968), Misra (1977), Pande (1977), et Stein (1942), entre autres, ont écrit que le peuplement de la région, en particulier à l'époque harappéenne, était riverain de grands cours d'eau aujourd'hui asséchés, la Ghaggar-Hakra et la Chautang. Or, les cartes de répartition des sites (Fig. 159 à 167) montrent nettement que l'occupation a, pour le secteur considéré et quelle que soit l'époque, largement débordé les environs de la dépression de la Chautang. Durant les périodes harappéenne, P.G.W. et kushane, les sites sont d'ailleurs (dans le cadre spatial de notre étude), plus nombreux au sud-est de Hisar qu'à l'ouest, où le paléo-cours a été mis en évidence (Fig. 159 à 164).

Si l'on considère l'ensemble des pixels-sites sans distinction temporelle, il apparaît qu'à l'est comme à l'ouest les habitants de la région ont en règle générale choisi les secteurs déprimés comme celui de la Chautang, et dans la plaine, les bords de chenaux d'écoulement "concentré", pour implanter leurs habitations (unités 2-203, 6-204, 2-204 et 4.1.-204).

1.1.1. L'occupation harappéenne

1.1.1.1. Les sites dans la dépression de la Chautang

C'est dans la dépression de la Chautang (Fig. 178 à 181) que se trouvent douze des treize sites protohistoriques (dont la datation est certaine) retrouvés à l'ouest de Hisar. La phase harappéenne mûre est marquée par la création du site de Bhadra dans un secteur plus aval de la dépression, inoccupé au cours des phases précédentes (Fig. 160 et 179). La période harappéenne tardive est caractérisée par une diminution générale du nombre de sites : seul le secteur de Jhansal (Fig. 180) est toujours occupé, et un nouveau site (n° 209, Muhabbatpur Kilan) apparaît au nord (mais sa datation est incertaine) (Fig. 161 et 180).

Dans ce secteur, la phase harappéenne est faiblement représentée. Même si l'assèchement partiel de la Chautang au III^e millénaire n'avait été prouvé par l'étude sédimentologique et pédologique (Courty, 1990), la simple observation de la répartition des sites et de leur localisation permettait d'en émettre l'hypothèse. En effet, si la Chautang avait été la grande rivière pérenne comme certains l'ont écrit (cf. I.4), n'aurait-elle pas attiré sur ses rives ou dans ses environs davantage de villages ? Quoi qu'il en soit, la présence des sites dans la dépression tend à prouver que cette dernière n'a pas pu être inondée totalement, abondamment et de façon pérenne, comme cela a été proposé. L'existence d'un écoulement saisonnier n'est pas à écarter (Courty, 1990). Le faible nombre de sites va aussi à l'encontre de l'hypothèse (Francfort, 1985) selon laquelle les populations protoharappéennes et harappéennes auraient construit un réseau d'irrigation reliant la Yamuna au secteur étudié. L'effort occasionné par une telle entreprise ne paraît pas en rapport avec l'occupation de ce secteur.

Comme nous l'avons suggéré au chapitre I, étant donné le nombre des sites et les conditions climatiques (proches des conditions actuelles), il n'est pas nécessaire d'envisager des hypothèses mettant en cause des facteurs exceptionnels, naturels ou anthropiques, pour expliquer l'occupation de ce secteur. Qu'il y ait eu ou non un écoulement saisonnier dans la dépression de la Chautang durant la période protohistorique, cette dépression constituait de toute façon un secteur favorable aux implantations humaines car, comme le sont actuellement les dépressions interdunaires situées au sud de la Chautang, c'est un secteur où

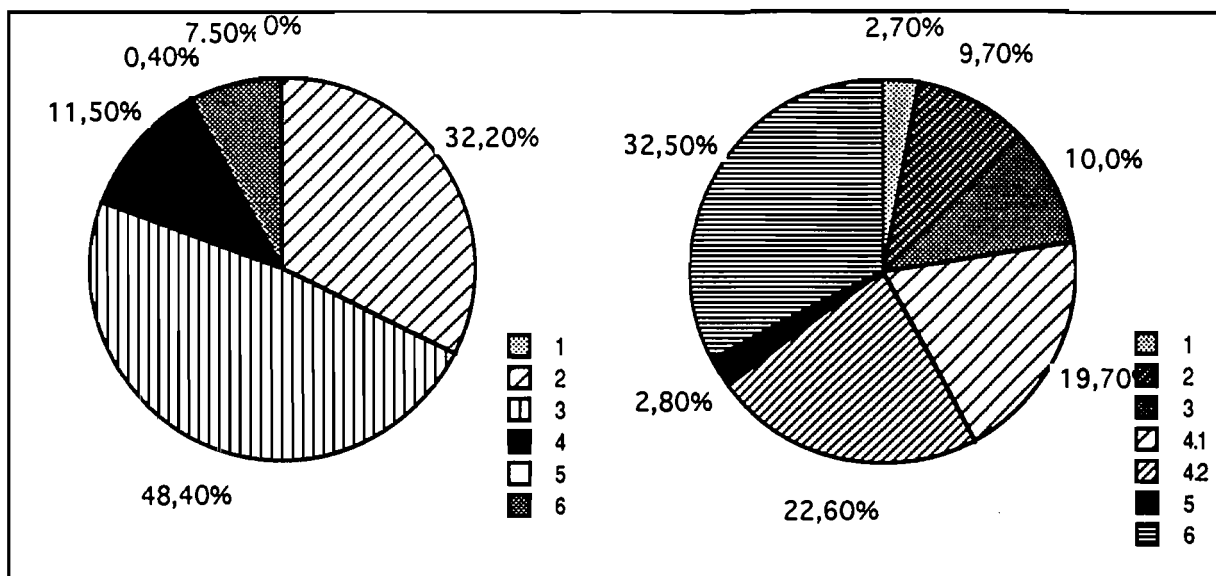


Fig. 150 : Distribution (%) par type d'environnement des pixels-sites protoharappéens (ca. 3000-2500 av. J.-C.)

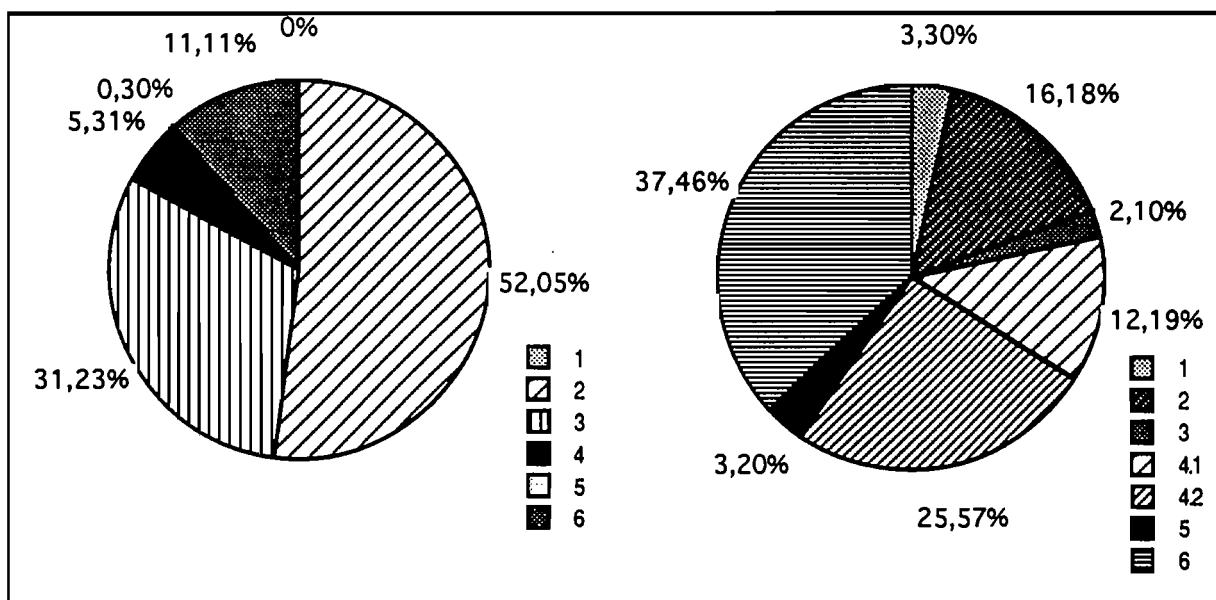


Fig. 151 : Distribution (%) par type d'environnement des pixels-sites harappéens mûrs (ca. 2500-1800 av. J.-C.)

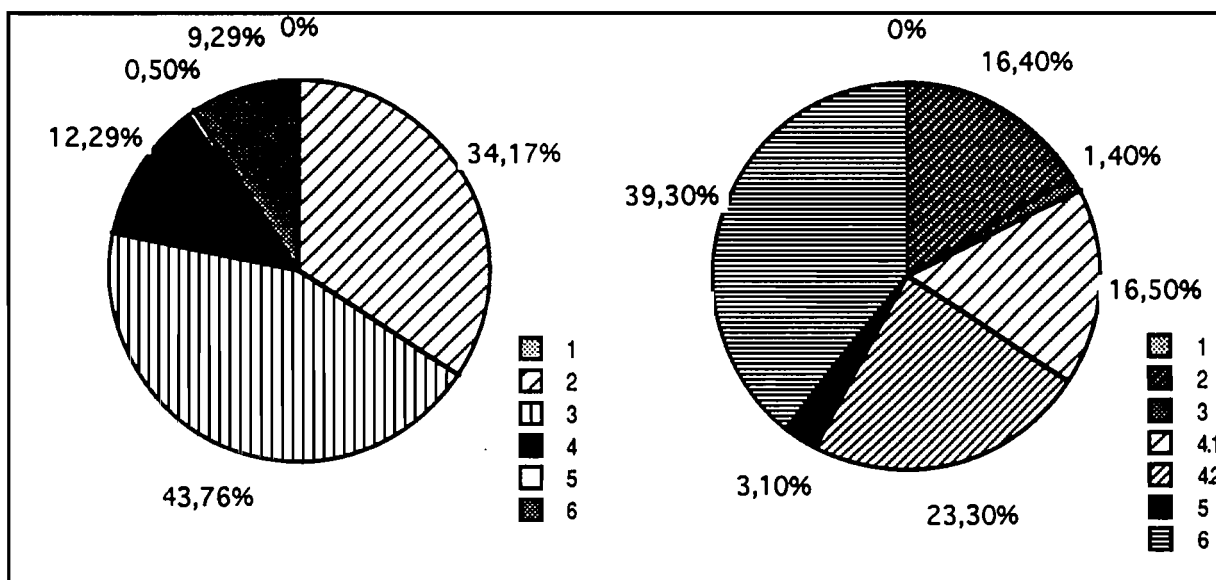


Fig. 152 : Distribution (%) par type d'environnement des pixels-sites harappéens tardifs (ca. 1800-1500 av. J.-C.)

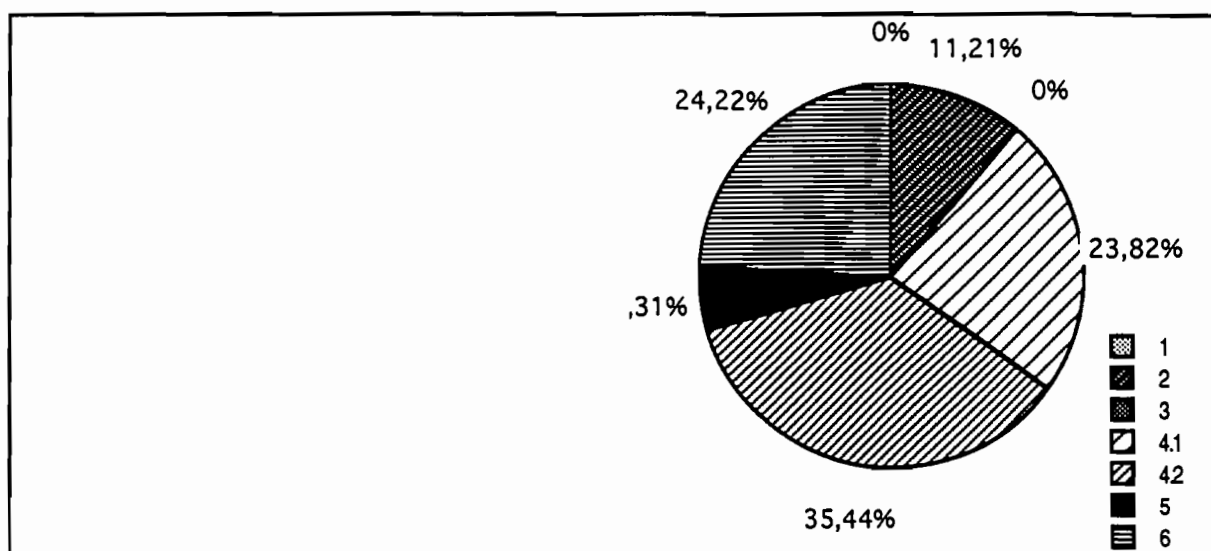


Fig. 153 : Distribution (%) par type d'environnement des pixels-sites de la période de la céramique grise peinte (PGW) (1500-1000 av. J.-C.)

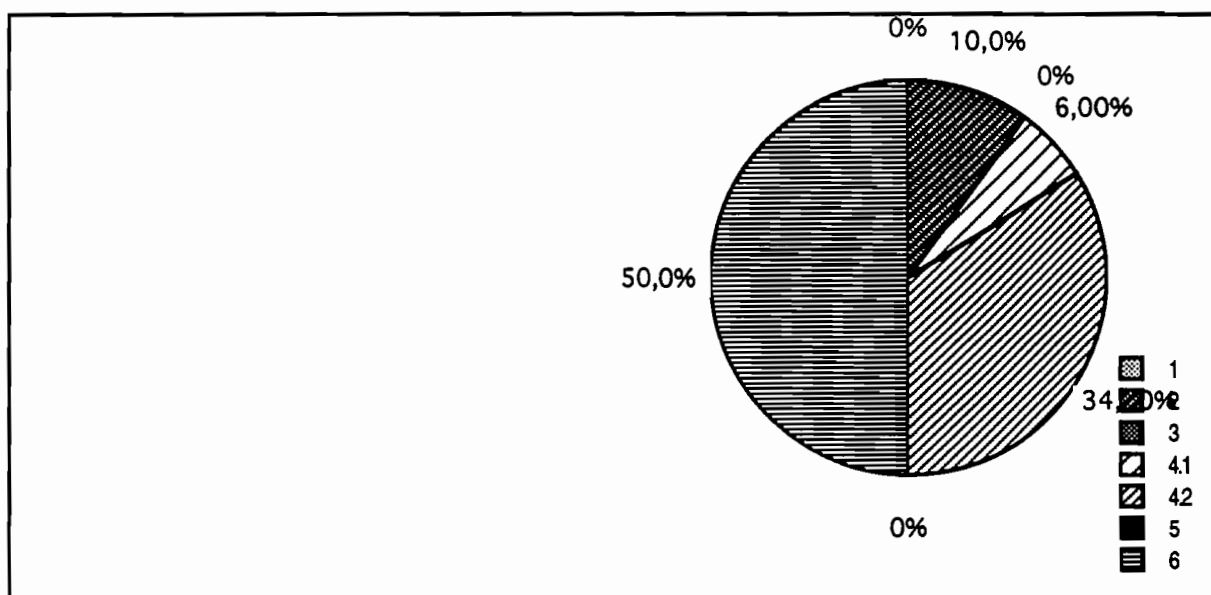


Fig. 154 : Distribution (%) par type d'environnement des pixels-sites de la période de la céramique noire polie du Nord (NBPW) (Ve-IIIe s. av. J.-C.)

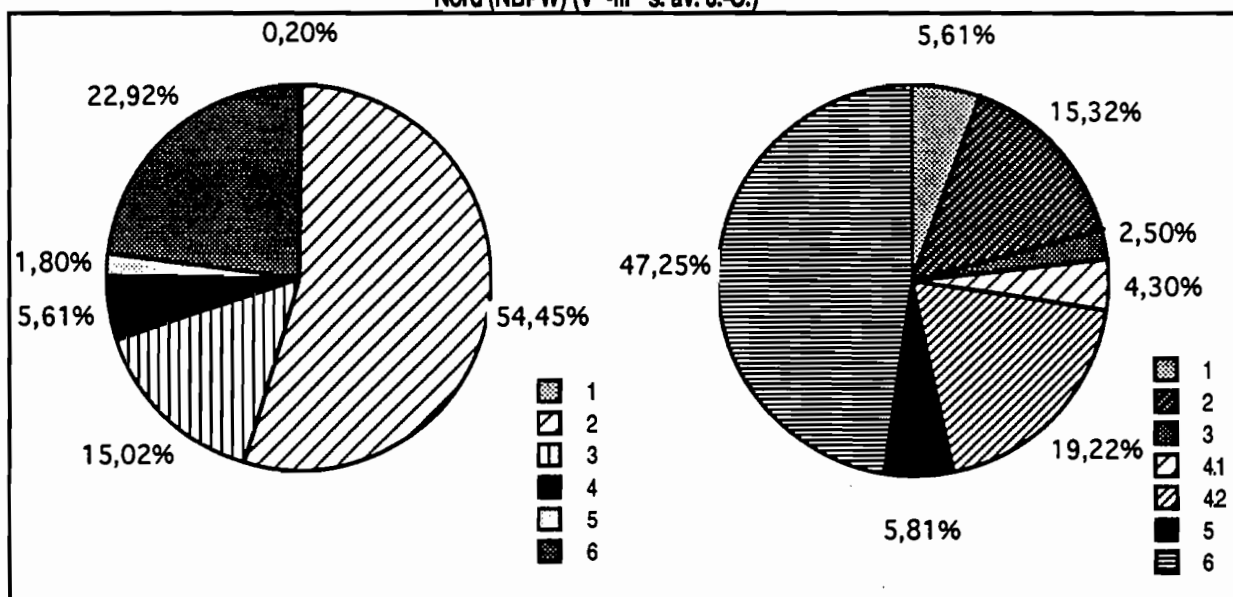


Fig. 155 : Distribution (%) par type d'environnement des pixels-sites kushans (Ier-IVe s. apr. J.-C.)

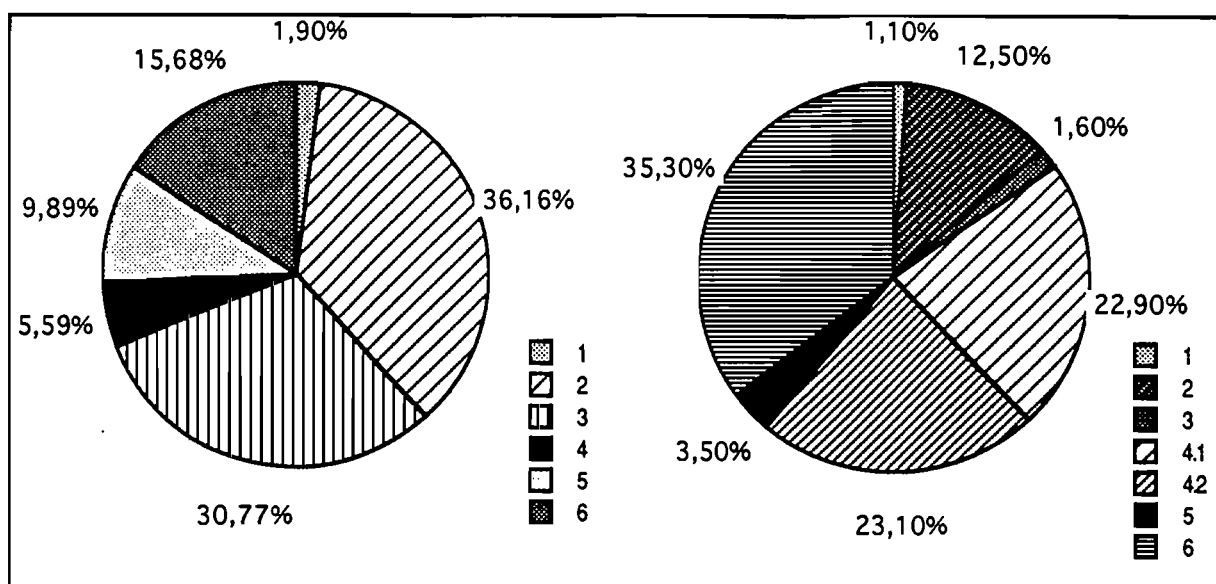


Fig. 156 : Distribution (%) par type d'environnement des pixels-sites Rang Mahal (III^e-VI^e s. apr. J.-C.)

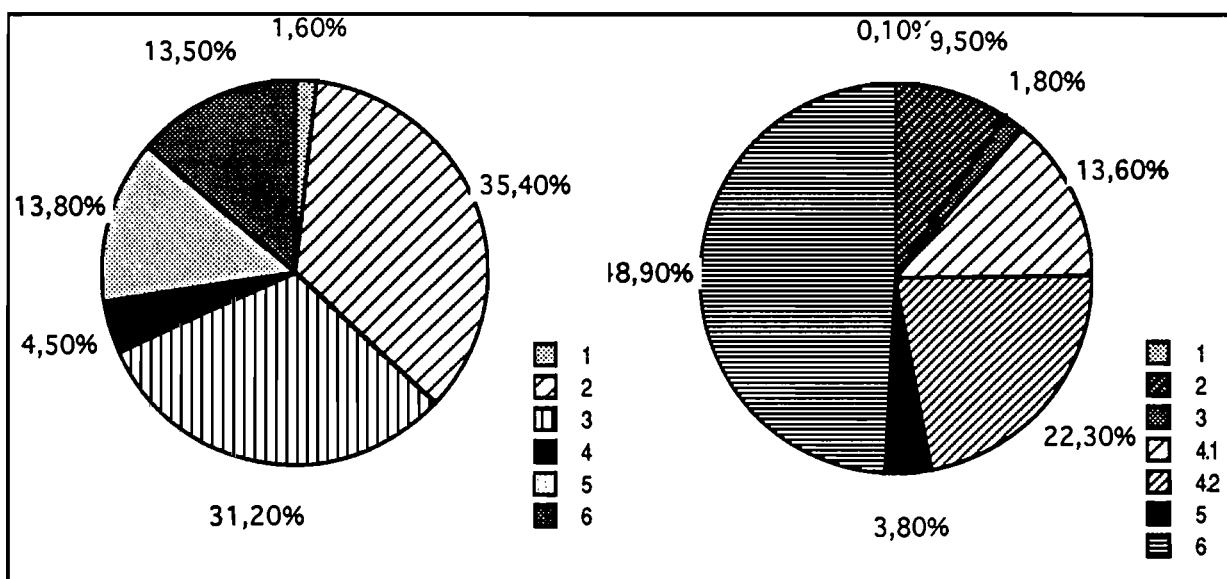


Fig. 157 : Distribution des sites de la période médiévale ancienne (VII^e-XII^e/XIII^e s. apr. J.-C.)

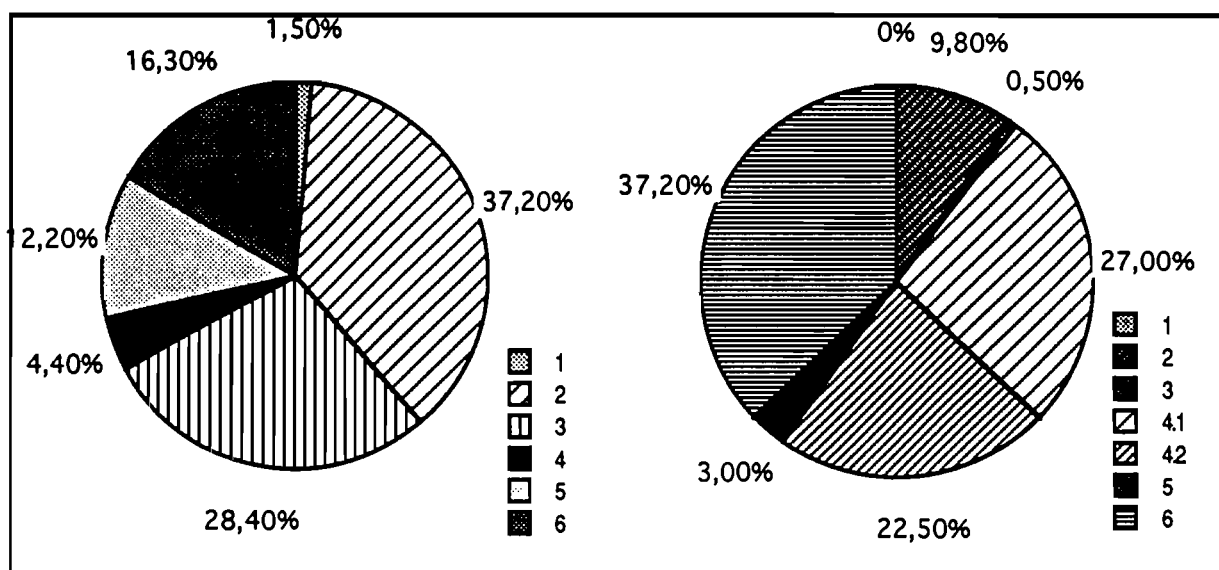


Fig. 158 : Distribution des sites de la période médiévale récente (XV^e-XVIII^e s. apr. J.-C.)

l'eau est disponible en surface lorsqu'il pleut (et comme cela a été exposé au chapitre I.1 la quantité des précipitations n'est pas négligeable dans cette région). L'eau s'y conserve aussi plus longtemps qu'ailleurs après les pluies. Sachant que cela est possible actuellement, et que les espèces primitives, locales, étaient moins sensibles à des sécheresses prolongées, on peut supposer qu'il était possible d'y cultiver des céréales d'hiver telles que le blé.

Nous ne disposons d'aucune donnée sur ce point, mais l'hypothèse d'un écoulement sub-superficiel et d'une position de la nappe plus haute qu'actuellement peut être envisagée dans la mesure où des conditions du type fin de période alluviale ont été mises en évidence (Courty, 1990). L'existence d'une irrigation à partir de puits serait alors aussi possible.

1.1.1.2. Sites et chenaux d'écoulement concentré

Les sites de la période harappéenne appartenant à l'ensemble alluvial ne se trouvent pas tous dans la dépression de la Chautang. L'étude de leur localisation révèle pour certains d'entre eux une grande proximité avec des éléments du réseau de chenaux aujourd'hui comblés, presque imperceptibles au sol, et mis en évidence grâce aux traitements numériques (chap. III.2) appliqués aux images (Fig. 145 à 147).

Sept sites sont implantés en bordure de ces paléo-chenaux :

- Kaimri, n°283 (Fig. 147 et 181),
- les sites n°278 et n°288 aux environs de Mangali (Fig. 147 et 183),
- Mirka n°289 (Fig. 147 et 183),
- Runhat n°260 (Fig. 147 et 184),
- Hajampur n°250 (Fig. 147 et 183),
- Kungar n°263 (Fig. 147).

Certains se trouvent sur des dunes ou sur des amas sableux surplombant l'un de ces chenaux :

- Bhurtana n°255 (Fig. 184),
- Alakhpora n°256 (Fig. 184),
- Puthi-Mangal n°287 (Fig. 184),
- Mirka n°289 (Fig. 183)

D'autres sites sont implantés sur des surfaces sablo-limoneuses carbonatées caractéristiques d'anciennes dépressions, mais les formes associées à ce type de surface ne sont pas celles de chenaux, mais de taches ou de linéaments ténus :

- Laduwala n°303 (Fig. 147 et 182)
- Ratera n°263,
- Mujahadpur n°264
- Mitathal n°1 (Fig. 147 et 185)
- Tigri n°4 et n°2 (Fig. 147 et 185).

En revanche, au sud-ouest de Hisar, où les traces de ces paléoécoulements sont les plus nettement perceptibles (n° 30), l'absence de sites est frappante (Fig. 159 à 161 et 147).

L'ensemble de ces observations permet d'émettre l'hypothèse de l'existence de plusieurs générations de chenaux. Les plus récents -on trouve nombre de sites historiques sur leurs bords- seraient les plus nettement marqués (au sud-ouest de Hisar). Les plus anciens, qui correspondraient à des apports en eau plus abondants et moins concentrés, si l'on en juge par la forme des dépressions, auraient été davantage perturbés. S'il s'agit, comme nous l'avons proposé au chapitre III, de directions préférentielles de l'écoulement, des modifications mêmes infimes de la topographie, anthropiques ou naturelles, ont pu entraîner le changement du tracé de ces chenaux. Les remaniements récents fondamentaux apportés à la topographie de la plaine, en particulier les nivellements et le creusement des canaux d'irrigation, expliquent que ce réseau ne soit plus fonctionnel.

Les changements observés aux cours des trois phases qui composent la période harappéenne, sont quantitatifs et qualitatifs (Fig. 159, 160, 161) : le nombre de sites diminue presque de moitié dans la dépression de la Chautang entre les périodes protoharappéenne et harappéenne tardive. Il reste en revanche constant hors de la dépression. Au sein de ces deux sous-ensembles, la localisation des habitats change (Fig. 171, 172, 173) mais le type d'environnement choisi reste le même (Fig. 150, 151, 152).

1.1.1.3. Conclusions

La région étudiée est située en marge des secteurs où sont concentrés un grand nombre de sites harappéens, par exemple celui, plus septentrional, de la Ghaggar où l'on a découvert le très grand site de Rakhi Ghari (Fig. 10). Le peuplement représenté par les sites archéologiques est ici, en comparaison, peu important et quantitativement inférieur à ce qu'il sera durant la période historique (Fig. 168 et 169). La prospection fut pourtant systématique à l'intérieur du périmètre délimité (le triangle Bhadra - Hisar - Bhiwani). Mais il est parfaitement concevable qu'un nombre, difficilement estimable de sites, en particulier de petits établissements, ait disparu, détruit par suite des modifications récentes apportées à la plaine. Il ne faut donc pas interpréter le nombre de sites comme un reflet parfaitement fidèle du peuplement ancien, mais plutôt comme un échantillon, dont on a du mal à estimer la représentativité.

De l'observation de la localisation des sites par rapport aux différents types d'environnement individualisés sur les images, il ressort que durant la période harappéenne, les habitants de la région ont tiré parti de conditions locales favorables, et notamment de l'existence de secteurs où l'eau pouvait être disponible de façon saisonnière ou temporaire. Il s'agit de la dépression de la Chautang, dont les limites peuvent être nettement délimitées sur les images classées. Cette dépression fut, durant cette période, le lieu de quelques habitats et semble (d'après l'échantillon de sites recensés) avoir été attractive par rapport à son environnement proche, et notamment à la portion de la plaine

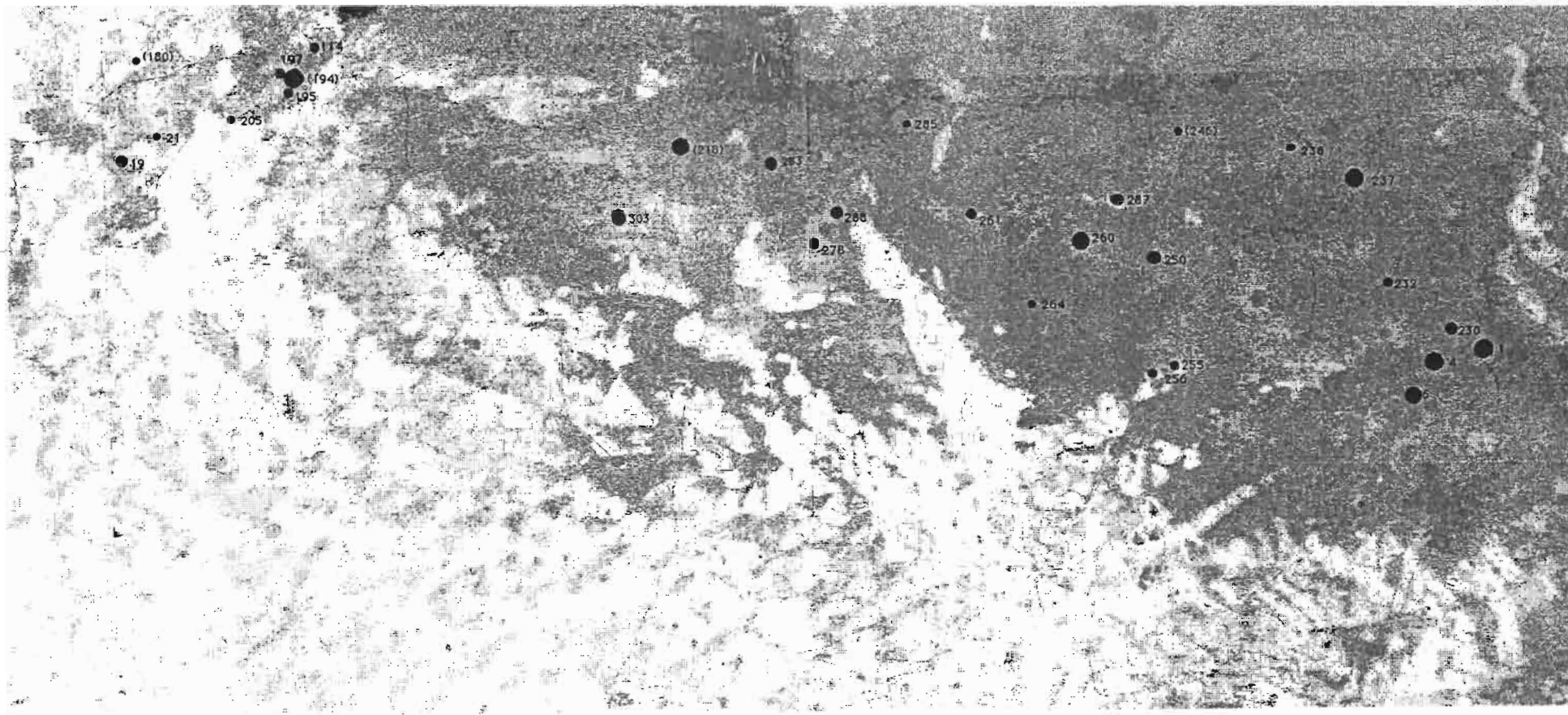


Fig. 159 : Distribution des sites protoharappéens (ca. 3000-2500 av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E)

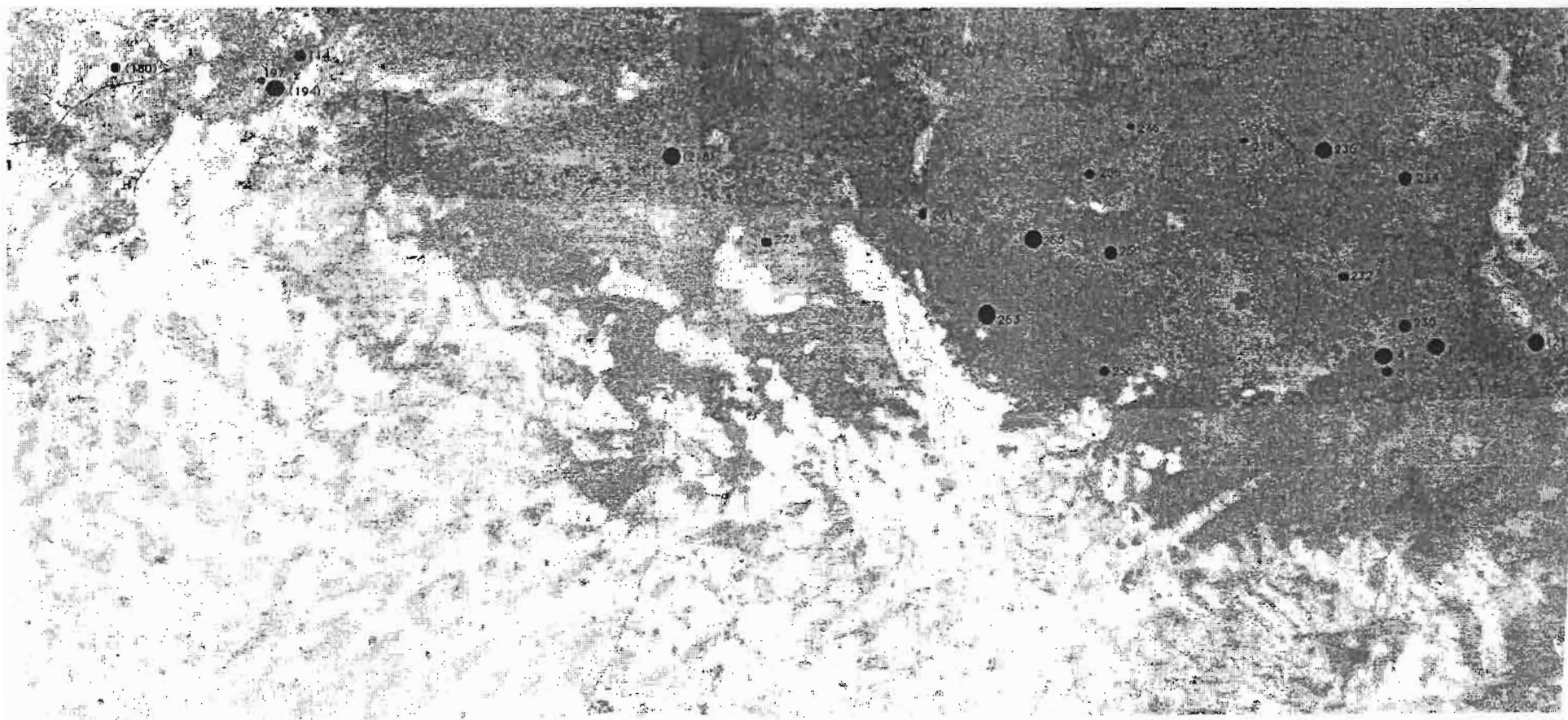


Fig. 160 : Distribution des sites harappéens (ca. 2500-1800 av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E)

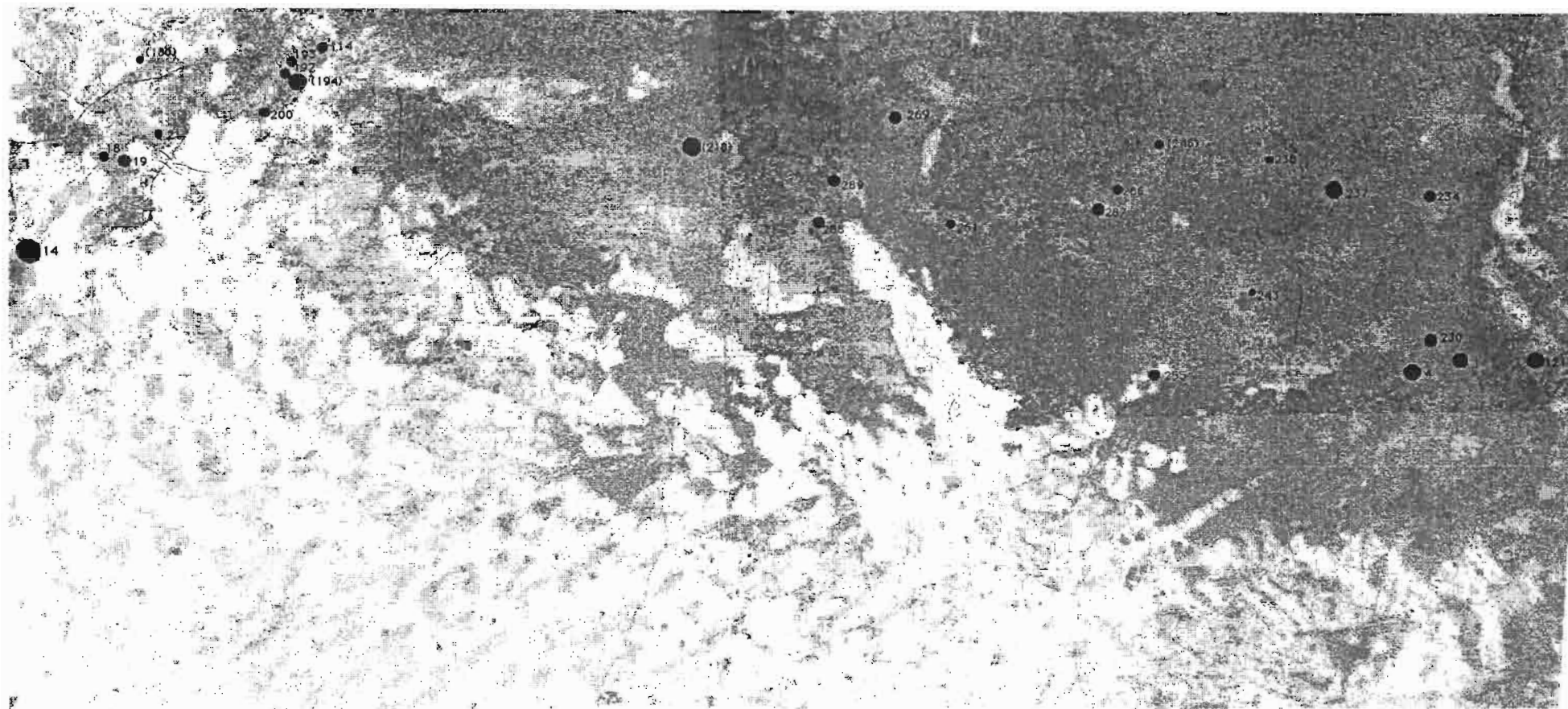


Fig. 161 : Distribution des sites de la période harappéenne tardive (ca. 1800-1500 av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E)

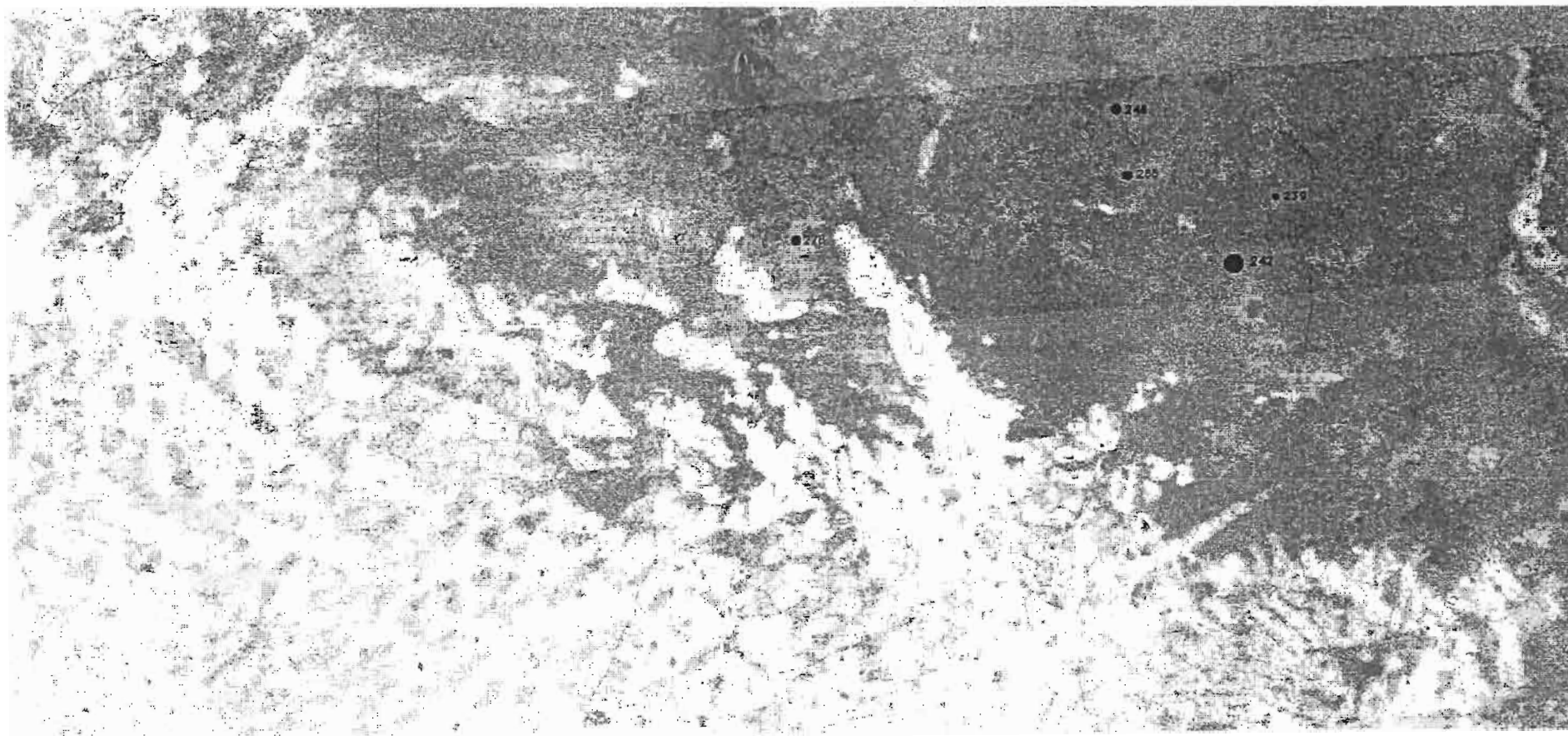


Fig. 162 : Distribution des sites P. G. W. (ca. 1500-1000 av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E)



Fig. 163 : Distribution des sites N.B.P.(V^e - III^e s. av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E)

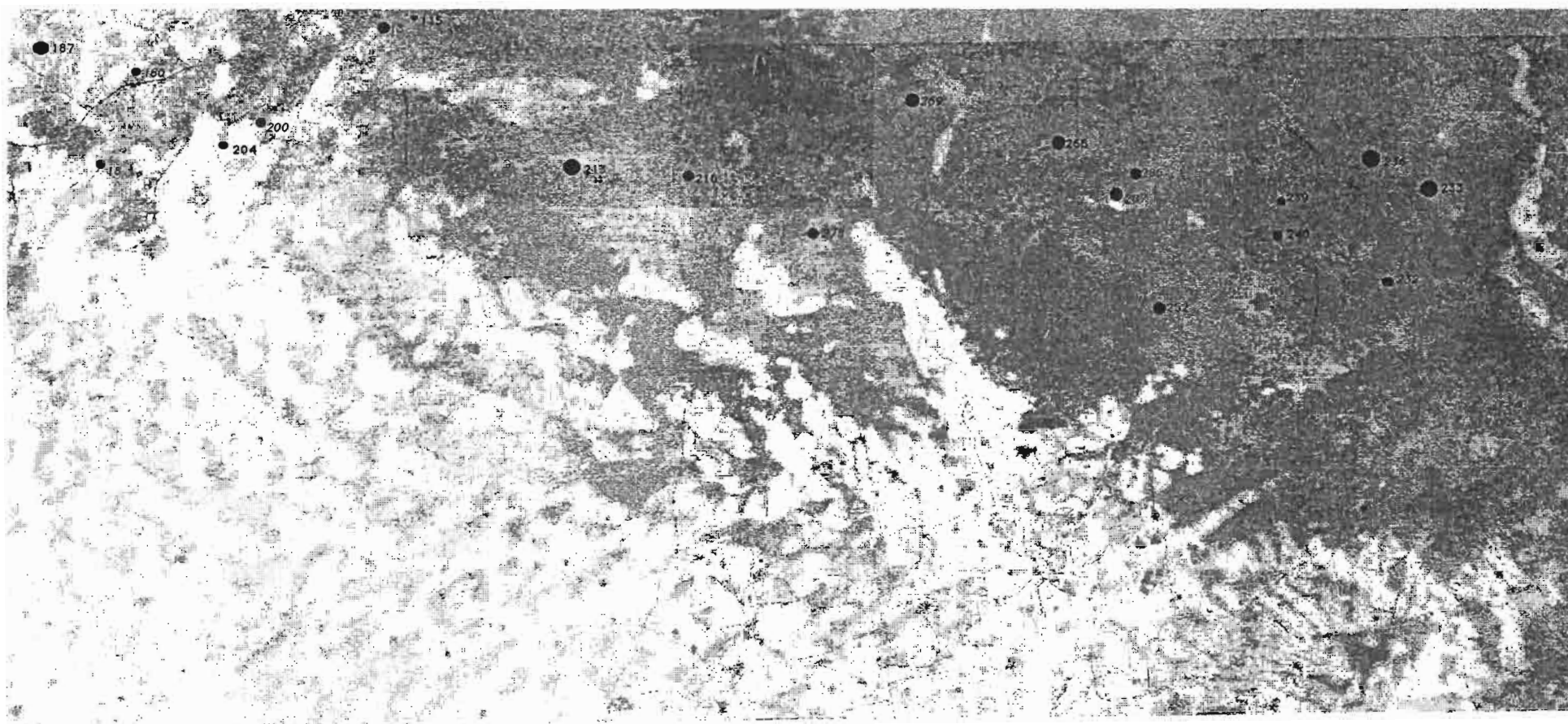


Fig. 164 : Distribution des sites kushans. (I^e - IV s. av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E)

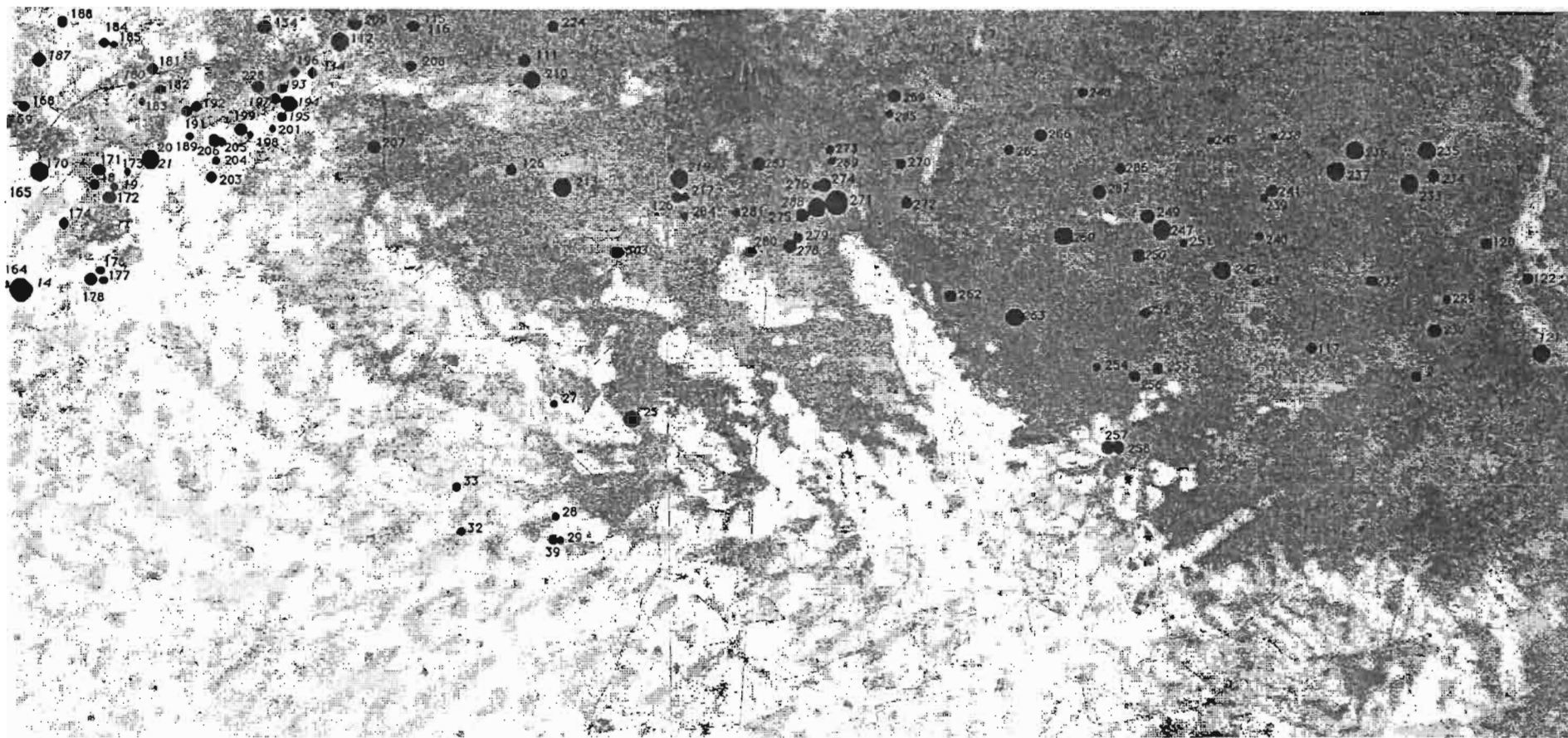


Fig. 165 : Distribution des sites Rang Mahal (III^e-VI^e s. av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E)

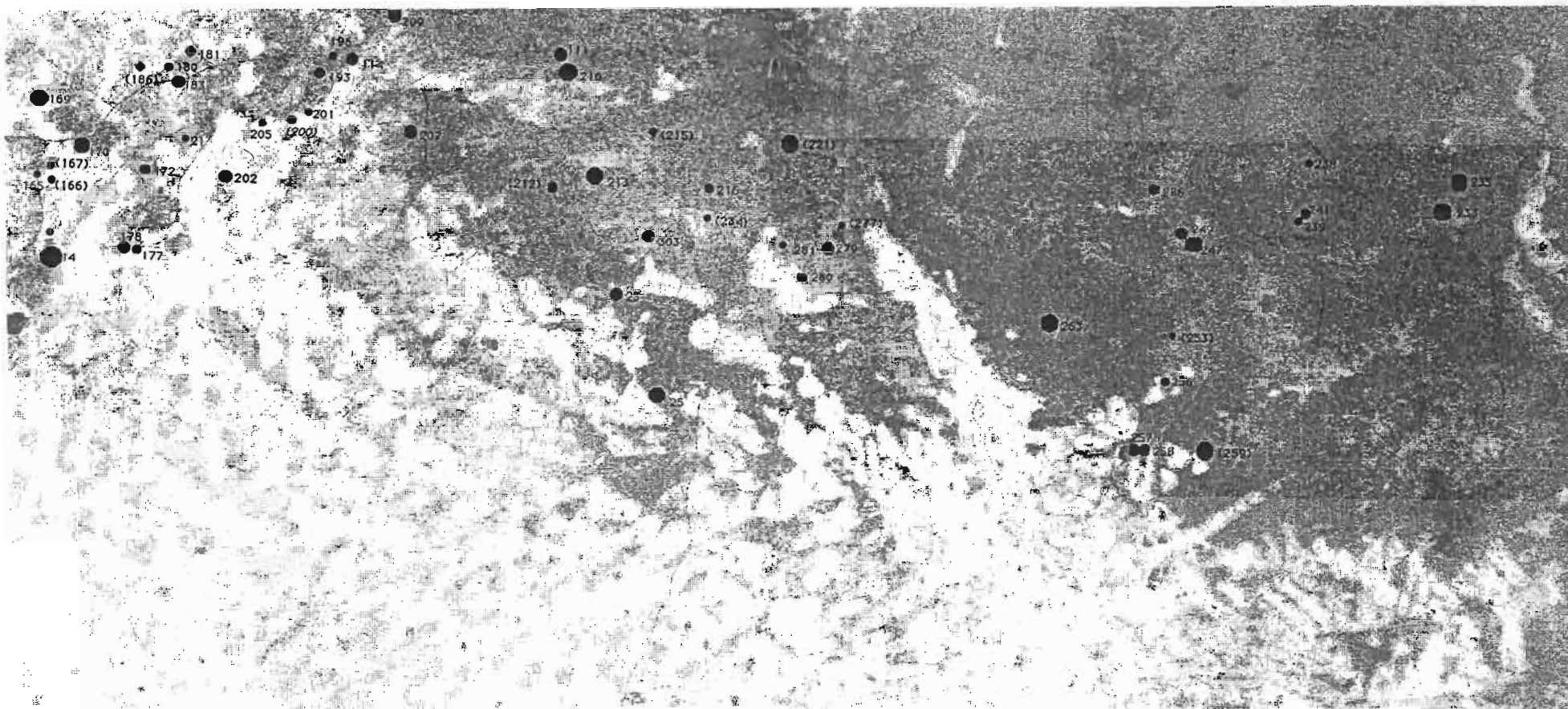


Fig. 166 : Distribution des sites médiévaux anciens.(VIII^e - XII^e-XIII^e s. av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E)

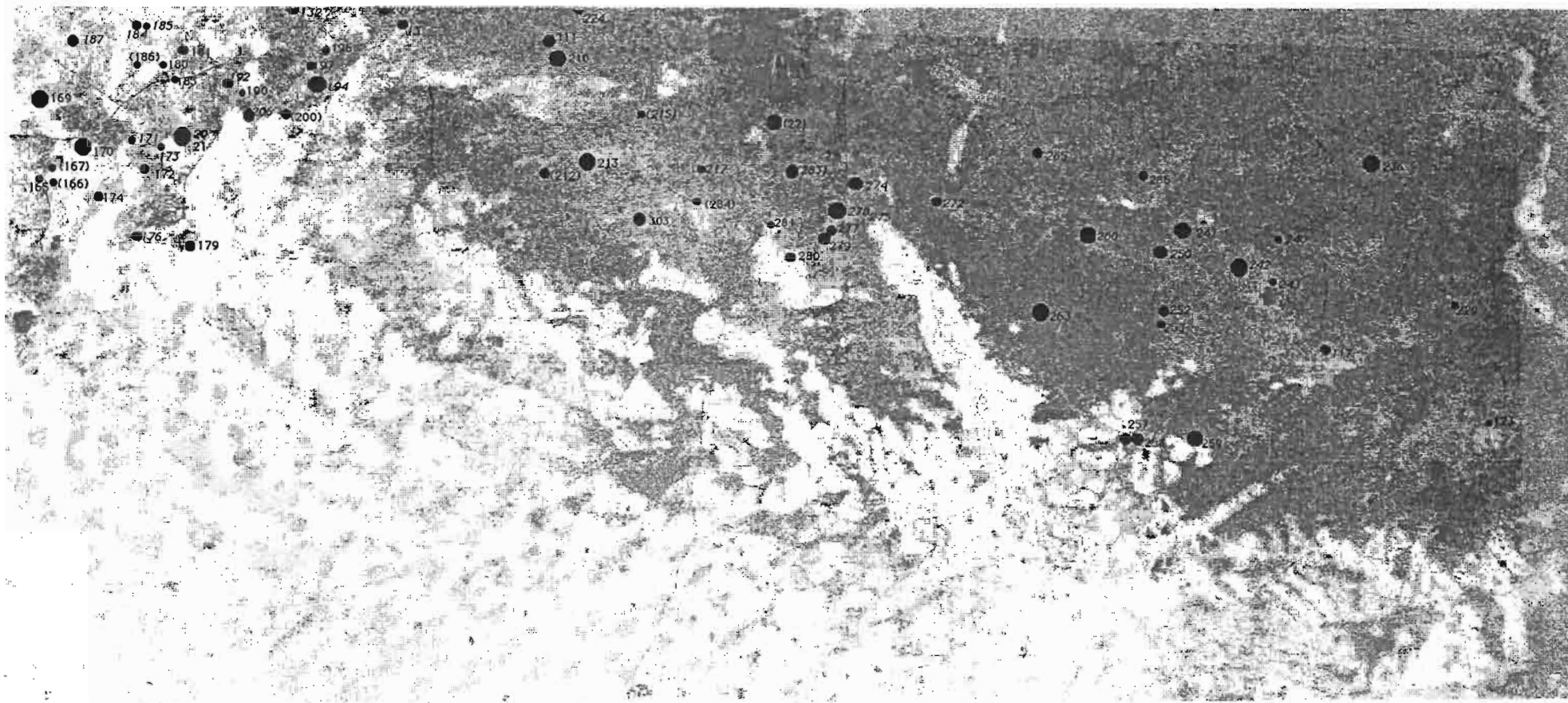


Fig. 167 : Distribution des sites médiévaux récents (XV^e - XVIII^e s. av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E)

située au sud-ouest de Hisar. Mais alors qu'à la fin de la période harappéenne, la plupart des sites y étaient désertés, des villages se maintenaient au sud-est de Hisar, probablement grâce à l'utilisation de chenaux alimentés lors des pluies et concentrant les eaux de ruissellement.

La mise en évidence sur les images satellitaires de ces traces de paléochenaux et de paléodépressions, et la reconstitution dans certains secteurs d'un véritable réseau, permet d'expliquer la localisation des installations humaines durant la période harappéenne. Dans le même temps, elle met fin à l'hypothèse d'un peuplement de ce secteur uniquement riverain du grand cours d'eau pérenne qu'aurait été la Chautang-Drishadwati. Les habitants de la région ont su tirer partie de conditions topographiques locales favorables à la concentration et à la conservation de l'eau, auxquelles s'ajoutent de bonnes conditions pédologiques mises en évidence par les analyses de M. A. Courty (1990). Ces conditions peuvent être considérées comme suffisantes compte-tenu des facteurs suivants :

- des conditions pluviométriques localement peu différentes à cette époque on l'a vu (chap. I.) de ce qu'elles sont actuellement, c'est-à-dire suffisantes pour autoriser une agriculture pluviale, y compris celles des céréales d'hiver,
- le faible nombre des implantations par rapport aux surfaces disponibles et présentant des avantages similaires ; ce qui permet d'inférer que les besoins étaient limités,
- le pouvoir d'organisation caractérisant la société harappéenne (chap. I.2), qui suggère une maîtrise de la constitution, de la gestion et de la répartition de stocks, laquelle devant permettre de pallier le caractère aléatoire des récoltes.

1.1.2. L'occupation post-harappéenne

A la phase harappéenne tardive, font suite celle dite de la céramique grise peinte (P.G.W.) (1500-1000 av. J.-C.) et celle de la céramique noire polie du Nord (N.B.P.W.) (Ve-III^e s. av. J.-C.). L'une comme l'autre de ces cultures ne sont représentées que par un faible nombre de sites, respectivement cinq et deux. Tous sont situés à l'est de Hisar (Fig. 14 et 15) et appartiennent à l'ensemble alluvial.

Trois des cinq sites P.G.W. sont de nouvelles installations (Fig. 162):

- Dhani-Rajuwali n°248 (Fig. 184)
- Siwana n°239, qui est à nouveau occupé pendant la période N.B.P.W. ,
- et le grand site de Bawani Khera n°242 (Fig. 184).

Ceux qui sont habités durant la phase N.B.P.W. sont d'anciens établissements P.G.W. :

- Siwana n°239 (Fig. 184),

ou harappéens :

- le petit site de Puthi Mangal n°286, le seul qui ait été occupé de façon continue depuis la phase harappéenne mûre jusqu'à la phase médiévale récente (Fig. 184).

Calculée sur un faible nombre de pixels-sites, la distribution de ces sites dans les différents types d'environnement identifiés est moins significative que pour les autres époques (Fig. 153 et 154). Excepté Mangali n°278, la proximité site-chenal n'a pu être mise en évidence.

La très faible empreinte laissée par la culture de la céramique grise peinte et plus généralement par les cultures post-harappéennes dans la région, et comme on le verra plus loin dans la plaine de la Hakra, ainsi que la disparition des caractères propres à la civilisation harappéenne sur les sites avaient donné à penser qu'un phénomène brutal avait uniformément affecté ces sociétés protohistoriques. Parmi les hypothèses émises, nombreuses étaient celles qui supposaient l'anéantissement des facteurs favorables, climatiques ou hydrographiques, considérés comme ayant déterminé l'installation et le maintien d'importants foyers de peuplement aux III^e et II^e millénaires dans le nord-ouest du sous-continent indien (Chap. I). Bien que ces hypothèses explicatives aient été écartées (cf. Synthèse des travaux au chap. I), la désertion de la région entre la fin de la période harappéenne et la période historique n'en demeure pas moins un phénomène réel.

Nous avons vu que des facteurs locaux favorables avaient permis aux populations de s'installer dans la région et d'y pratiquer l'agriculture. La question est de savoir si des changements intervenus dans ces paramètres ont pu forcer les populations à abandonner la région. Tout d'abord, il faut souligner que ce retrait, dans la dépression de la Chautang, semble avoir été amorcé dès la fin de la période harappéenne mûre. Il ne fut pas non plus total puisque de nouveaux sites apparaissent à l'époque P.G.W. Il faut noter par ailleurs, que quelque trois cents ans séparent la fin de la période harappéenne mûre de la période P.G.W. L'échelle temporelle imposée par l'analyse archéologique n'est pas assez fine pour qu'il soit possible de débattre sur la brutalité du phénomène et l'on ne peut savoir si l'abandon fut progressif ou massif.

Dans les régions de marge semi-arides, comme celle que nous étudions, les équilibres réalisés entre une occupation humaine qui tire de l'agriculture l'essentiel de sa subsistance sans avoir recours à des techniques d'irrigation autres que primitives, et un milieu de transition entre de grands ensembles fluviaux et le désert (milieu qui subit les pulsations et les rythmes d'évolution des systèmes qui l'encadrent) sont fragiles. Des changements, naturels ou anthropiques, apportés à l'un des paramètres qui composent ces ensembles peuvent être responsables de leur rupture. Ces phénomènes peuvent se produire à différentes échelles. Localement, le changement de tracé d'une partie des paléo-chenaux suite à des modifications micro-topographiques peut occasionner des déplacements de sites (nous en avons mis en évidence au cours de la période harappéenne) mais pas une désertion de la région. Par ailleurs, les conditions pluviométriques locales ayant peu évolué,

l'assèchement définitif de ces chenaux est d'autant plus improbable qu'ils constituent encore aux époques historiques un lieu d'implantation privilégié pour les établissements humains.

L'échelle temporelle utilisée pour observer les phénomènes est tout aussi importante que l'échelle spatiale. Il n'est pas nécessaire d'invoquer des changements climatiques pour expliquer l'abandon de certains secteurs : une succession d'années sèches, si les stocks sont insuffisants pour pallier le manque de nourriture, provoque des famines et la désertion des villages. Des exemples sont décrits dans les *gazetteers* ; ainsi, dans le *tahsil*¹ de Hisar, la population passe entre 1868 et 1881 de 107 442 à 98 106 habitants. Cette baisse s'explique par une épidémie de choléra survenue en 1879 et l'émigration d'une partie de la population après plusieurs années sèches (Gazetteer Hisar, 1884). En 1840, on signale aussi dans un rapport (*Settlement Report*) que des populations Rajput installées dans toute la portion occidentale du district de Hisar, de Bhiwani à Agroha (1440 villages), furent chassés par une famine (*chalisa famine*) et ne se réinstallèrent pas dans la région -ils ne possédaient plus que cinq ou six villages en 1840- qui fut colonisée par d'autres tribus.

Par ailleurs, l'attraction de certains lieux peut entraîner la désertion progressive de certains autres qui n'en sont pas pour autant devenus répulsifs. Certaines régions qui, à une époque, n'offrent pas d'intérêt particulier, deviennent attractives à d'autres, du seul fait que mises en valeur grâce à des progrès techniques, irrigation ou défrichement par exemple, elles offrent alors des potentialités supérieures pour l'agriculture. Il devient dès lors moins rentable en terme d'effort humain et de coût de continuer à cultiver des terres de moins grande valeur. C'est ainsi que l'on enregistrait une augmentation de la population de 12 900 personnes dans le district de Fatehabad entre 1868 et 1881, émigrés des Territoires de Bikaner et de Patiala attirés par "une augmentation considérable des terres cultivables" (Gazetteers Hisar, 1884).

Des faits culturels interviennent aussi dans l'utilisation des terres et la répartition des populations, certains groupes étant davantage portés que d'autres vers les activités agricoles. A la fin du XIX^e siècle, on signale dans les *gazetteers* (Hisar, 1884) que les *Jats* de Hisar et en particulier les *Bagri Jats*, colonisèrent en grand nombre la région occidentale du district de Bikaner vers 1880, région désertée après une grande famine et qu'"en bons et prudents agriculteurs" surent tirer le meilleur parti possible de ces terres sableuses particulièrement inhospitalières.

Migrations, désertions, colonisations étaient des événements démographiques fréquents, avant qu'une plus grande sûreté des récoltes ne soit garantie par de nouvelles techniques

¹ Division inférieure au district

agricoles au début du XX^e siècle. L'abandon d'un village répond à une nécessité d'adaptation à des faits d'origine et d'influence le plus souvent locales, ou régionales. A la lumière des informations apportées par cette étude, "l'absence d'occupation" de la plaine de Hisar de la fin de la période harappéenne au début de la période historique s'expliquerait donc en fait par un ensemble de facteurs interdépendants et correspondant à des "pulsations" plus que par une réelle évolution, et en tout cas pas au déterminisme d'un seul paramètre physique. Cependant, le déclin de la civilisation de l'Indus s'étant produit ailleurs, dans des milieux assez différents tels que la vallée de l'Indus ou le Gujarat durant la même période, on peut penser que les explications ne sont pas seulement environnementales mais aussi "humaines". Il faut rechercher des causes générales à l'affaiblissement de cette puissante organisation sociale et politique, recherche qui bien sûr sort du cadre de ce travail.

1.1.3. L'occupation historique

1.1.3.1. L'occupation kushane

A l'ouest et au sud-ouest de Hisar, la culture kushane (I^{er}-IV^e s. apr. J.-C.) coïncide avec une nouvelle phase d'occupation humaine. Seuls trois des neuf sites datés de cette époque avaient déjà été occupés durant la période harappéenne (Fig. 164) :

- Shairpura n°18 (Fig. 178),
- Janana n°180 (datation incertaine) (Fig. 178),
- Bair n°200 (Fig. 180).

Comme durant la phase harappéenne mûre, les installations mises au jour sont situées en majorité dans les dépressions à dépôts carbonatés (unité 203-2) (Fig. 155). A l'est et au sud-ouest de Hisar, c'est dans la plaine limoneuse à argileuse représentée par les unités 204-2 et 204-6 (Fig. ch. III) que les surfaces occupées par d'anciens habitats kushans sont les plus étendues (Fig. 155). Trois nouveaux sites ont été recensés pour cette époque :

- Daremsalah n°266 (Fig. 183),
- Jamalpur n°252
- Talu n°233

Six autres présentent des vestiges harappéens :

- Mangali n°278 (Fig. 183),
- Satrod-Kalan n°269 (Fig. 183)
- Puthi-Mangal : n°286 et n°287 (Fig. 184)
- Siwana n°239 (Fig. 184)
- Bhaini n°236 .

Enfin, deux sites kushans étaient déjà occupés durant la période de la céramique noire polie du Nord :

- Puthi Mangal n°286, (Fig. 184).

- Siwana n°239 (Fig. 184).

Le fait marquant l'occupation kushane est la présence d'habitats anciens :

- Siswala n°213 (Fig. 147 et 181) et
- Patan n°216 (Fig. 147 et 181)

dans le secteur situé au sud-ouest de Hisar -qui n'avait été occupé que durant la période protoharappéenne-, sur les bords des chenaux que nous avons mis en évidence. Quatre sites ont été identifiés dans la dépression de la Chautang à cette époque :

- Shairpura n°18 et
- Bair n°200 (harappéens).
- Muhabbatpur n°13 et n°115 situés au nord-est du *Hisar distributary*, canal du XIX^e siècle abandonné (Fig. 180).

Les sites de

- Sawal-Chhani n°204 (Fig. 180),
- Janana n°180 (Fig. 178) et
- Jogiwala n°187 (Fig. 178)

sont localisés à proximité (km), mais en dehors de la dépression, ce qui constitue également un changement par rapport à la période harappéenne.

Au sud-est de Hisar, les nouveaux établissements sont situés en bordure d'un chenal de drainage naturel :

- Daremsalah n°266 (Fig. 147, 183)
- Bawani-Khera n°240 (Fig. 147 et 184), et
- Talu n°233 .

Les sites plus anciens, Satrod Kalan n°269 (Fig. 183), Puthi Mangal n°286 et n°287 (Fig. 184) par exemple peuvent être mis en relation non pas avec l'un des chenaux mis en évidence, mais avec des traces plus diffuses.

On voit, d'après ces observations que les Kushans dans la plaine ont choisi le même type d'implantation que durant la protohistoire, qu'il s'agisse de la réoccupation d'anciens sites ou du choix de nouveaux emplacements. Il semble, mais le nombre de sites est trop faible pour généraliser, que les chenaux aient encore fonctionné à cette époque.

Un problème se pose : est-il ou non pertinent de séparer sur le plan de l'occupation spatiale, les cultures kushane et Rang Mahal. En effet, sur les 20 sites où les signes distinctifs de cette dernière culture ont été identifiés, deux seulement n'ont pas connu d'occupation Rang Mahal.

1.1.3.2. Les sites Rang Mahal

Si l'on en juge par le nombre de sites recensés, c'est durant la phase dite Rang Mahal, qui s'étend du III^e au VI^e siècle de notre ère, que l'occupation de la région aurait été la plus

dense (Fig. 165). A l'ouest de Hisar, le type de localisation des sites durant cette période diffère peu de ce qu'il sera plus tard durant la période médiévale (Fig. 156, 157, 158). A l'est, les différences concernent l'occupation de la plaine limoneuse représentée par la classe 6-204 : plus habitée (49 % des pixels-sites) durant la période médiévale ancienne que durant toutes les autres périodes considérées.

Ces sites peuvent, dans leur majorité, être mis en relation avec des axes d'écoulement des eaux des chenaux d'inondation dont nous avons nettement fait apparaître les traces les images (fig. 147).

Dans la région étudiée, on dénombre au total 124 sites datés de la phase culturelle Rang Mahal. Vingt-six d'entre eux¹ sont situés dans la dépression de la Chautang ou sur sa bordure immédiate. Ils sont distants les uns des autres d'1,7 km en moyenne, et plus espacés entre Bahdra (n°14) et Chhani Bari (n°189) qu'entre ce dernier et Muhabbatpur (n°13) (Fig. 178, 180, 181). On remarque qu'ils suivent au nord ou au sud, le tracé du *Hisar distributary*, branche du *Western Yamuna Canal* (Fig. 29) datant du XIX^e siècle et abandonnée entre 1937 et 1975 (chap. I.5.1). On sait par des textes anciens que ce canal a été creusé à l'emplacement d'un autre, construit sous le règne de Firuz Shah au XIV^e siècle (période médiévale). La très forte densité d'installations dans la dépression au début de notre ère laisserait supposer qu'un canal y avait été creusé dès cette époque. Les traces d'un canal d'irrigation daté du début de notre ère (Chap. I.5.1) retrouvées au fond d'une briqueterie à 3 km à l'est de Bhadra tendrait à confirmer cette hypothèse. La présence de sites le long du *Hisar distributary* entre Siswal et Hisar, aux environs de Muhabbatpur (n° 115 et n°116) et de Salemgarh (n°111 et n°210), d'où ils étaient absents auparavant, pourrait aussi attester de l'ancienneté du tracé du canal.

Les sites n° 203 et n°204 (Fig. 180) aux environs de Sawal Chhani et n° 176, n°177, n°178 (Fig. 179), proches de Putwa, sont placés au sein de petites cuvettes reliées au couloir principal par des dépressions que l'on pourrait interpréter comme d'anciens canaux de dérivation.

Enfin, de nombreux sites ont été retrouvés en dehors et au nord-ouest de la dépression (Fig. 178) : Ghandi Bari (n°168), Gandhi Chiria (n°169), Jogiwala (n°187, n°188), Babalwas (n°184, n°185), Sohuwala (n°186), Chani Bari (n°191 et n°192), Malkhaira (n°170), Bhojasar (n° 165 et n°167) ou encore Dungarwas (n° 168). Ils sont situés en bordure de petites dépressions, et aucun élément ne nous permet de dire si celles-ci étaient alimentées en eau par les seules pluies, ou s'il s'agissait d'anciens terroirs irrigués à partir d'un canal principal situé dans la dépression de la Chautang .

¹ D'aval en amont : n° 164, 14, 174, 172, 19, 18, 173, 171, 20, 21, 189, 190, 206, 205, 199, 198, 200, 201, 195, 194, 197, 193, 196, 114, 113, 13.

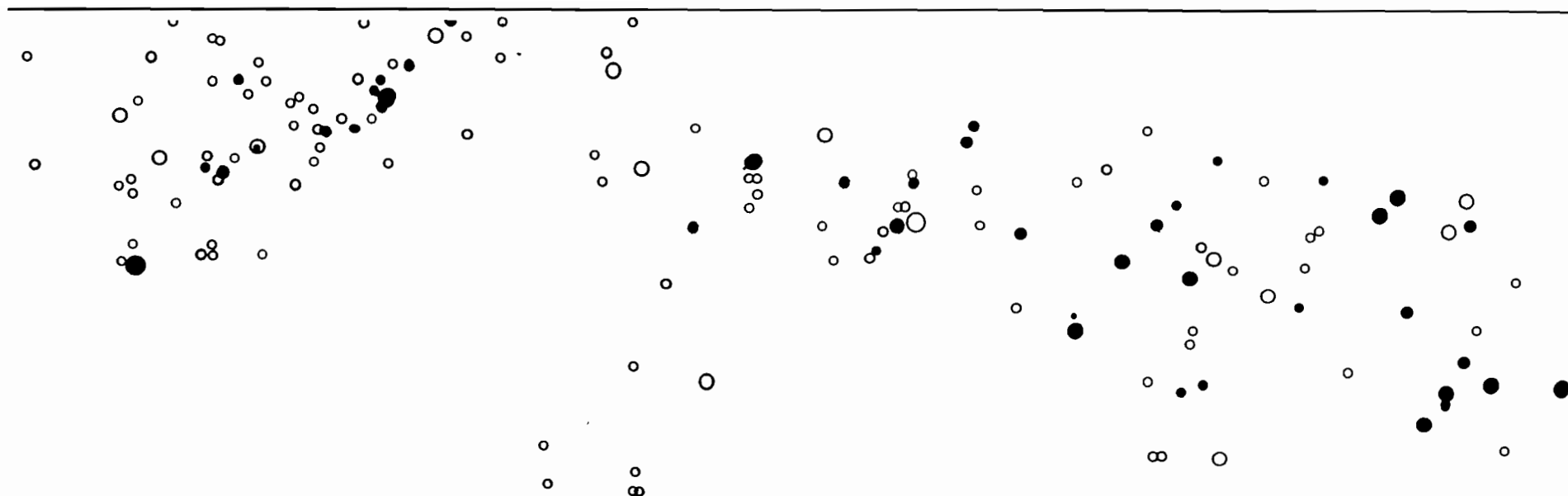


Fig. 168: Distribution des sites protohistoriques (○) par rapport à celle des sites historiques



Fig. 169 Distribution des sites historiques (●) par rapport à celle des sites protohistoriques

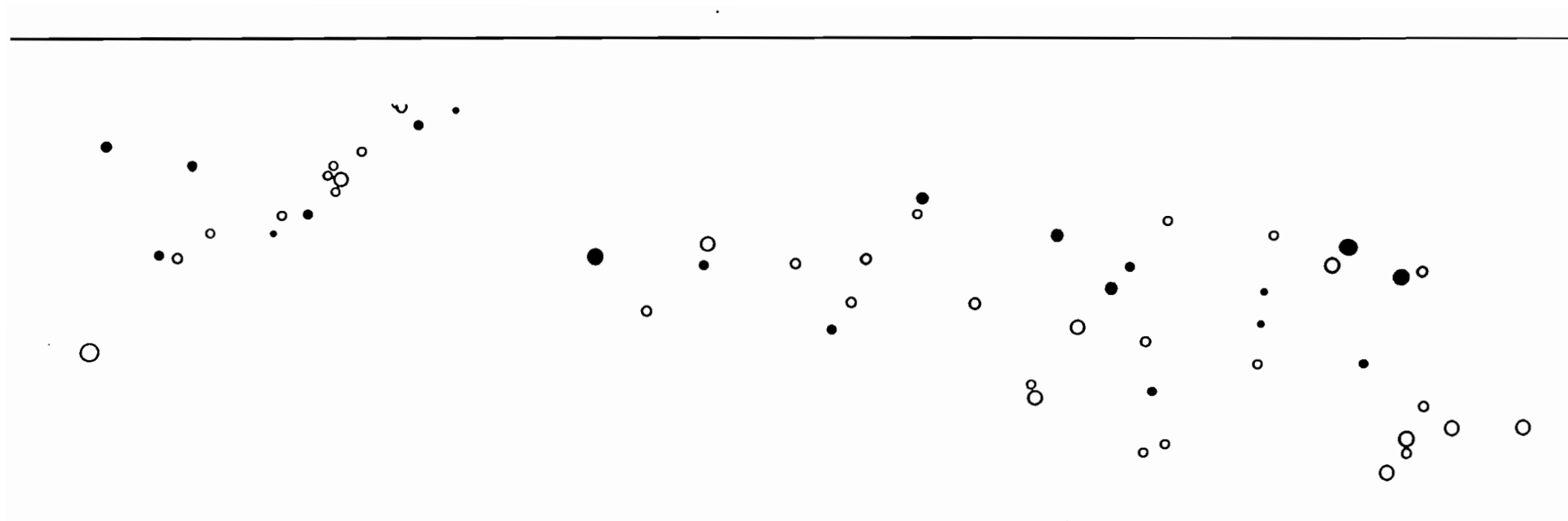


Fig. 170 : Distribution des sites kushans (•) par rapport à celui des sites protohistoriques

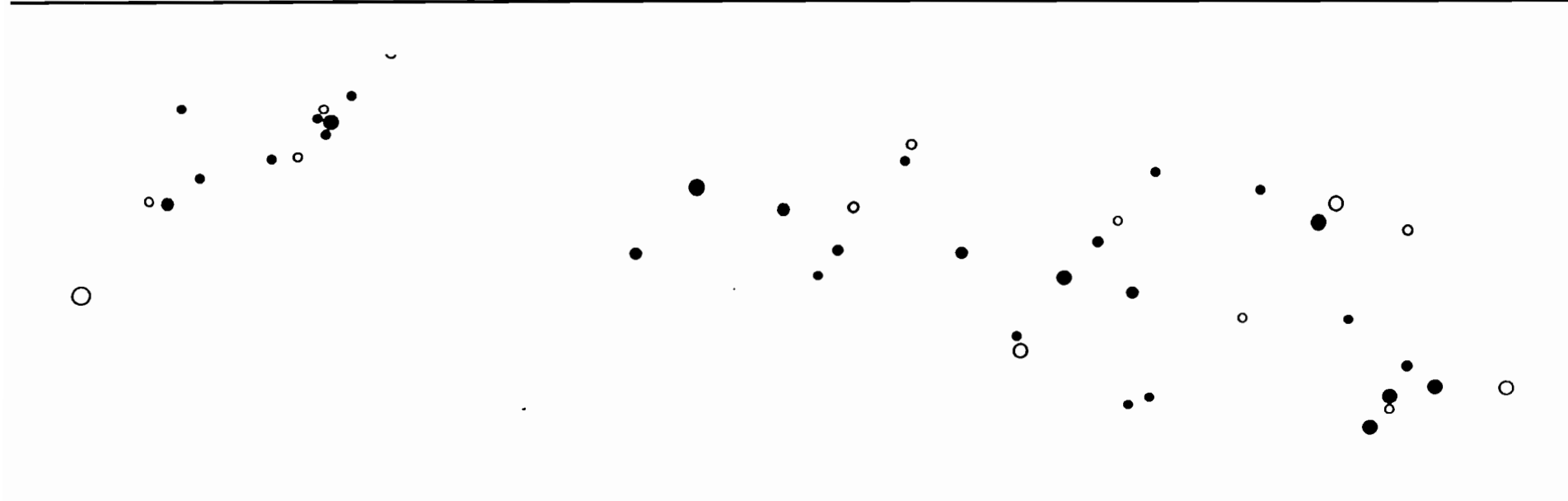


Fig. 171: Les sites protoharappéens (•) par rapport aux sites protohistoriques

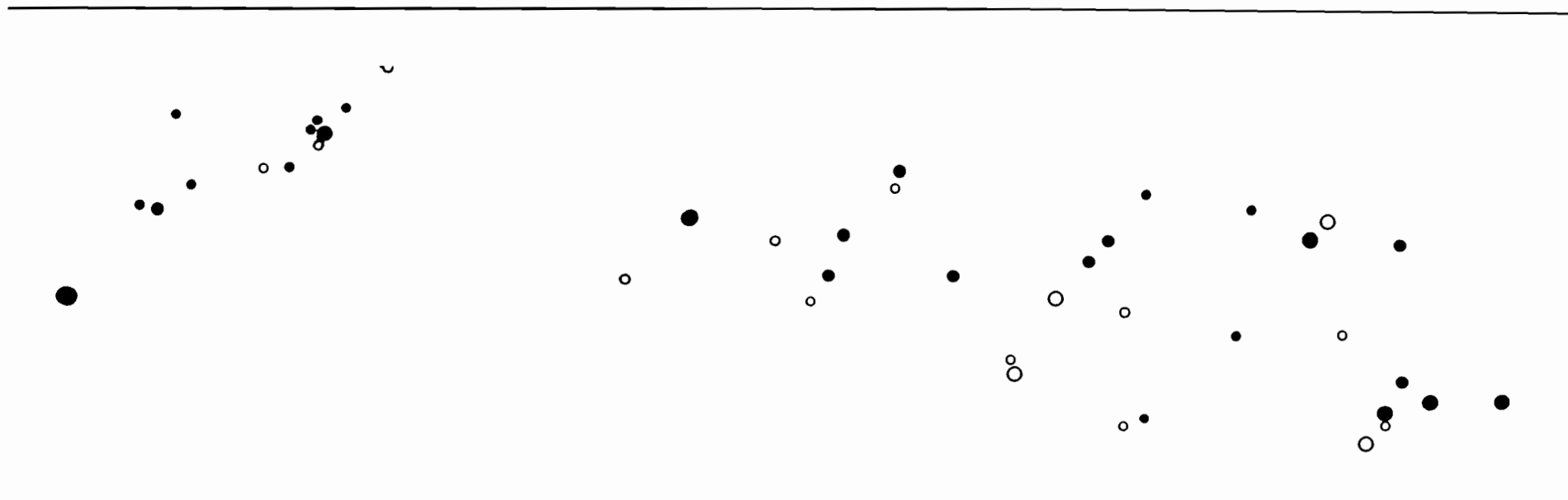


Fig. 172 : Les sites harappéens mûrs (•) par rapport au peuplement protohistorique

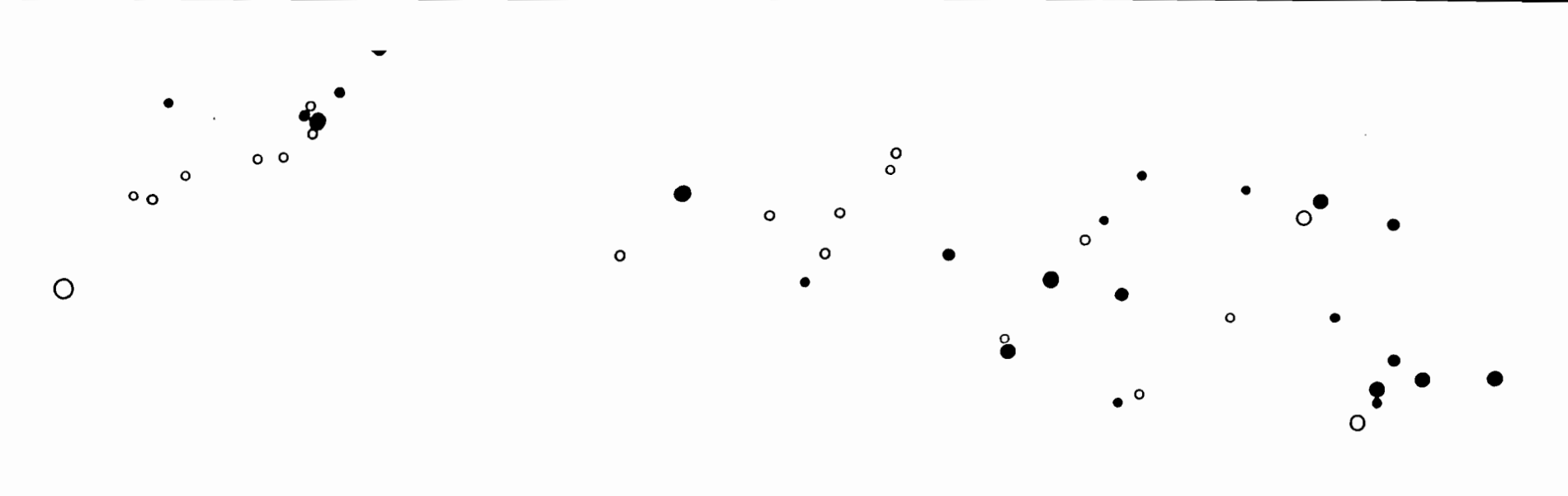


Fig. 173 : Les sites harappéens tardifs (•) par rapport au peuplement protohistorique

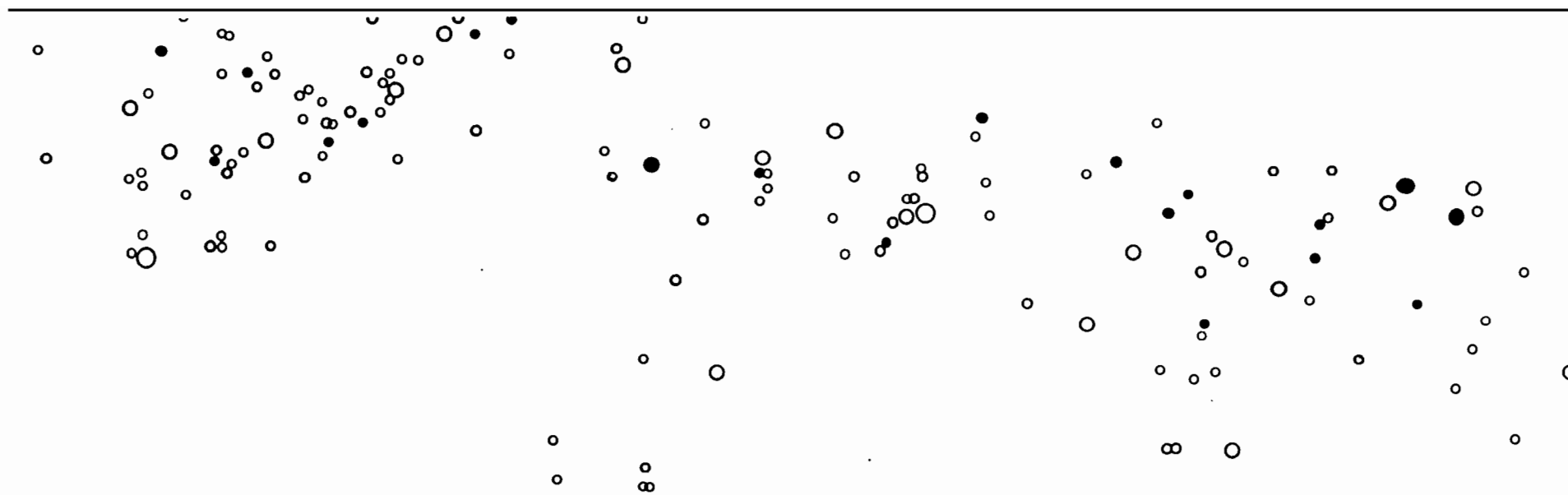


Fig. 174 : Les sites kushans (•) par rapport au peuplement historique



Fig. 175 : Les sites Rang Mahal (•) par rapport au peuplement historique

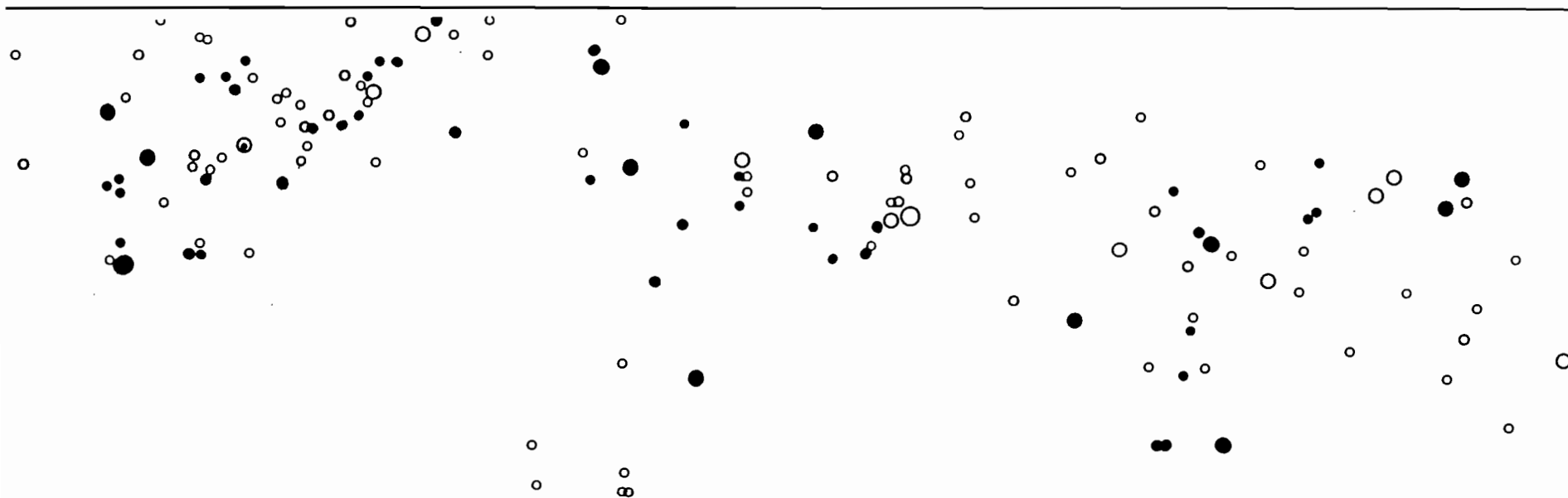


Fig. 176 : Les sites médiévaux anciens (•) par rapport au peuplement historique

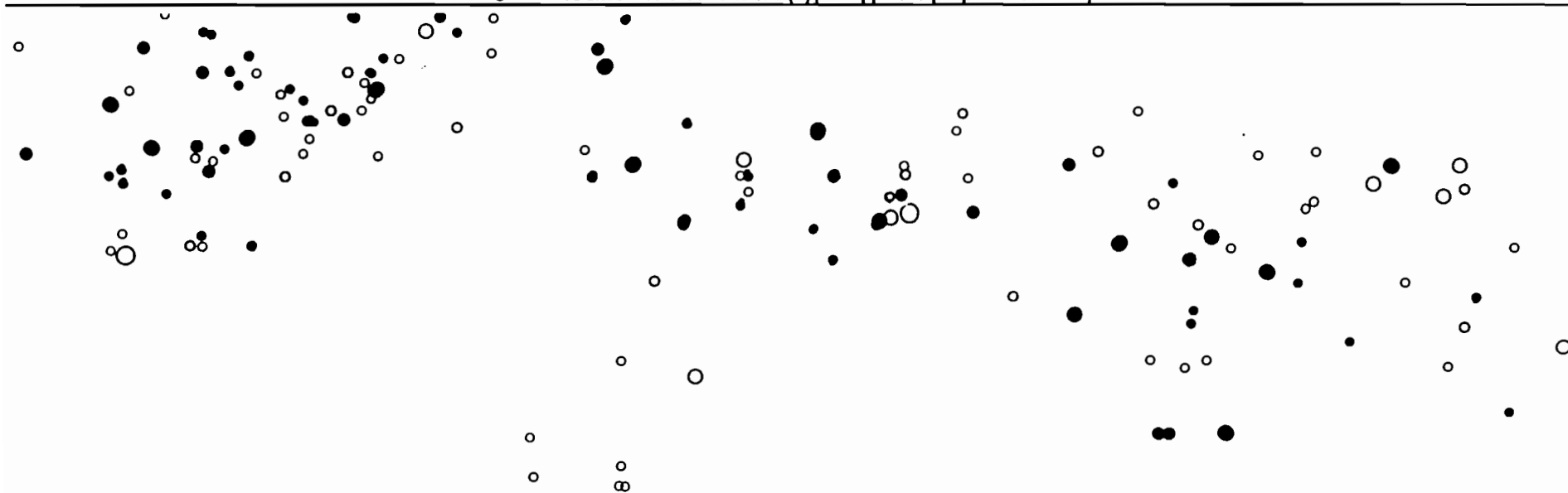


Fig. 177 : Les sites médiévaux récents (•) par rapport au peuplement historique

La plaine au sud-ouest de Hisar, était habitée durant la période Rang Mahal. Parmi l'ensemble des sites qui ont été retrouvés dans ce secteur, six, sur neuf (Fig. 147 et 181) sont au bord du chenal d'orientation est-ouest que nous avons mis en évidence sur les images :

- Kaimri n°283 (déjà occupé durant la phase protoharappéenne) ,
- Patan n° 216 -kushan- et n°217,
- Siswala n°213 (kushan),
- Kharia n°126 et
- Dobhi n° 211 (Fig.147 et 180).

La présence de sites à proximité de ce chenal tend à prouver que celui-ci était en fonction à cette époque. Aucun site, cependant, n'a été retrouvé sur les chenaux d'orientation nord-sud qui confluent vers lui. On peut donc penser qu'il s'agissait de chenaux naturels (Fig.147).

Le secteur de Mangali a été lui aussi densément occupé. Tous les sites sans exception (Fig. 147 et 183) sont implantés au bord d'un chenal, composé de plusieurs branches et dérivé du chenal principal d'orientation est-ouest :

- Mangali n° 278, n°279, n°276, n°275, n°288, n°274, n°271,
- Mirka n°289,
- Kaimri n°283,
- Singhran n°280, n°281.

D'autres établissements suivent ce dernier, d'ouest en est (Fig. 147) :

- Mirka n°273 (Fig. 183),
- Ladwa n°270 (Fig. 183),
- Dahima n°272 (Fig. 183),
- Runhat n°260 (Fig. 184),
- Hajampur n°250, n°247 et n°249 (Fig. 184),
- Paposi n°251 (Fig. 184),
- Bawani Khera n°240 (Fig. 184),
- Kungar n°237 ,
- Bhaini n°236 ,
- Talu n°233
- Mundahal Kalan n°235 .

Ainsi, dans le secteur de Bhiwani comme dans celui de Hisar, les relations entre le fonctionnement du chenal et la présence des sites paraissent également attestées. Que le chenal soit naturel n'exclut pas de probables remaniements locaux visant à utiliser au mieux les disponibilités en eau et à les amener par des rigoles jusqu'aux champs. De tels aménagements, très instables, car conçus le plus souvent pour répondre à des situations conjoncturelles : importance de l'alimentation du chenal ou situation des champs, ne peuvent être mis en évidence sur les images satellitaires, ni d'ailleurs au sol.

Fig. 178 : Secteur ouest (Bhadra- Hisar). Localisation des sites archéologiques entre Nangal (n°174) et Chhani Bari (n°189). Les numéros renvoient au tableau 34.



- sites protohistoriques
- sites historiques
- villages actuels



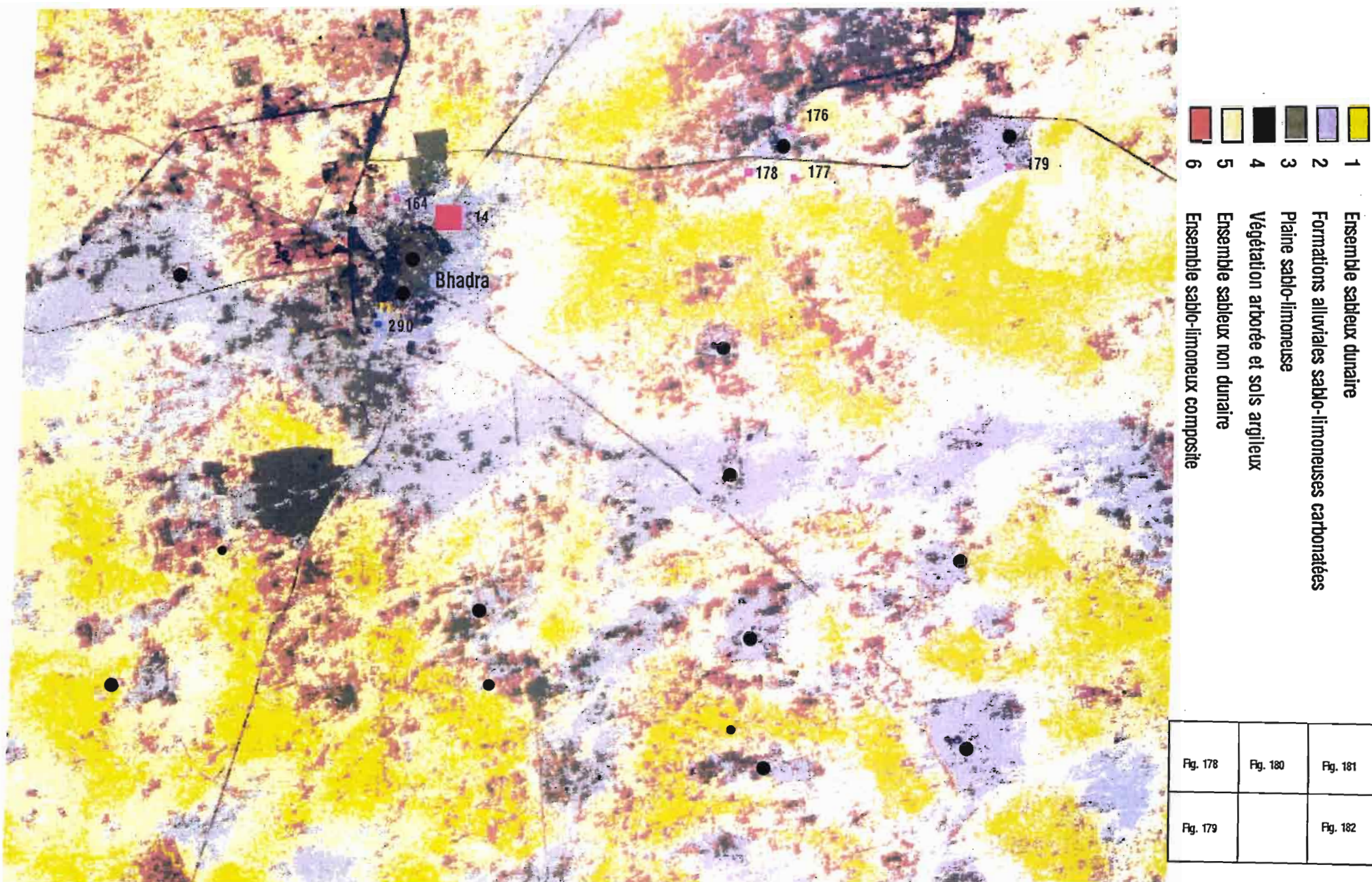


Fig. 179 : Secteur ouest (Bhadra- Hisar). Localisation des sites archéologiques autour de Bhadra. Les numéros renvoient au tableau 34.

0 5 km

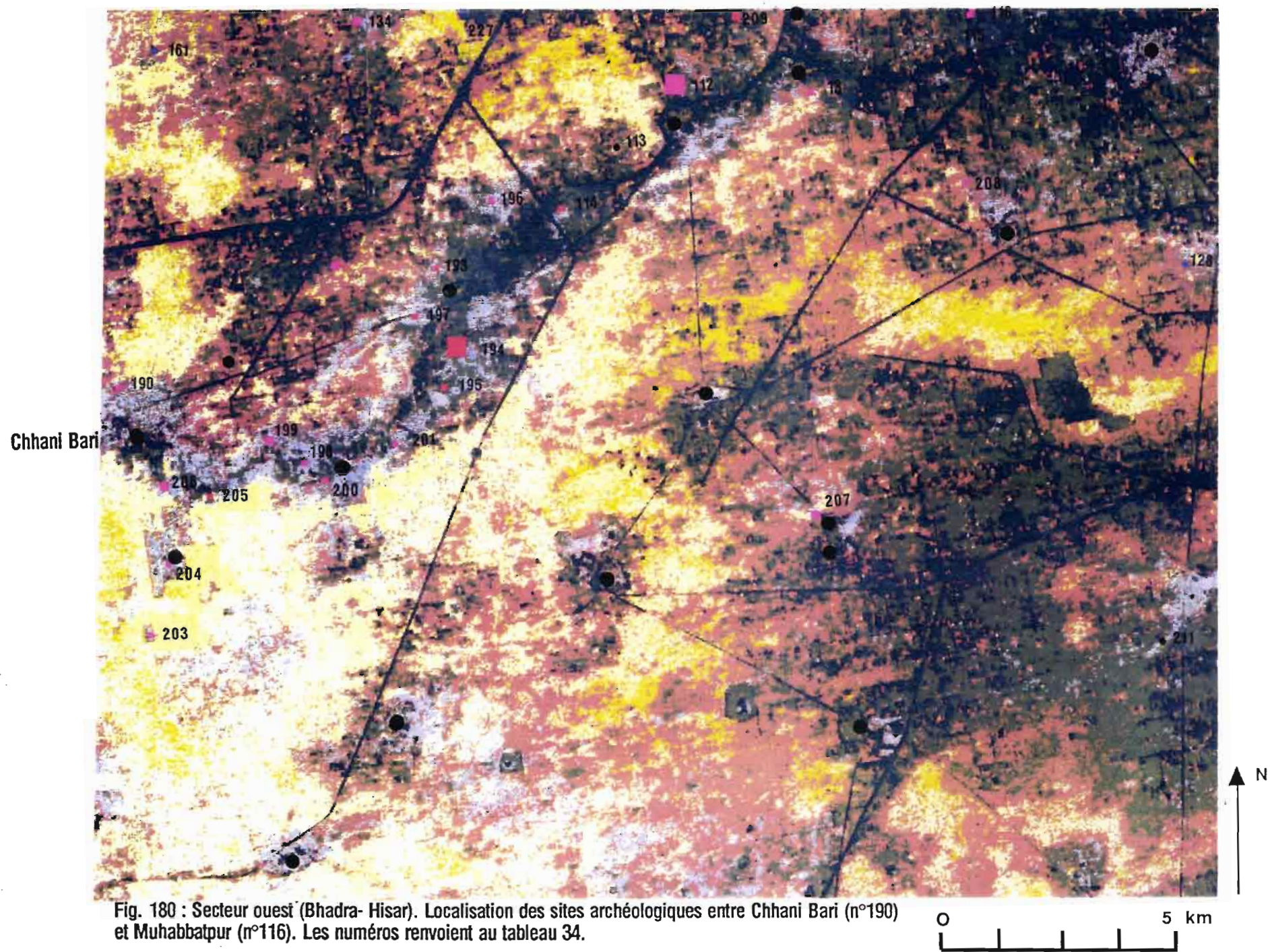
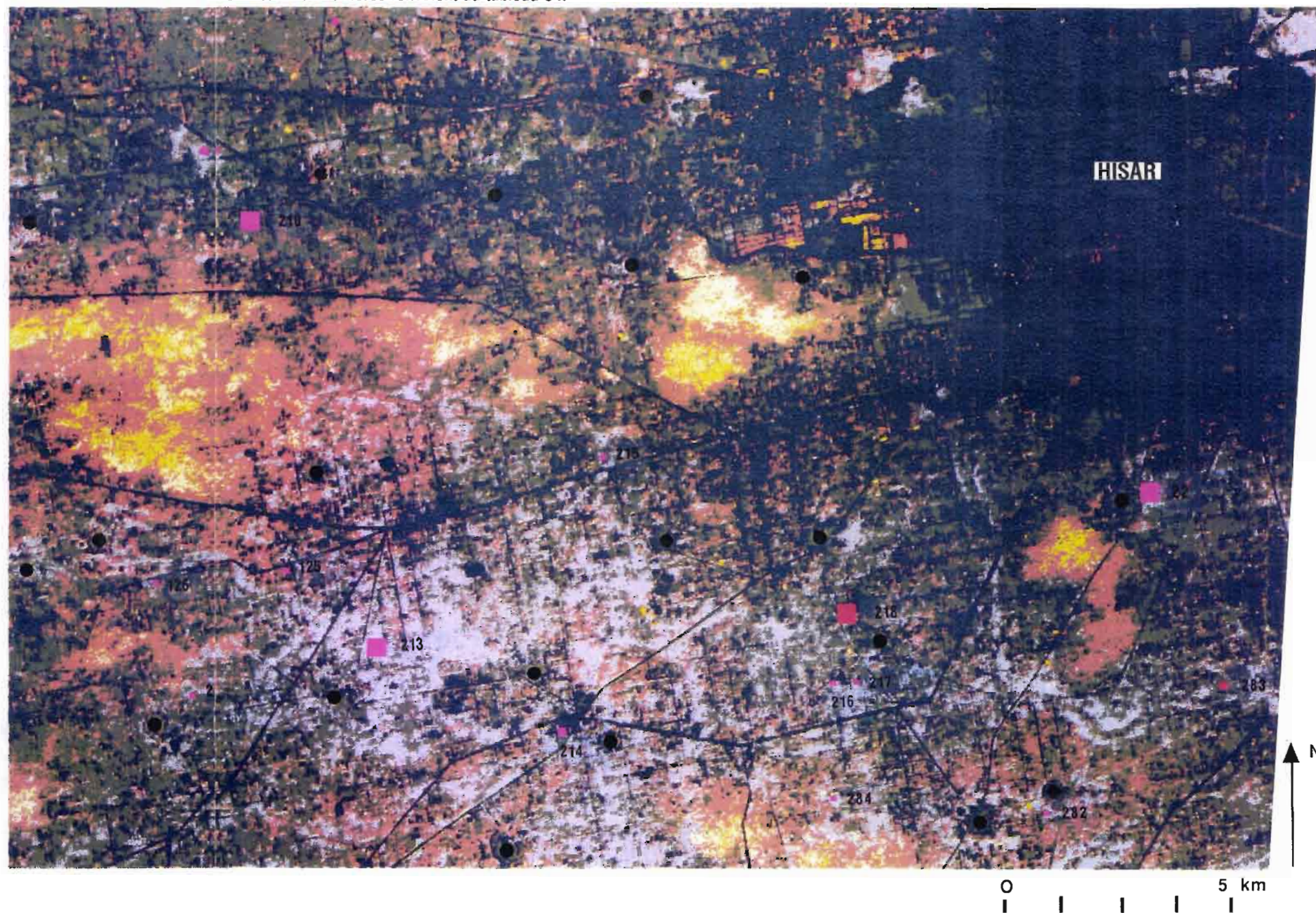


Fig. 181 : Secteur ouest (Bhadra- Hisar). Localisation des sites archéologiques entre Salemgarh (n°210) et Hisar. Les numéros renvoient au tableau 34.



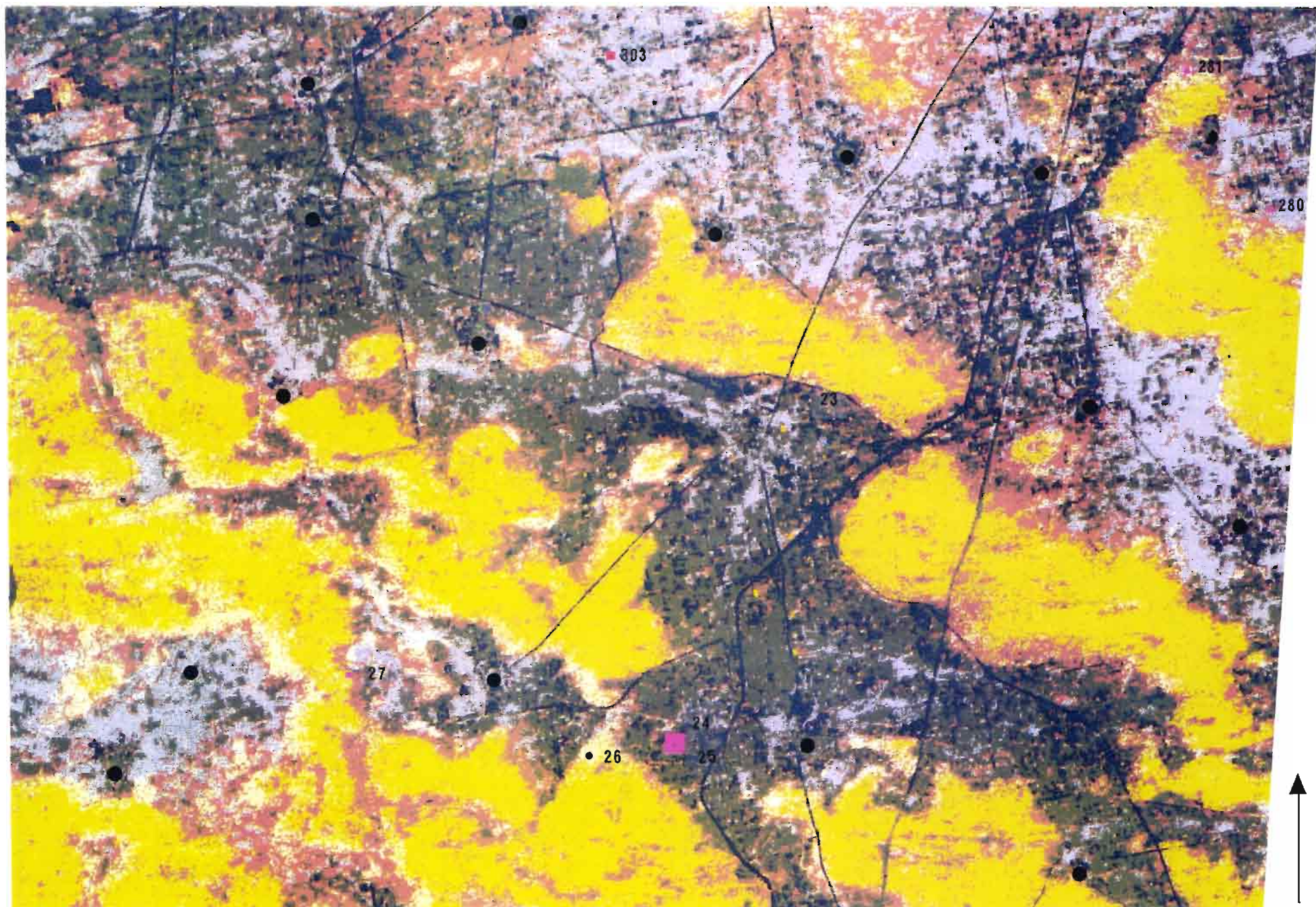


Fig. 182 : Secteur ouest (Bhadra- Hisar). Localisation des sites archéologiques au sud de Rawalwas (n°214. Fig. 181). Les numéros renvoient au tableau 34.

0 5 km

Tabl. 34 : Les sites archéologiques reportés sur l'image Spot 203-292 (secteur ouest : Bhadra - Hisar) : coordonnées géographiques, cartes topographiques de référence; superficie (1 : 0-0,1 ; 2 : 0,1-1 ; 3 : 1-2 ; 4 : 2-10, 5 : >10 hectares)

N°	Nom	Latitu.	Longit.	Carte	S	Distance (m)										
						PH	H	LH	PGW	NBR	K	FM	EMA	LMA		
						3000	2500	1800	1500	1000	500	0	500	1000	1500	1800
13	MUHABBATPUR	29°12	75°25	4408	2											
14	BHADRA	29°06	75°10	4404	5											
18	SHAIRPURA	29°09	75°14	4404	2											
19	SHAIRPURA	29°09	75°14	4404	3											
20	NINAN	29°10	75°16	4408	4											
21	NINAN	29°10	75°16	4408	1											
22	GANGUWA	29°06	75°42	44012	4											
23	CHAUDRIWAS	29°00	75°36	44P9	3											
24	BARWA	28°58	75°35	44P9	1											
25	BARWA	28°58	75°35	44P9	4											
26	JHANG-JOHRA	28°58	75°32	44P9	1											
27	GAWAR	28°59	75°35	44P9	1											
28	GURERA	28°55	75°31	44P9	1											
29	GURERA	28°54	75°31	44P9	2											
30	GURERA	28°54	75°31	44P9	1											
31	DHANAUTI-CHHOT	28°54	75°28	44P5	1											
32	DHANAUTI	28°55	75°27	44P5	1											
33	REJRI	28°56	75°27	44P5	1											
111	SALENGARH	29°11	75°33	44012	3											
112	MODAKHERA	29°13	75°25	4408	4											
113	MODAKHERA	29°12	75°24	4408	1											
114	JHANSAL	29°12	75°24	4408	2											
115	MUHABBATPUR	29°13	75°28	4408	1											
116	MUHABBATPUR	29°13	75°28	4408	1											
125	KHARIA	29°07	75°32	44012	1											
126	KHARIA	29°07	75°31	44012	2											
128	KABRER	28°11	75°30	44012												
134	BIRAN	29°14	75°22	4408	3											
161	JANANA	29°14	75°20	4408	2											
164	BHADRA	29°06	75°10	4404	2											
165	BHOJASAR	29°09	75°10	4404	1											
166	DUNGARWAS	29°09	75°11	4404	1											
167	BHOJASAR	29°09	75°11	4404	1											
168	GHANDI-BARI	29°12	75°12	4404	2											
169	GHANDI-CHIRIA	29°12	75°11	4404	4											
170	MALKHAIRA	29°10	75°12	4404	4											
171	SHAIRPURA	29°10	75°14	4404	1											
172	RAMGADHIA	29°08	75°15	4408	2											
173	RAMGADHIA	29°09	75°11		1											
174	NANGAL	29°08	75°13		2											

[illegible]

N°	Nom	Latitu.	Longit.	Carte	S	PH		H	LH		PGW	NBR		K	FM	EMA		LMA	
						3000	2500		1800	1500		1000	500			0	500	1000	1500
213	SISWALA	29°06	75°33	44012	4														
214	RAWALWAS	29°05	75°35	44012	3														
215	HINDUWAN	29°07	75°36	44012	1														
216	PATAN	29°05	75°38	44012	2														
217	PATAN	29°05	75°38	44012	1														
218	PATAN	29°06	75°38	44012	4														
224	JAKHAUD	29°12	75°34	44012	2														
227	UDRAN	29°13	75°23	4408	2														
228	KHERI	29°12	75°22	4408	3														
280	SINGHRAN	29°02	75°41	44012	2														
281	SINGHRAN	29°03	75°41	44012	1														
282	DEV	29°04	75°40	44012	1														
283	KAIMRI	29°04	75°42	44012	3														
284	MUKLAN	29°04	75°38	44012	1														
290	BHADRA	29°05	75°09	4404															
303	LADUWALA	29°04	75°36		3														



Datation sûre



Datation probable



Datation incertaine

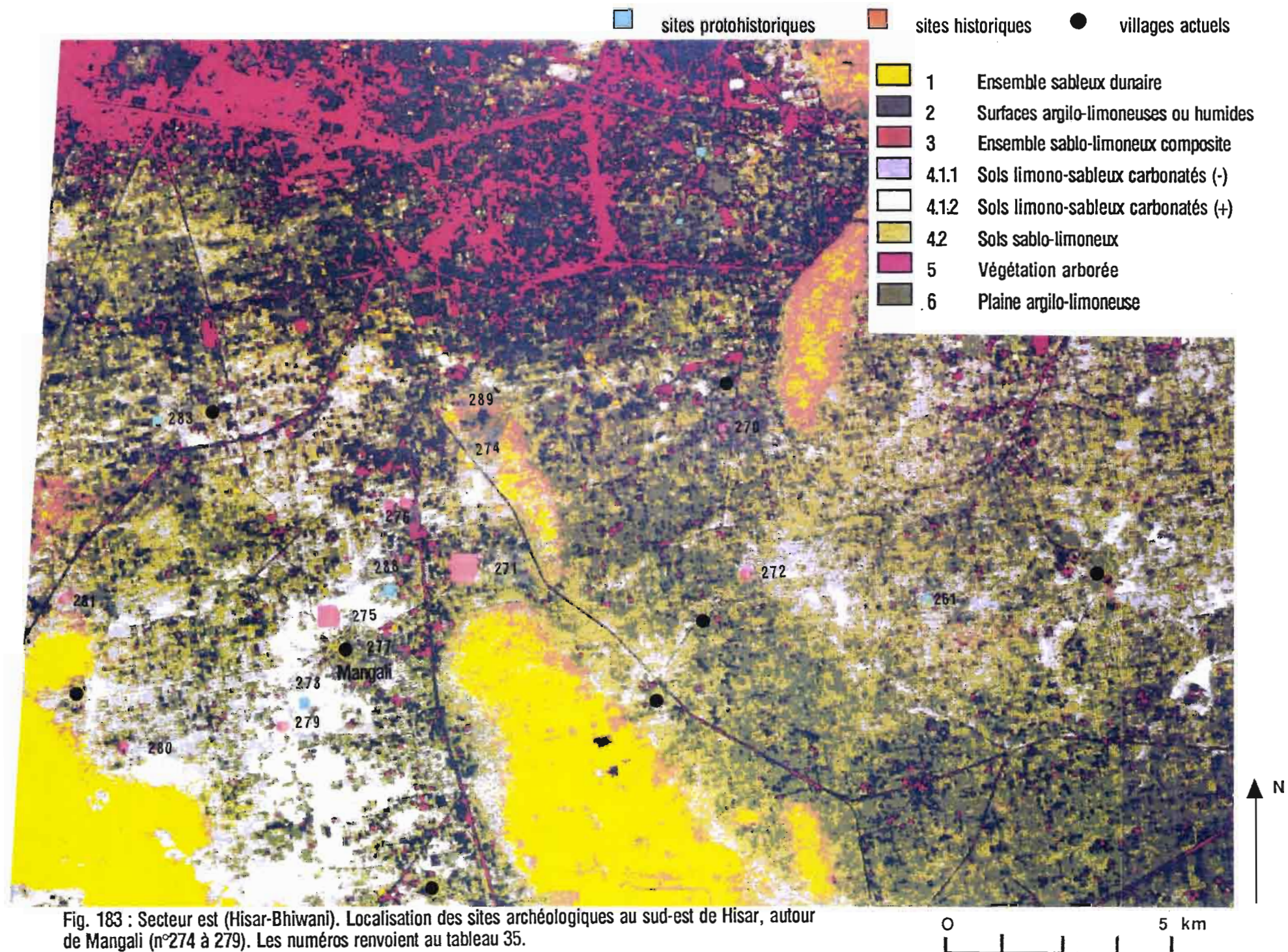


Fig. 183 : Secteur est (Hisar-Bhiwani). Localisation des sites archéologiques au sud-est de Hisar, autour de Mangali (n°274 à 279). Les numéros renvoient au tableau 35.

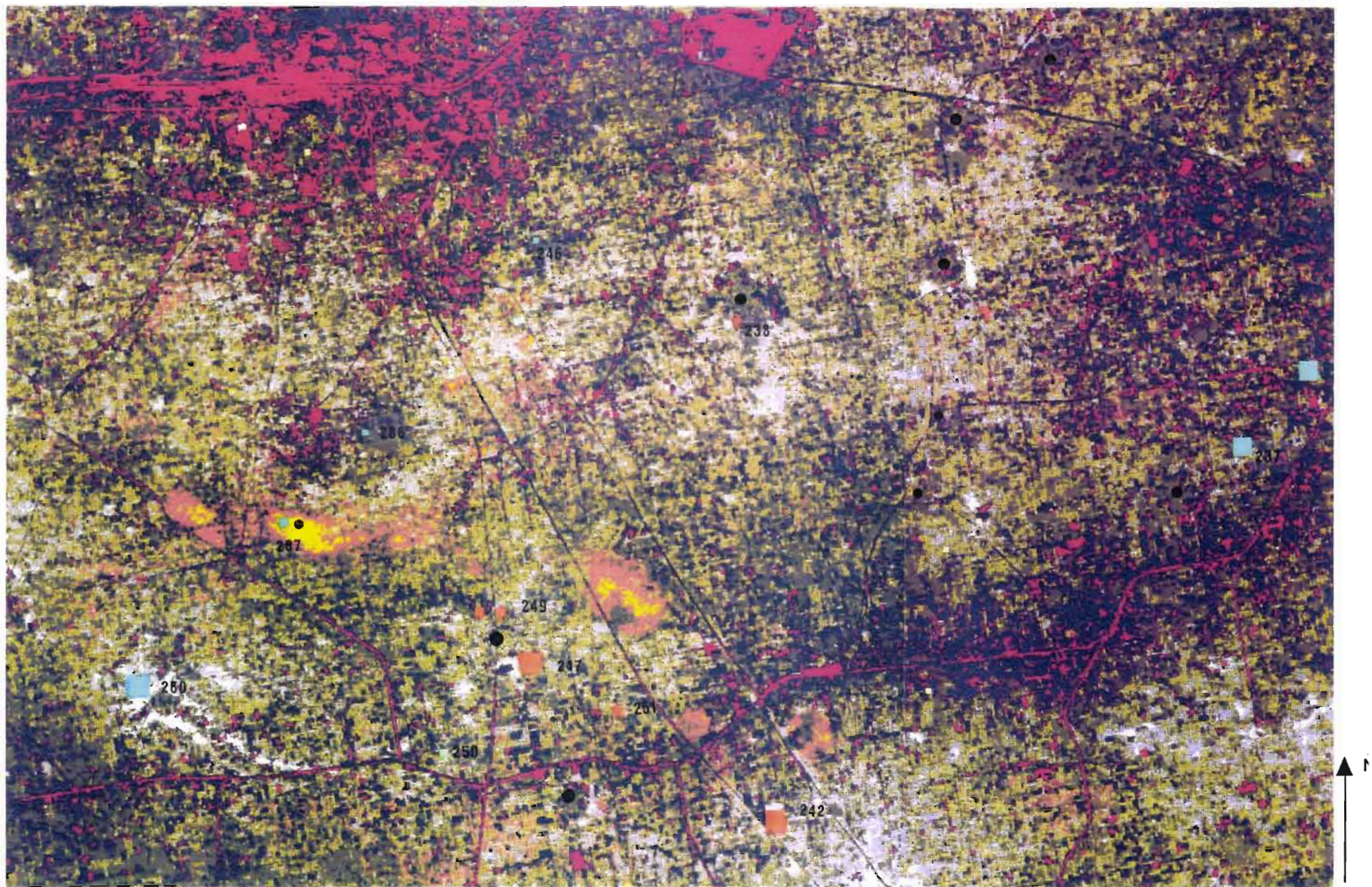


Fig. 184 : Secteur est (Hisar-Bhiwani). Localisation des sites archéologiques au sud de Hansi,
Les numéros renvoient au tableau 35.

0 5 km
| | | | |

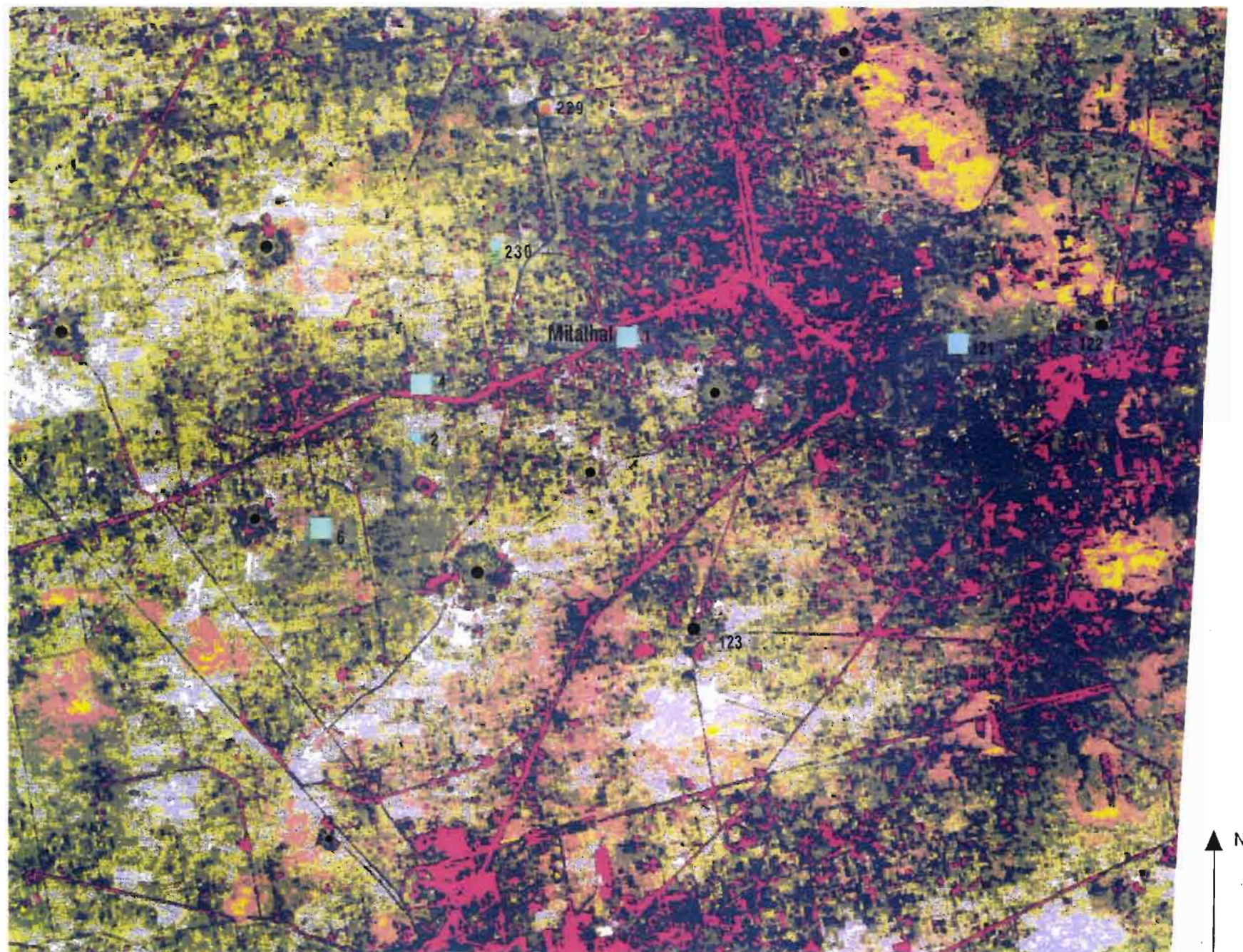


Fig. 185 : Secteur est (Hisar-Bhiwani). Localisation des sites archéologiques dans le secteur de Mitathal (n°1). Les numéros renvoient au tableau 35.

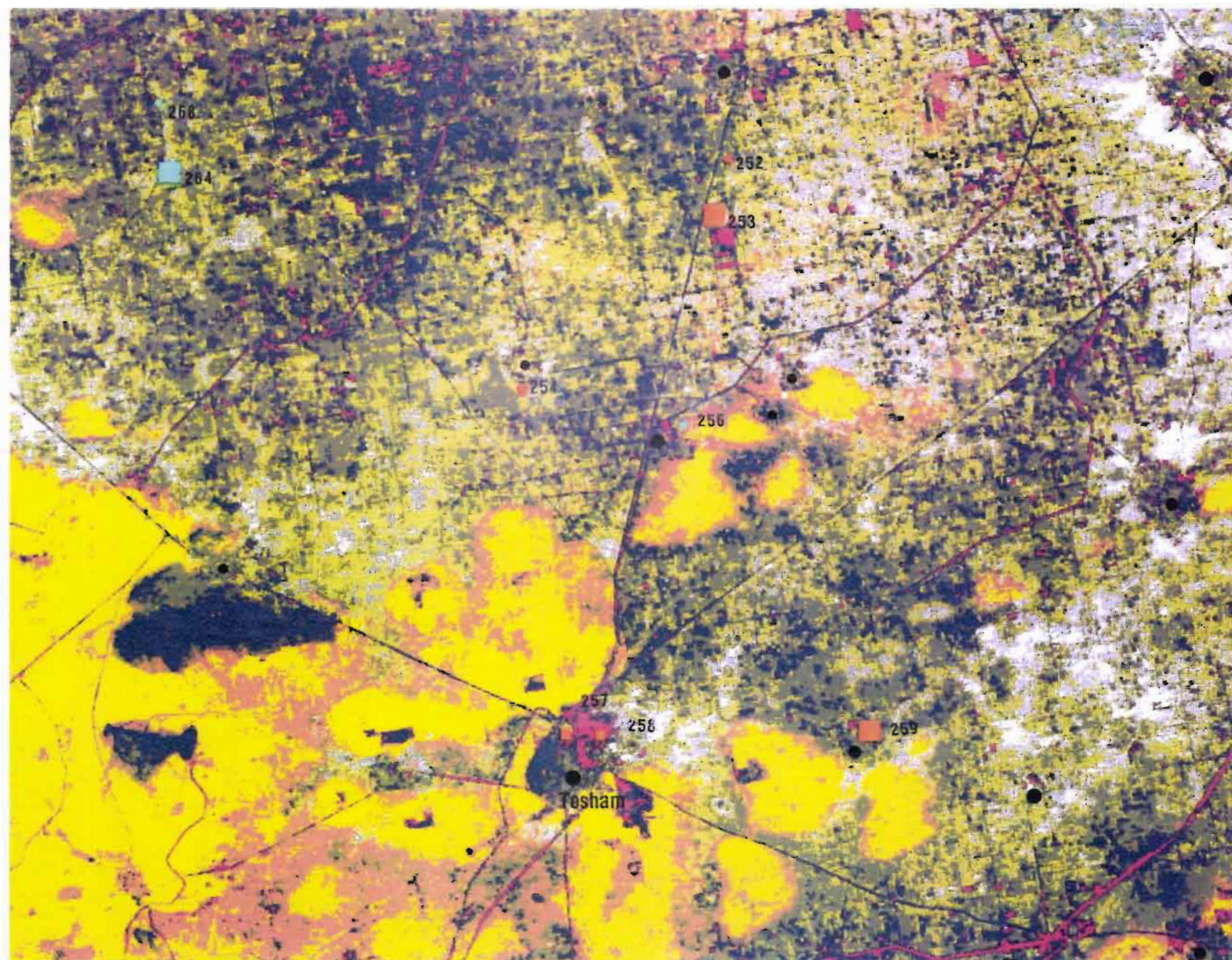


Fig. 186 : Secteur est (Hisar-Bhiwani). Localisation des sites archéologiques dans le secteur de Tosham (n°257 et 258). Les numéros renvoient au tableau 35.

Tabl. 35 : Les sites archéologiques reportés sur l'image Spot 204-292 (secteur est : Hisar - Bhiwani) : coordonnées géographiques, cartes topographiques de référence; superficie (1 : 0-0,1 ; 2 : 0,1-1 ; 3 : 1-2 ; 4 : 2-10, 5 : >10 hectares)

N°	Nom	Latitu.	Longit.	Carte	S	Distance (km)										
						PH	H	LH	PGW	NBH	K	FM	EMA	LMA		
1	MITATHAL	28°53	76°10	53D1	4	3000	2500	1800	1500	1000	500	0	500	1000	1500	1800
2	TIGRI	28°53	76°08	53D1	2											
4	TIGRI	28°53	76°08	53D1	4											
6	TIGRI	28°52	76°07	53D1	4											
117	LOHARI-JATU	28°54	75°04	53D1	2											
118	LOHARI-JATU	28°54	76°03	53D1	1											
119	LOHARI-JATU	28°53	76°04	53D1	1											
120	DHANANA	28°57	76°12	53D1	2											
121	CHANG	28°53	76°13	53D1	4											
122	CHANG	28°52	76°14	53D1	1											
123	GUJRANI	28°50	76°10		1											
229	DHANANA	28°55	76°09	53D1	1											
230	DHANANA	28°54	76°09	53D1	3											
232	KHERA-WALA-AHE	28°56	76°01	53D1	2											
233	TALU	28°59	76°09	53D1	4											
234	TALU	28°59	76°10	53D1	3											
235	MUNDAHAL-KALAN	29°00	76°10	53C4	4											
236	BHAINI	29°02	76°07	53C4	4											
237	KUNGAR	29°01	76°06	53C4	4											
238	MEHNDI-DHANI	29°02	76°04	53C4	1											
239	SIWANA	29°00	76°03	53C4	1											
240	BAWANI-KHERA	28°59	76°02	53D1	1											
241	SIWANA	29°00	76°03	53D1	2											
242	BAWANI-KHERA	28°59	76°00	53D1	4											
243	BAWANI-KHERA	28°57	76°02	53D1	1											
244	MALAKPUR	29°02	75°59	44O16	2											
245	BARSI	29°02	76°01	53C4	1											
246	CHORTAPUR	29°04	75°59		1											
247	HAJAMPUR	28°59	75°58	44P13	4											
248	DHANI-RAJUWALI	29°04	75°57	44O16	2											
249	HAJAMPUR	29°00	75°58	44O16	3											
250	HAJAMPUR	28°59	75°57	44P13	3											
251	PAPOSA	28°58	75°59	44P13	1											
252	JAMALPUR	28°56	75°57	44P13	2											
253	JAMALPUR	28°56	75°57	44P13	1											
254	KIRAWAR	28°55	75°55	44P13	1											
255	BHURTANA	28°55	75°57	44P13	2											

N°	Nom	Latitu.	Longit.	Carte	S	PH		H	LH	PGW	NBR	K	PM	EMA	LMA
						3000	2500								
256	ALAKHPURA	28°54	75°56	44P13	2										
257	TOSHAM	28°59	75°54	44P13	3										
258	TOSHAM	28°52	75°55	44P13	3										
259	SAGBAN	28°52	75°57	44P13	4										
260	RUNHAT	29°00	75°54	44016	4										
261	SULTANPUR	29°02	75°51	44016	2										
262	KUMARI	28°59	75°49	44P13	3										
263	RATERA	28°57	75°52	44P13	4										
264	MUJAHADPUR	28°58	75°52	44P13	1										
265	DHANDERI	29°03	75°53	44016	2										
266	DAREMSALAH	29°04	75°54	44016	3										
267	BHAGANA	29°04	75°51	44016	1										
268	BHAGANA	29°03	75°51	44016	1										
269	SATROD-KALAN	29°06	75°49	44016	3										
270	LADWA	29°03	75°48	44016	2										
271	MANGALI	29°03	75°45	44016	5										
272	DAHIMA	29°02	75°48		2										
273	MIRKA	29°04	75°45	44016	1										
274	MANGALI	29°03	75°45	44016	3										
275	MANGALI	29°02	75°44	44012	4										
276	MANGALI	29°03	75°44	44012	1										
277	MANGALI	29°02	75°44	44012	1										
278	MANGALI	29°02	75°43	44012	2										
279	MANGALI	29°01	75°43	44012	3										
280	SINGHRAN	29°02	75°41	44012	2										
281	SINGHRAN	29°03	75°41	44012	1										
283	KAIMRI	29°04	75°42	44012	3										
285	SATROD-KALAN	29°05	75°48	44016	1										
286	PUTHI-MANGAL	29°02	75°57	44016	2										
287	PUTHI-MANGAL	29°01	75°56	44016	3										
288	MANGALI	29°02	75°44	44012	3										
289	MIRKA	29°04	75°45	44016											



Datation sûre



Datation probable



Datation incertaine

Excepté six d'entre eux, les sites harappéens ont connu durant l'époque Rang Mahal une nouvelle phase d'occupation (Fig. 169). Parmi ces exceptions, les plus frappantes sont les grands sites de Mitathal (n°1) et de Tigri (n°4 et n°6) (Fig. 185) qui se trouvent dans des secteurs moins densément occupés durant la période historique.

1.1.3.3. Les sites médiévaux

A l'est, dans la dépression de la Chautang, comme à l'ouest, la période médiévale est caractérisée par un nombre plus faible de sites. Là aussi, il faut s'interroger sur le sens de la distinction entre les périodes Rang Mahal et médiévale et de celle qui sépare les périodes médiévale ancienne et médiévale récente qui ne présentent aucun changement quant à la localisation des établissements humains. Si l'on compte moins de sites médiévaux, ce fait a-t-il une cause ou est-ce un artefact ? Et beaucoup de villages actuels ne sont-ils pas construits sur des vestiges médiévaux ? Dans ce cas, il faudrait connaître leur nombre pour dresser une carte du peuplement durant la période médiévale.

1.2. L'ensemble éolien

Dans le périmètre prospecté, c'est-à-dire l'espace compris entre Bhadra, Hisar et Bhiwani, on n'a pas retrouvé de vestiges d'habitat ancien sur les dunes (unités 1-203 et 1-204) (Fig. 149 à 158). Par ailleurs on ne connaît pas la densité d'occupation aux époques anciennes des très grandes dépressions interdunaires situées au sud de la route reliant Balsamand à Bhadra (Fig. 179-182), hors du secteur prospecté. Ces dépressions sont actuellement occupées par des villages et présentent en effet de nombreux atouts puisque les eaux ruisselées et infiltrées au bas des dunes s'y concentrent. Elles sont par ailleurs composées de sols sablo-limoneux qui retiennent l'eau mieux que les sables et peuvent être plus facilement travaillées que les sols argileux. L'eau y est plus abondante qu'ailleurs et, sans recours à l'irrigation, les paysans parviennent à y cultiver du blé en hiver et des plantes *khari*f (*moth*, *gowar*) en été. Les dunes environnantes sont utilisées pour le pâturage des troupeaux de chèvres. On peut donc se demander si l'implantation des villages y est un fait actuel ou récent répondant à une pression démographique accrue et à la nécessité de "coloniser" de nouveaux espaces, ou bien si les avantages présentés par ce type de localisation avaient déjà été reconnus et exploités aux époques anciennes. Les prospecter pourrait être intéressant pour l'étude des limites spatiales du peuplement de la région.

Si les dunes n'ont pas été habitées aux époques anciennes, les ensembles dits de transition entre la plaine et le secteur dunaire l'ont été.

Les espaces situés en périphérie de la dépression de la Chautang, caractérisés par des sables carbonatés et par une topographie plutôt plane (unité 203-5) ne sont occupés que durant la période historique (Fig. 150 à 158). Ceux représentés par l'unité 203-6, moins nettement sableux, ont connu une occupation protohistorique, mais l'occupation historique y est plus dense.

La pression démographique était plus forte durant la période historique que durant la période harappéenne. Le manque de place peut avoir poussé les habitants de la région à coloniser des espaces peut-être moins favorables -car moins humides- que la plaine limoneuse. De nouveaux villages sont ainsi installés en périphérie. Pour confirmer cette hypothèse, on remarquera que les sites protohistoriques sont tous, sans exception, réoccupés à cette époque (Fig. 169). L'occupation des espaces périphériques correspond à de nouveaux sites et n'induit pas un abandon des secteurs précédemment habités.

2. L'OCCUPATION HUMAINE ANCIENNE DANS LA PLAINE DE LA HAKRA ENTRE FORT ABBAS ET KHANPUR

2.1. Les données

Les caractéristiques propres à l'acquisition des données qui ont servi de base à cette analyse méritent d'être exposées car elles ont déterminé, dans une large mesure, les limites de notre intervention dans la solution des problèmes posés.

Selon Mughal (1981, 1982), une bande de 483 km de long sur 16 à 24 km de large et qui correspond au petit Cholistan, aurait été explorée de façon systématique (Chap. I. 2.3.1). Mais nous ne savons pas, à l'intérieur de ce périmètre désertique et à l'échelle de l'image satellitaire, quels secteurs ont été effectivement prospectés, ni selon quelle maille spatiale. De ce fait il est difficile d'interpréter les vides qui apparaissent en certains endroits sur la carte des sites.

Par ailleurs, nous ne savons pas comment ont été déterminées les coordonnées géographiques des établissements anciens dont nous voulons étudier la localisation par rapport aux différents types d'environnements individualisés sur l'image. Le recalage des sites sur les images, fondé sur l'hypothèse de l'existence d'une relation linéaire entre coordonnées images et coordonnées terrain, s'est donc avéré moins fiable que pour le secteur de Hisar où la bonne localisation des sites sur les images pouvait être vérifiée, sur le terrain ou par comparaison aux cartes au 1/50 000 sur lesquelles elle avait été reportée lors des campagnes de prospection. La qualité de la représentation n'a pu être confirmée dans le Cholistan que pour les forts, Derawar, Dingarh, Marot, pour quatre grands sites visibles sur les images, et pour quelques autres mentionnés sur les cartes topographiques au 1/250 000. Notre analyse se situera donc, pour ce secteur, à une échelle plus petite que pour

celui de Hisar. Nous considérerons la répartition globale des sites par rapport aux unités géomorphologiques, sans nous arrêter sur la superposition des pixels-sites aux unités radiométriques, superposition dont la signification devient (dans ce cas) moins fiable à mesure que le niveau de détail augmente.

Grâce à une étude minutieuse des vestiges de surface, il a été possible à M. R. Mughal d'établir un classement des sites selon leur fonction. Selon lui, certains vestiges de villages et le matériel qu'on y a recueilli témoignent d'une occupation permanente (*settlement sites* (1980, p. 16)). Les sites peuvent présenter plusieurs horizons culturels, qui attestent une occupation prolongée, qui peut être discontinue dans le temps. En revanche, la petite taille de certains *thers*, leur faible hauteur relative ainsi que la faible épaisseur des débris (qu'il ne faut pas forcément interpréter comme les marques d'une dégradation poussée), pourraient révéler la présence d'habitats temporaires, de campements (*camp sites of temporary occupation*) qui auraient pu être contemporains des installations sédentaires. Ils constitueraient les traces d'une population de pasteurs qui auraient exploité les ressources du désert pendant la majeure partie de l'année pour élever bétail, chèvres, moutons et chameaux, et qui auraient vécu en symbiose avec les populations installées de façon permanente dans les villages, dont l'économie reposait essentiellement sur l'agriculture (Mughal, 1980). Des sites qu'il qualifie d'"exclusivement artisanaux" (*industrial sites*), auraient par ailleurs pu être identifiés, notamment par la présence de nombreux fours (*op. cit.*). Ces activités artisanales pouvaient aussi être intégrées à l'habitat sédentaire. C'est la quatrième classe de sites mise en évidence par Mughal, à laquelle s'ajoutent une classe regroupant les nécropoles et une autre, les monuments (Tabl. 36).

Tabl. 36 : Nombre de sites recensés pour chaque période et chaque fonction (d'après Mughal, 1980)

	CERAMIQUE HAKRA	HARAPPEEN ANCIEN	HARAPPEEN	HARAPPEEN TARDIF	CERAMIQUE GRISE PEINTE	HISTOIRE ANCIENNE & MEDIEVALE
Nombre de sites	99	40	174	50	14	37
HABITAT	45	23	50	14	14	?
HABITAT + ARTISANAT	2	14	33	14	0	0
ARTISANAT	0	0	79	9	0	0
HABITAT TEMPORAIRE	52	3	10	13	0	?
NECROPOLE	0	0	2	0	0	0
MONUMENT	0	0	0	0	0	20 ?
HABITAT sédentaire, temporaire, habitat+ artisanat	97	40	95	41	14	17

Les sites qualifiés par Mughal d'"exclusivement artisanaux" apparaissent principalement à la période harappéenne mûre, et il en subsiste quelques-uns durant la phase suivante. Ceux où sont associés habitat et industrie sont, en proportion, deux fois plus nombreux durant les phases harappéenne ancienne et tardive que durant la phase mûre. On trouve des sites d'habitat temporaire durant toute la protohistoire, sauf à l'époque PGW, avec

une prédominance au cours de la période de la céramique Hakra. Les monuments sont tous datés des périodes antique ou médiévale.

Que M. R. Mughal ait pu, par la seule observation des vestiges retrouvés en surface, déterminer la fonction des sites pourrait peut-être susciter quelques débats sur le plan archéologique. Nous n'avons pas pris en compte ces distinctions, considérant que même si elles se révélaient parfaitement fiables, elles n'influeraient pas sur l'étude des aires de peuplement. En effet, a priori, les fonctions identifiées ne sont pas déterminantes quant au choix de l'environnement des sites ; de même, l'environnement ne peut être considéré comme un facteur déterminant la fonction des sites. Quel qu'il soit, le site témoigne de l'occupation de l'espace sur lequel il se trouve. La fonction aurait été une variable intéressante si les données avaient permis d'associer à un type de site des aires cultivées. Mais sur le plan spatial, anciens villages ou fours de cuisson des poteries ne sont que des objets porteurs d'une signification strictement locale.

En revanche, la variable "fonction" peut être prise en compte dès qu'il s'agit d'évaluer la densité de population qui vivait dans la région : les sites "exclusivement artisanaux" devraient logiquement être extraits de la carte des sites pour en rendre compte. Les "sites d'installation temporaire" devraient aussi faire l'objet d'une carte distincte.

De même, la surface occupée par les sites ne pourrait être une variable significative que dans la mesure où des corrélations pourraient être établies entre surface et population ainsi qu'entre surface et fonction.

2.2. La localisation des sites

De la localisation des sites par rapport aux images des niveaux II, III et IV de l'analyse typologique, il ressort que, dans le quart sud-ouest de la scène, où se trouvent situés 203 d'entre eux :

- 89 % des surfaces occupées par des installations anciennes sont situées dans la zone actuellement désertique (unité 2 ; Fig. 60). Mais 1/ la zone irriguée (unité 1 ; 60) n'a pas fait l'objet d'une prospection systématique, 2/ les sites ont moins de chance d'avoir été conservés dans ce secteur qui a été profondément modifié.
- 88 % des pixels-sites situés dans la zone désertique appartiennent à l'ensemble alluvial (unité 2.2 ; Fig. 66). Mais le secteur des hautes dunes (unité 2.1) n'a pas été dans l'ensemble, prospecté, et les quelques sites identifiés sont au contact de l'ensemble alluvial. Ils attestent cependant l'ancienneté des dunes, puisque des sites datés de 3500-3000 av. J.-C. ont été retrouvés au sommet des accumulations sableuses aux environs de Derawar (Mughal, 1980).
- Au niveau IV de l'analyse, seulement 22% des vestiges d'habitats anciens ont été recensés sur les dunes fixées par la végétation (unité 2.1.2), mais celles-ci s'étendent

surtout vers l'intérieur de la zone dunaire, secteur peu accessible qui n'a pas été prospecté.

- Dans le domaine alluvial, 51 % des pixels-sites sont superposés aux surfaces limono-sableuses où la présence de gypse a pu être mise en évidence (unité 2.2.2). Les surfaces salées (unité 2.2.3) et sableuses périphériques (unité 2.2.1) comptent respectivement 22 et 27 % des pixels sites.

Si l'on cherche, par exemple au sein de l'ensemble alluvial, à étudier la localisation des sites à un niveau de détail plus fin que le niveau III ou le niveau IV, les résultats sont à la fois moins fiables (les sites ont plus de chance d'être mal localisés) et moins significatifs (les types d'environnements sont moins bien individualisés qu'à des niveaux de détail plus bas).

Selon Mughal (1980, 1981, 1982) les données archéologiques prouvent que la plaine d'inondation de la Hakra était densément peuplée entre 4000 et 1000 avant J.-C., c'est-à-dire depuis la période de la céramique Hakra jusqu'à la fin de la période harappéenne tardive. Cette forte densité de population suggérerait selon lui des "moyens de subsistance stables". Cette proposition nous paraît relever d'une utilisation quelque peu abusive des données archéologiques.

- 1- Ces données ne permettent pas d'évaluer en effet la population de la région aux époques considérées. Aucune corrélation (fiable), aucune règle, n'a pu encore être établie entre la surface d'un site, c'est-à-dire ici toute surface recouverte de tessons de poteries, et le nombre de ses habitants à l'époque où il était fonctionnel. Aucune fouille n'a permis de déterminer de quel type d'installation il s'agissait : un maison ? plusieurs ? un village ?
- 2- Le nombre de sites n'est pas non plus représentatif selon nous de la densité du peuplement. C'est un nombre artificiel créé par le choix d'une certaine échelle temporelle déterminée par des critères d'ordre culturel. Nous savons ainsi que les sites appartenant à une phase culturelle donnée étaient occupés par des gens présentant sur le plan culturel ou sur celui des activités artisanales, entre autres, les mêmes caractères. Rien ne nous indique que ces sites étaient occupés en même temps. Le pas de temps permettant de rendre compte de la durée d'existence d'un village n'est pas forcément celui qui a été choisi, ou qui est imposé par la nature des traces qui subsistent (ici entre trois cents et cinq cents ans).

On pourrait ainsi parfaitement, avec les mêmes données, aboutir à une interprétation inverse de celle proposée par M. R. Mughal. Le grand nombre de sites pourrait être considéré comme le signe d'une instabilité, traduire la nécessité d'une adaptation fréquente à des conditions physiques changeantes par exemple. Comme c'est le cas actuellement dans le Cholistan, des installations abandonnées ont pu coexister avec des installations fonctionnelles durant une même phase culturelle.

Par ailleurs, on peut penser avec Mughal que, dans une région de marge désertique, les activités pastorales devaient constituer une part importante de l'économie. Or, activités agricoles et pastorales ne sont pas forcément exclusives : deux sites peuvent être habités, à des moments de l'année différents (en fonction de la répartition des pluies par exemple) par les mêmes personnes.

En l'absence de données supplémentaires, le nombre de sites ne peut donc être considéré comme une variable représentative de la densité de l'occupation de la région aux époques anciennes. En revanche, l'épaisseur des dépôts archéologiques permet d'évaluer la durée de l'occupation d'un site. Beaucoup (proportion inconnue précisément) ont été nivelés, d'autres atteignent des hauteurs relative de 9 m. Mais un seul site a fait l'objet d'un relevé stratigraphique.

Selon Mughal, la répartition des sites aurait été déterminée par des changements hydrographiques (chap. I.4.3.2) survenus 1/ au milieu du III^e millénaire av. J.-C. (au début de la période harappéenne mûre) 2/ durant le second millénaire av. J.-C. (à partir de la période harappéenne tardive).

- 1 - Le fait que les installations datées de la période de la céramique Hakra (3500-3100 av. J.-C.) et de la période harappéenne ancienne (3100-2500 av. J.-C.) entre Fort Abbas à la frontière indo-pakistanaise et Kudwala soient plus nombreuses que les installations de l'époque harappéenne mûre prouverait selon lui que la rivière s'est asséchée dans ce secteur au début de cette dernière période (Fig. 187 et 188).
- 2 - Pendant que l'alimentation de la Hakra aurait diminué en amont de Kudwala, la partie du cours située en aval, vers Derawar, et supposée alimentée par le Sutlej, aurait été encore une rivière pérenne, comme le prouverait la concentration de sites dans ce secteur durant la période harappéenne mûre (Fig. 189).
- 3 - L'assèchement définitif de la Hakra serait survenu vers 1500 av. J.-C. si l'on en croit l'absence d'occupation post-harappéenne, à l'exception de quelques sites PGW situés dans le lit de la rivière entre Fort Abbas et Kudwala (Fig. 190 et 191).

Si l'on suit le raisonnement de M. R. Mughal, on se demande pourquoi, si la totalité du cours de la rivière était fonctionnelle et pérenne, le peuplement est resté limité à huit sites seulement durant la période de la céramique Hakra entre Fort Abbas et Kudwala alors qu'il était déjà dense vers Derawar. Et même si l'on exclut l'hypothèse d'une alimentation en eau pérenne de ce secteur, la question reste posée. On peut se demander si les phases de la

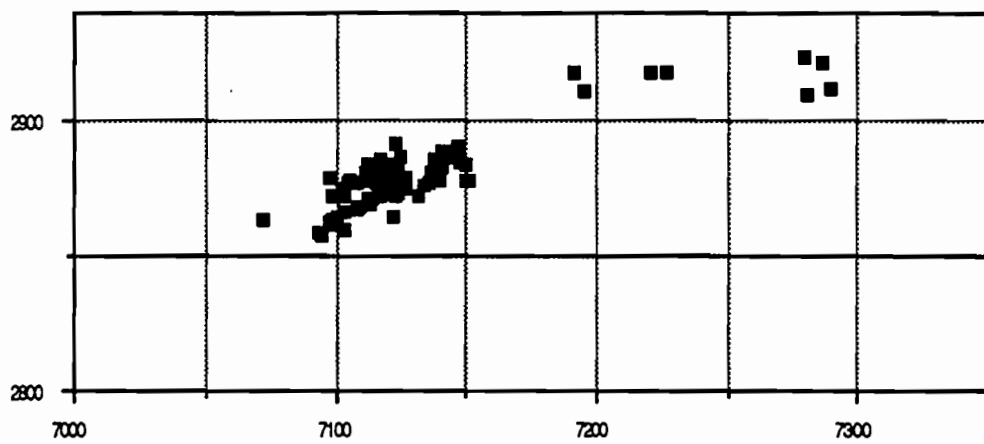


Fig. 187 : Distribution des sites de la période Hakra Ware d'après les données de M. R. Mughal (1980)

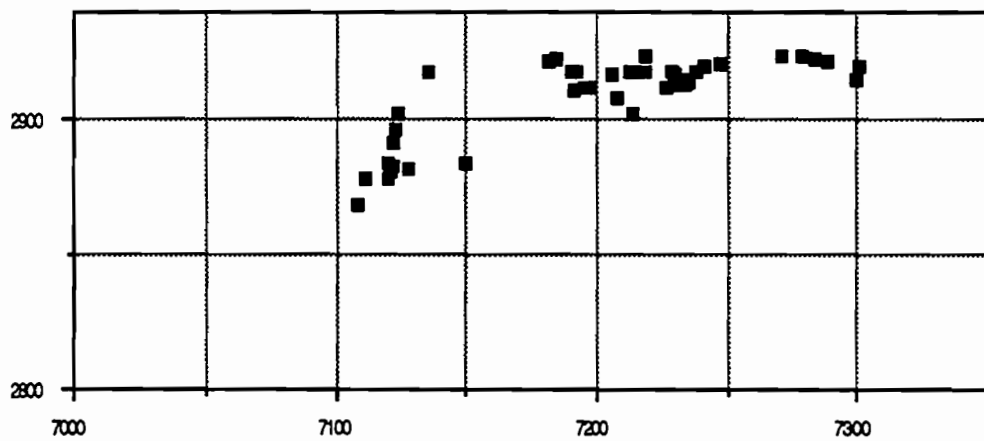


Fig. 188 : Distribution des sites de la période "harappéenne ancienne" (Early Harappan) d'après les données de M. R. Mughal (1980)

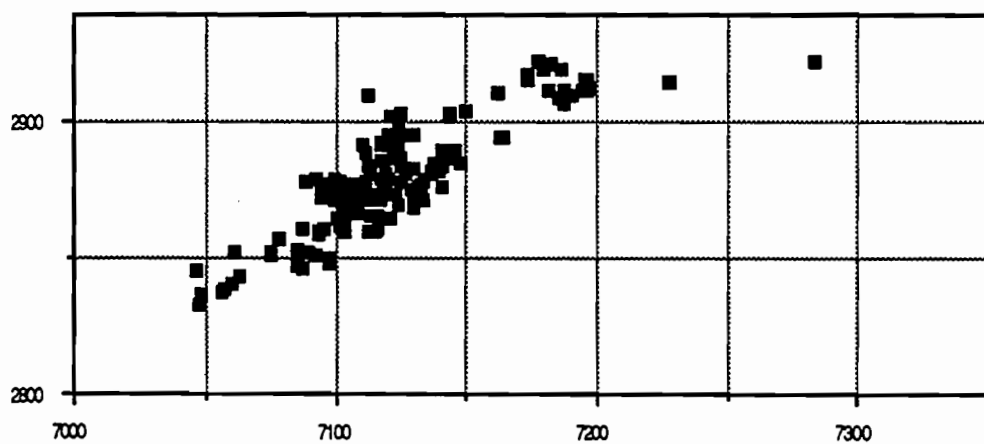


Fig. 189 : Distribution des sites de la période harappéenne mûre (Mature Harappan) d'après les données de M. R. Mughal (1980)

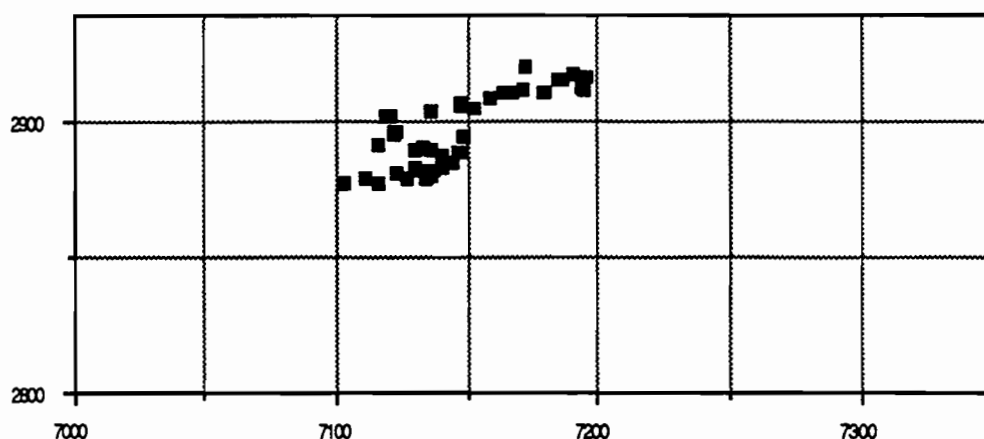


Fig 190 : Distribution des sites datés de la période harappéenne tardive (Late Harappan) d'après les données de M. R. Mughal (1980)

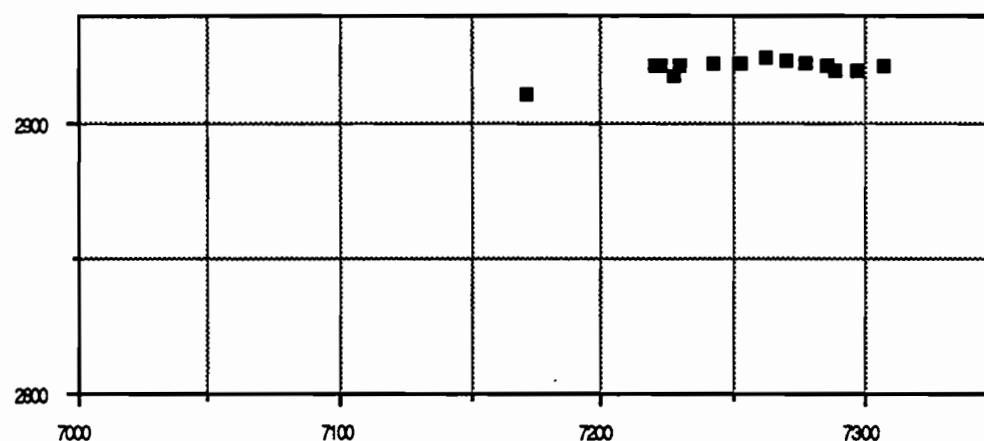


Fig 191 : Répartition des sites datés de la période de la céramique grise peinte (Painted Grey Ware) d'après les données de M. R. Mughal (1980)

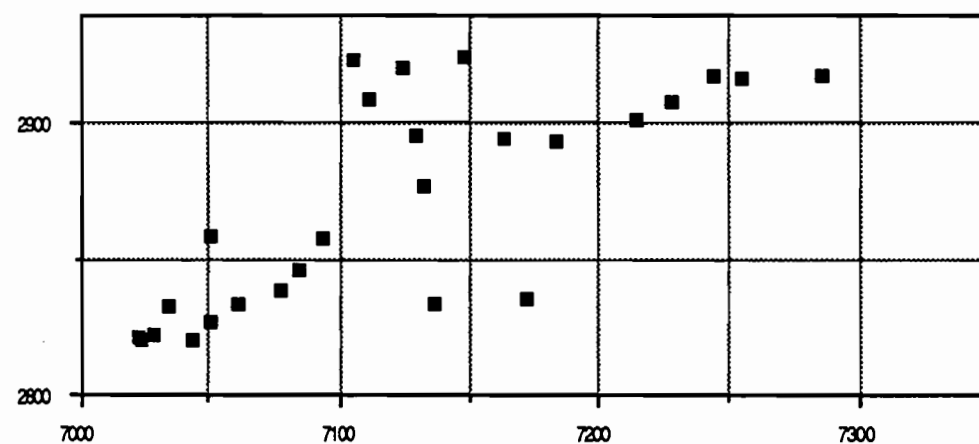
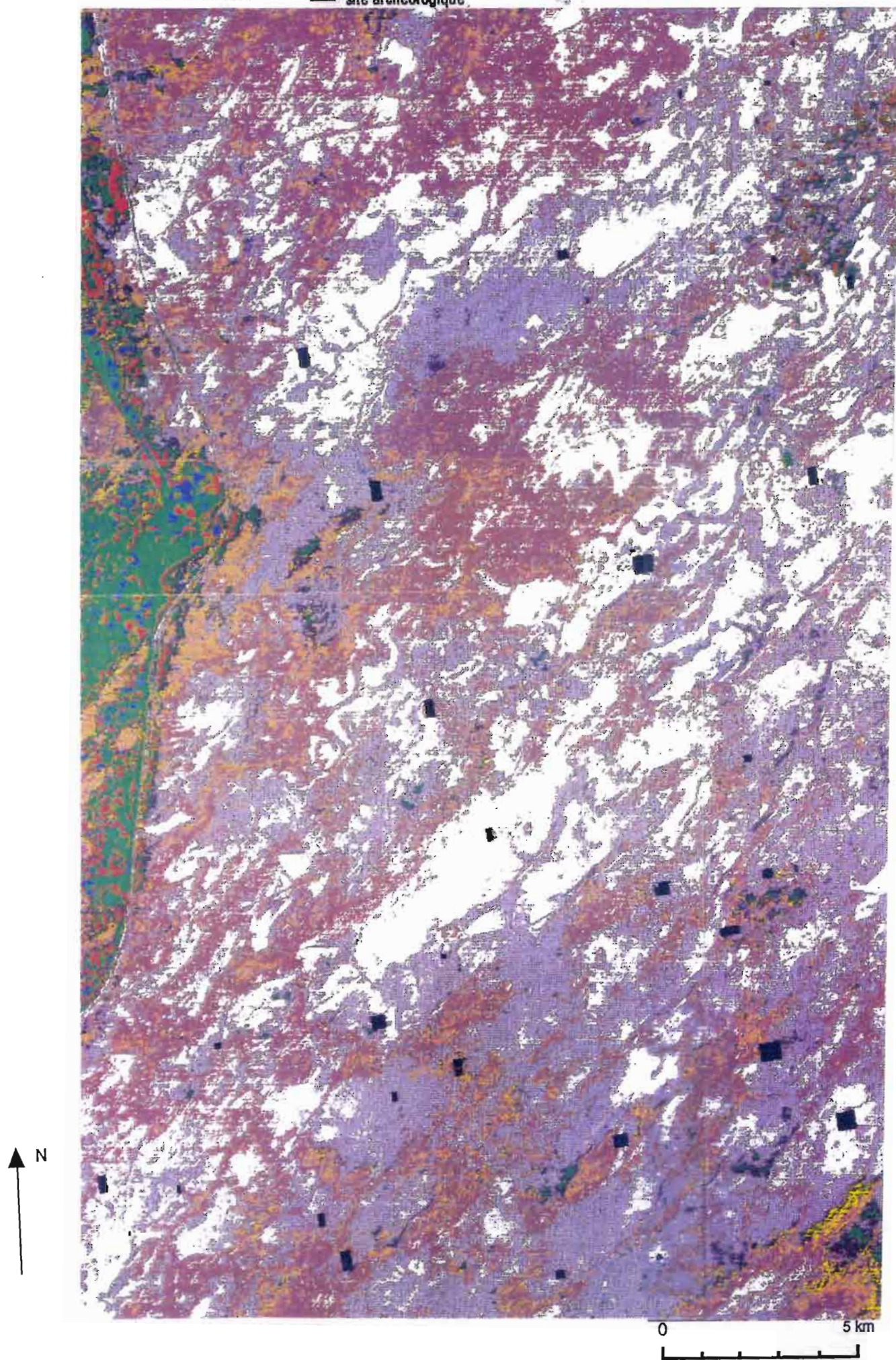


Fig 192 : Répartition des sites datés de la période historique ancienne et médiévale d'après les données de M. R. Mughal (1980)

céramique Hakra et harappéenne ancienne sont vraiment exclusives, donc si l'étude distincte de la répartition spatiale des sites appartenant à ces deux cultures est pertinente.

Il faut noter par ailleurs que le secteur situé entre Fort Abbas et Mojgarh est actuellement mis en culture et a, de ce fait, subi des modifications. Celui entre Mojgarh et Kudwala a également été irrigué avant que les branches terminales du *Hakra Right Distributary* ne

Fig. 193 : Localisation des sites harappéens mûrs (2500-2000/1900 av. J.-C.) dans la plaine de la Hakra à l'ouest de Derawar. ■ site archéologique



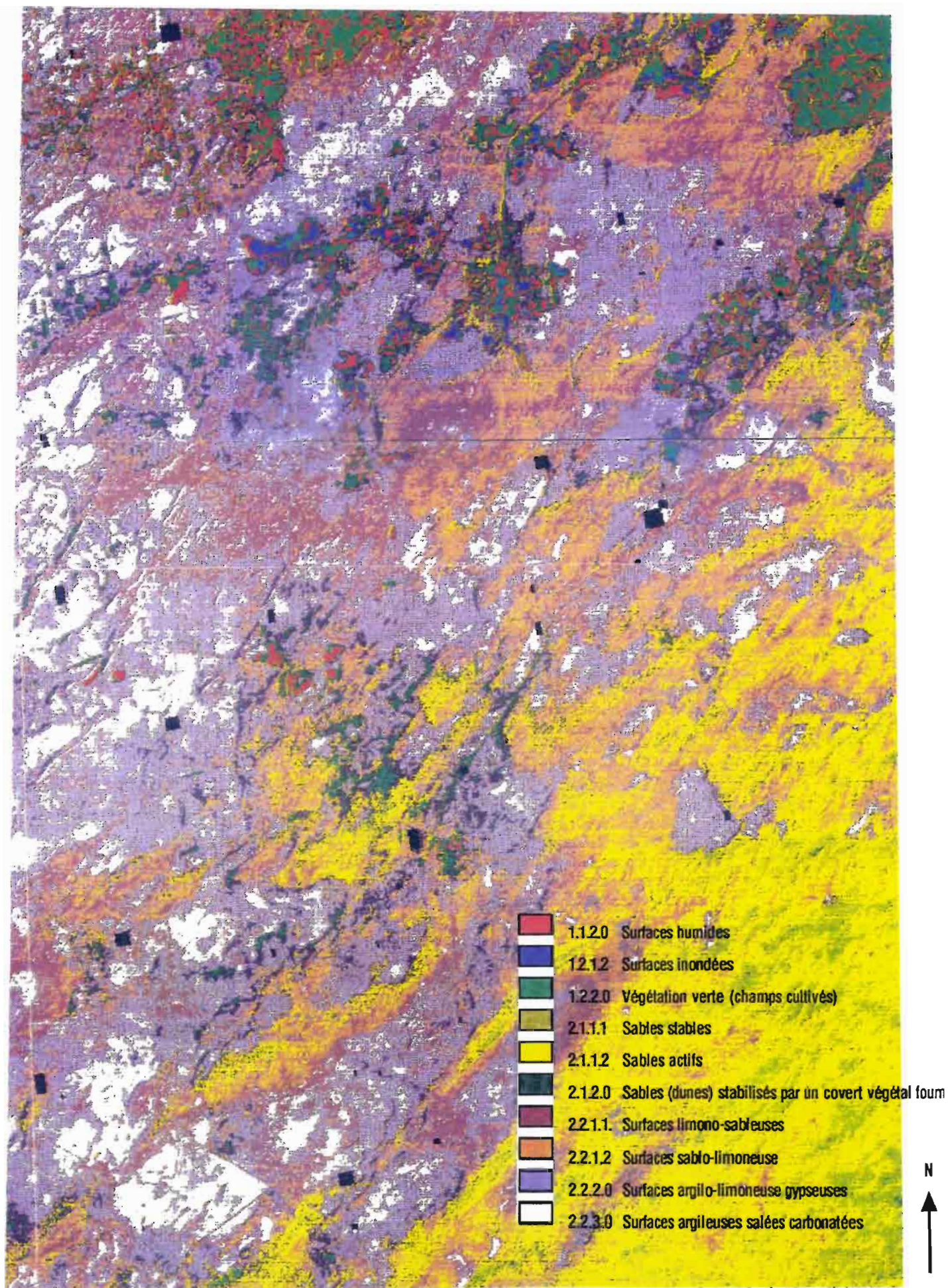
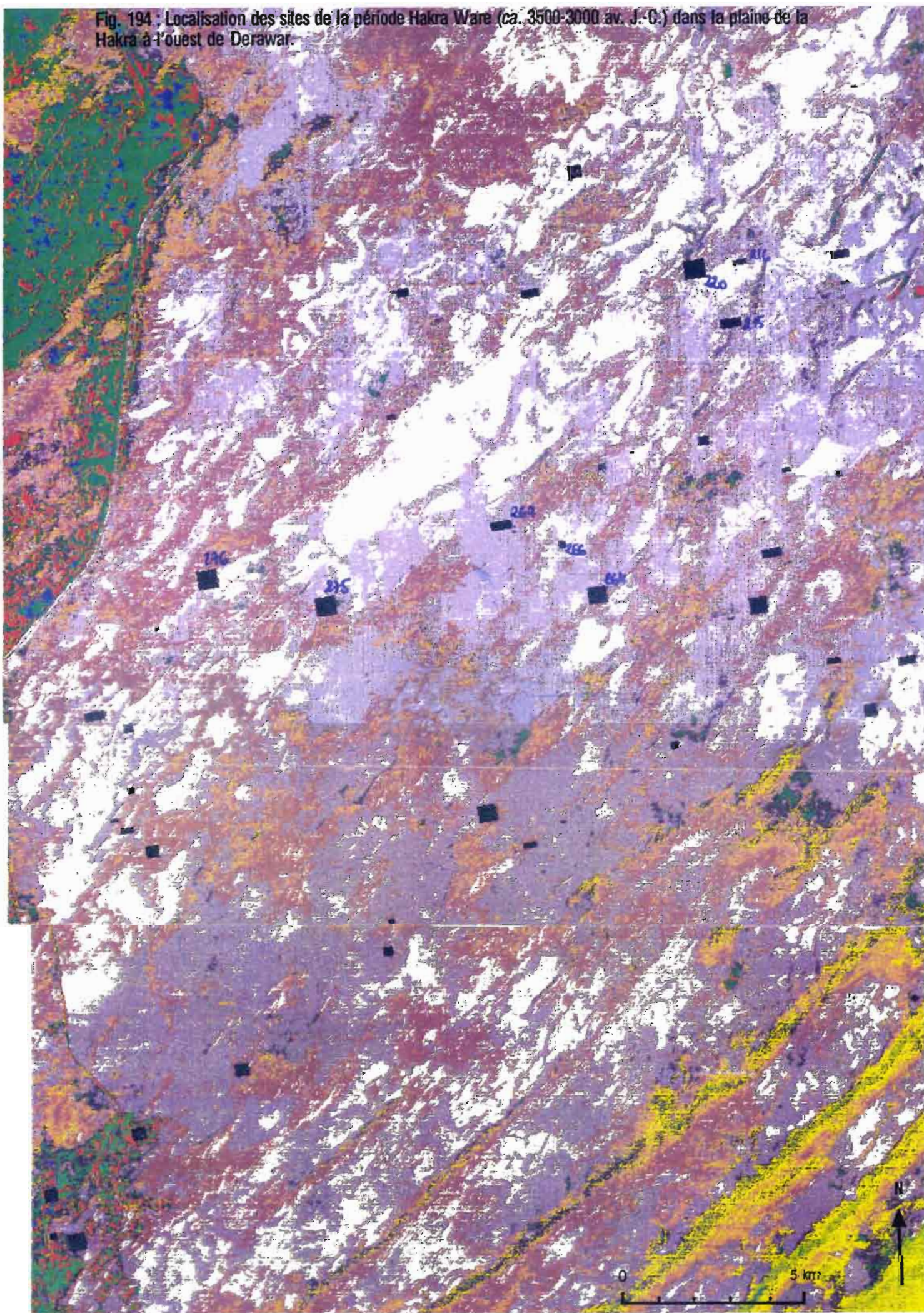


Fig. 194 : Localisation des sites de la période Hakra Ware (ca. 3500-3000 av. J.-C.) dans la plaine de la Hakra à l'ouest de Derawar.



soient abandonnées. Il n'offre donc pas aux sites les mêmes conditions de conservation que dans le secteur de Derawar.

Au regard de la situation des sites sur les représentations issues des images satellitaires (Fig 193, 194 : extraits), il apparaît que les traces de peuplement ancien dans la région considérée couvrent l'ensemble de la plaine d'épandage et ne peuvent en aucun cas être mises en relation avec le tracé d'un cours d'eau pérenne. On trouve des vestiges de cette occupation sur les surfaces alluviales argileuses salées -les *dahars*- ou limono-sableuses gypseuses, davantage qu'à leur périphérie. Il est donc permis d'émettre l'hypothèse de la faiblesse des apports en eau ou de leur irrégularité ; ou bien il faudrait admettre celle d'une occupation spatialement instable, se déplaçant au gré de l'intensité de la répartition spatiale des crues, hypothèse peu vraisemblable. La stabilité du peuplement semble attestée, pour chacune des périodes considérées, par l'existence de très grands sites présentant des dépôts d'une dizaine de mètres d'épaisseur (données de Mughal, 1980). Nous citerons par exemple :

- Lathwala-I (23,3 ha) durant la période de la céramique Hakra,
- Gamanwala (27,3 ha) durant la période harappéenne ancienne,
- Ganweriwala (81,5 ha) durant la période harappéenne mûre,
- Kudwala (31 ha) durant la période harappéenne tardive

Mais, comme on l'a dit, les petits sites peu élevés, qui sont la majorité, ont pu n'être occupés que pendant une durée très courte. Par ailleurs, à quelques exceptions près (Mughal, 1980) :

- deux sites *Hakra Ware* occupés durant la période harappéenne ancienne,
- quatre sites *Hakra Ware* occupés durant la période harappéenne mûre,
- trois sites harappéens anciens occupés durant la période harappéenne mûre,

les sites n'ont connu qu'une seule phase d'occupation.

La proximité d'un certain nombre de sites et de chenaux d'écoulement concentré incisant les *dahars* semble montrer que de l'eau était disponible en surface. Des chenaux naturels ont ainsi pu être aménagés, des chenaux artificiels creusés pour utiliser au mieux les ressources, les diriger vers des mares ou directement vers les aires cultivées (Fig. 195).

Les informations fournies par l'étude des caractères sédimentaires dans le secteur amont de la Ghaggar et de la Chautang ont montré qu'à partir de 7000 B. P., les apports alluviaux de piémont ont diminué progressivement et étaient très faibles vers 5000 B. P. L'hypothèse de Stein, reprise notamment par Mughal, selon laquelle la plaine de la Hakra aurait pu être alimentée par un chenal issu du Sutlej (Fig. 26) n'a pu être vérifiée par l'observation des traits morphologiques, le secteur ayant été très perturbé (irrigué, il est totalement couvert de végétation). Elle supposerait une sorte de diffluence du Sutlej, phénomène relativement rare et qui ne pourrait être prouvé que par une étude géomorphologique. Une

analyse sédimentaire permettrait d'identifier l'origine des sédiments (Himalaya ou piémont) et de reconstituer la séquence chronologique des épisodes alluviaux.

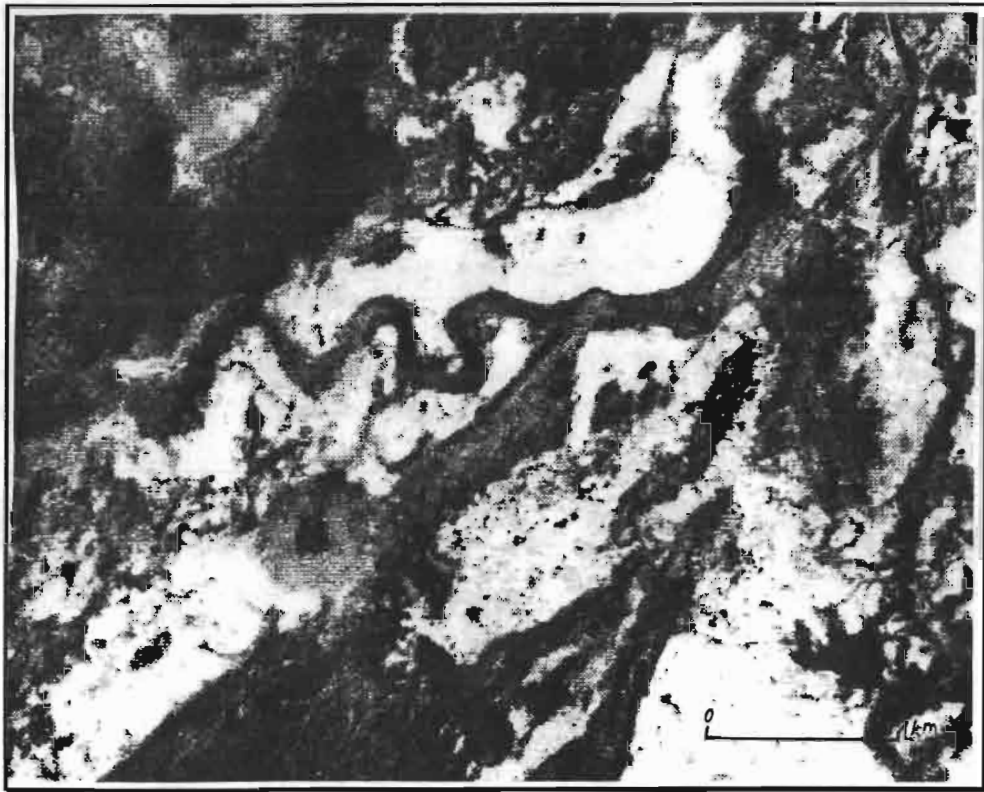


Fig. 195 : Proximité d'un site protohistorique et d'un chenal (Image Spot en mode panchromatique)

2.3. Conclusion

Durant la période harappéenne, les hommes auraient ainsi occupé une plaine d'épandage en voie de disfonctionnement, mais offrant des conditions sinon exceptionnelles, du moins favorables du fait d'une humidité des sols plus grande qu'actuellement. Le grand nombre de petits sites identifiés par M. R. Mughal comme des sites d'habitat temporaire, des "campements", -40% des sites d'habitat durant la période harappéenne-, témoigne d'une certaine instabilité qui peut être significative d'activités pastorales associées à l'agriculture comme l'écrit Mughal, ou / et de la nécessité de s'adapter à un milieu changeant, en particulier sur le plan des ressources en eau, pour en tirer le meilleur profit.

L'occupation de la région durant la protohistoire semble avoir été caractérisée par la présence de quelques très gros villages (rien n'indique qu'ils aient été des villes -exception faite peut-être, de Ganweriwala, comparable en taille à Harappa) et de quantité d'établissements de petite taille. Sa désertion après la période harappéenne ancienne comme à l'ouest dans la région de Hisar, est frappante. Le caractère marginal de ce secteur est encore plus accusé. Et de ce fait, la précarité de l'équilibre réalisé entre une occupation humaine reposant sur des activités agro-pastorales et un milieu fragile est encore plus

grande. Aux facteurs déjà cités pour expliquer l'abandon de la région de Hisar, s'ajoutent ici les problèmes, liés à la salinité. La diminution des apports en eau entraîne l'augmentation des dépôts salins et les cultures ne sont plus possibles sans recours à une irrigation artificielle. Une succession "anormale" d'années sèches peut alors perturber l'ensemble du système de subsistance, au point de pousser les populations à émigrer.

Parce qu'il est possible et plus rentable d'irriguer les régions proches du Sutlej ou du Chenab, que le Cholistan, le peuplement historique est essentiellement un peuplement riverain.

Conclusion

Le temps du bilan est venu, s'il est possible à l'auteur de le tenter lui même. Les images de satellites apportent à l'étude géographique des vestiges archéologiques inscrits dans les paysages des confins septentrionaux du désert de Thar un certain nombre de résultats.

Il faut rappeler néanmoins que les limites des espaces étudiés à partir des images satellitaires ont été suggérées par les archéologues et correspondaient à des aires de prospection ainsi qu'à leur propres règles internes. Sur un territoire donné le géographe abordait la question des interactions entre les sociétés et leur environnement aux différentes époques que l'analyse archéologique des vestiges avait individualisées, tant au Cholistan dans la plaine de la Hakra, qu'en Haryana dans celle de la Chautang.

La découverte d'une certaine organisation spatiale et la mise en question d'hypothèses émises antérieurement par divers spécialistes sont acquises.

Les interrelations mises en évidence, sont-elles valables pour les seuls secteurs étudiés ou sont-elles généralisables à d'autres lieux où des implantations de même type ont été identifiées ? Les rapports entretenus ici entre les populations et leur environnement aux époques anciennes peuvent être considérés comme représentatifs d'un comportement plus général des sociétés face au milieu dans lequel elles décident de s'installer. Mais on ne pourra être assuré de leur validité générale sans avoir recours soit à l'ensemble des espaces habités par ces sociétés, soit à un échantillonnage des zones d'étude qui ne prenne pas seulement en compte les faits archéologiques ou uniquement le milieu physique, mais qui considère l'espace de façon globale.

L'image de satellite sert en premier lieu à cela : à petite échelle, c'est-à-dire sur de grandes surfaces, celle du nord-ouest du sous-continent indo-pakistanaï par exemple, ont pu être délimitées les aires d'extension de la civilisation de l'Indus ; à l'intérieur de ce cadre, et avec la même méthode que celle que nous avons utilisée, pouvaient être individualisés des milieux que nous avons qualifiés d'homogènes à partir d'un certain nombre de critères prenant en compte les caractéristiques du milieu (topographie, climat, hydrographie, etc.), ce que l'on sait de son passé, et les traits particuliers de la société étudiée (économie, système de production etc.). C'est à l'intérieur de tels sous-ensembles que pouvaient être choisies les aires d'étude à plus grande échelle (celle des sites) de même que c'est au sein de ces dernières qu'ont été choisies les secteurs qui devaient être étudiés sur le terrain.

L'étude géographique que nous avons tenté de mener ne devait pas être seulement l'examen des conditions naturelles dans lesquelles se sont établies les sociétés protohistoriques et historiques, la compréhension des paysages du passé impliquait que puisse être analysées les conditions offertes par le milieu, tout comme les réponses possibles des sociétés.

L'utilisation des images de satellite a permis de préciser et dans certains cas de connaître le tracé de rivières aujourd'hui asséchées, dont l'existence avait été découverte bien avant que l'on ne les observe de haut. Elle a aussi permis de mettre au jour les éléments d'une paléohydrographie jusqu'alors insoupçonnée, composée de chenaux de petite taille. L'étude de ces indicateurs morphologiques de l'évolution du milieu physique révélait un type d'environnement différent de celui qui avait été imaginé jusqu'à présent. L'analyse géopédologique avait permis d'obtenir des datations indispensables, mais ne donnait pas une idée des paysages auxquels avaient pu correspondre les événements décelés dans les coupes. Notre étude a montré, rapidement et sans que de longues analyses de terrain ou de laboratoire soient nécessaires (au contraire des études de celles menées à grande échelle), que les installations humaines avaient été placées dans des conditions locales favorables : à proximité de chenaux d'écoulement concentré ou de dépressions susceptibles de retenir l'eau pendant plusieurs mois après la saison des pluies. Nous avons vu que l'éventualité d'une irrigation de grande ampleur prenant son eau dans les grands cours d'eau himalayens et pérennes, la Yamuna à l'ouest ou le Sutlej à l'est, ne pouvait être envisagée pour la période protohistorique. Il apparaissait cependant évident que des aménagements locaux avaient été mis en place, visant à gérer au mieux les ressources en eau offertes par les pluies ou par de maigres écoulements de piémont, et à utiliser une topographie résultant en partie de l'existence de formes héritées de périodes antérieures.

Un fait est apparu très nettement : les analyses concernant l'évolution du milieu physique et celles ayant trait à la dynamique du peuplement, aussi fiables qu'elles puissent être, ne pouvaient se traduire par des résultats directement superposables. Si l'on tentait cette expérience, il en découlait facilement des erreurs d'interprétation : vouloir rattacher simplement des faits relatifs au milieu et des faits humains c'est s'exposer à créer d'apparentes corrélations sans signification réelle par le seul fait de la non adéquation des échelles de temps auxquelles il est possible de les étudier. Les analyses archéologiques ont conduit à la délimitation de périodes stables d'une durée de 300 à 500 ans, celles du milieu se mesurent en milliers d'années. Il ne peut être question de faire évoluer l'un à la vitesse de l'autre. Les reconstitutions géographiques ne peuvent se trouver ainsi subordonnées à des échelles temporelles imposées, que ce soit par la méthode utilisée ou par l'objet de l'observation lui-même. Il suffit parfois que l'on change d'échelle temporelle ou qu'il devienne possible de changer d'échelle spatiale pour que change aussi la nature ou le sens

des reconstitutions. Dès l'instant que l'on considère le milieu non pas comme un cadre statique évoluant indépendamment des populations qui l'occupent, mais comme une composante d'un système complexe dans lequel Homme et Milieu sont des éléments interdépendants, s'impose la recherche de données et d'une méthode susceptible de répondre à cette contrainte. C'est ce que nous avons voulu entreprendre avec l'image de satellite.

Possédant peu de données utilisables sur les époques lointaines des II^e et III^e millénaires nous nous sommes attachée à rechercher quelques clés pour tenter de comprendre la répartition spatiale des sites, à travers des états plus récents -mais antérieurs à la mise en place des grands réseaux d'irrigation pérenne qui ont totalement modifié les règles de l'occupation humaine-, états pour lesquels nous avons des témoignages écrits, des informations d'ordre économique ou géographique. Il ne s'agissait pas de transposer aux époques anciennes des modèles actuels mais de montrer qu'il n'existe pas une seule réponse possible aux indications ou aux contraintes de la nature ; les interactions Homme - Milieu ne peuvent être envisagées sous le déterminisme d'un seul paramètre. Des faits différents peuvent produire le même type de trace. Par ailleurs nous avons montré que les échelles temporelles auxquelles il est permis d'accéder, ne rendaient pas toujours compte des rythmes d'évolution significatifs, tant sur le plan de l'évolution du milieu que de celui de l'occupation humaine ou de leurs interactions. Certains paramètres peuvent ainsi se trouver surreprésentés et surestimés par rapport à d'autres qui ont pu jouer un rôle tout aussi important (voire plus important), mais n'ont pas laissé de traces ou des traces qui ne nous sont pas encore accessibles : faut-il par exemple expliquer la dynamique de l'occupation de l'espace par des changements climatiques observés sur quelques milliers d'années, ou par des oscillations plus ponctuelles telles qu'une succession d'années sèches qui n'a laissé aucune empreinte identifiable ? Comment mettre en évidence une épidémie sans recours possible à des témoignages écrits ou une paléopathologie observable par l'anthropologie physique ?

Les interactions entre faits humains et faits de nature n'avaient pu être explicités par les études antérieures. La découverte de quelques tronçons de canaux d'irrigation médiévaux indiquait un certain type de mise en valeur de l'espace valable pour les périodes récentes. Peu d'indices existaient en revanche pour la protohistoire, sinon ceux fournis par l'étude des graines retrouvées dans les niveaux des sites archéologiques. Encore fallait-il les resituer dans un contexte environnemental, économique, technologique etc., imparfaitement connu. Les sites archéologiques, vestiges d'installations humaines anciennes, apparaissaient ainsi comme les seuls indicateurs disponibles ayant laissé des traces visibles, des rapports qu'ont entretenus les populations avec leur milieu : en effet, leur localisation n'est pas aléatoire et intègre à la fois des faits de société et des faits de nature

(écofacts et artefacts). Mais un certain nombre de ces sites ont été effacés, détruits ou enfouis, on ne peut en connaître le nombre. C'est pourquoi l'analyse d'un semis de points -de sa forme, de ses limites- peut donner lieu à des interprétations erronées et subjectives. Les représentations cartographiques, qui se voulant explicatives, ne font qu'associer à des échelles différentes la localisation géographique des sites et une certaine interprétation de l'évolution du milieu sont tout aussi trompeuses.

Le site n'a de signification que par rapport au milieu dans lequel il est placé. L'étude de l'image de satellite nous a permis de proposer des représentations qui ne sont pas des illustrations. Analysées sous un certain angle pour répondre aux questions posées, décrites, interprétées à l'aide d'un ensemble d'informations extrinsèques, elles ne sont pas fermées mais ouvrent la voie à de nouvelles interrogations.

Grâce aux images nous savions où étaient les sites. Il nous a manqué cependant une information essentielle pour dépasser cette constatation, et accéder à une véritable interprétation géographique de la localisation des vestiges archéologiques. Comment savoir en effet à quel type d'occupation correspondaient ces "surfaces recouvertes de tessons de poteries de céramiques" ? Les grandes cités harappéennes ont été identifiées et fouillées par les archéologues ; leur surface et l'épaisseur des dépôts anthropiques les différencient des autres sites. Mais qu'en est-il des centaines de petits sites recensés dont la surface ne dépasse pas un hectare, ainsi que des sites de taille moyenne ? Sont-ils les vestiges d'anciens villages ou ceux de quelque habitation isolée ? Quelle relation peut-on établir entre les informations fournies par le site et des paramètres tels que la densité de population, les besoins, le système de production ? Il y a bien une relation, mais l'analyse archéologique n'est pas encore parvenue à en établir les règles. Diverses tentatives, comme celle de Mughal pour classer les sites du Cholistan selon leur fonction, sont sujettes à caution parce qu'il existe peu d'indicateurs, de critères.

Il faut désormais voir au delà de ce travail et se situer dans une perspective plus large. Le seul moyen d'échapper aux contraintes est de multiplier les hypothèses, en proposant un certain nombre de schémas issus d'une expérience acquise dans des milieux similaires, pour des sociétés semblables ou proches, de rechercher comment ils entrent en contradiction les uns avec les autres ou, au contraire en adéquation avec les faits établis à partir des données disponibles : l'utilisation de systèmes-experts pour la formalisation de ces schémas et leur confrontation pourrait être fructueuse.

Le développement de l'utilisation des images de satellite dans le domaine de la géographie historique doit passer aussi par la recherche des procédures de traitement efficaces pour la mise en évidence des vestiges archéologiques. Celle-ci peut être indirecte et aboutir à l'aide de connaissances extrinsèques à la délimitation de secteurs où la probabilité de présence de sites est la plus forte, sans que les vestiges eux mêmes soient

visibles ou identifiables sur l'image. Les hypothèses sont alors vérifiées sur le terrain et la position des sites doit ensuite être reportée sur l'image. A l'heure où il est possible de connaître très précisément à quelques mètres près les coordonnées géographiques d'un point quelconque, il faudrait que les données de terrain puisse être parfaitement localisées sur l'image sans recours à une photo-interprétation dont l'objectivité est toujours discutable dans ce domaine. Les recherches doivent aussi porter sur la détection et l'identification directe des vestiges archéologiques. C'est une question de méthode et de procédures. C'est aussi une question de données. Il faudra évaluer l'apport de satellites à très haute résolution spatiale. Par ailleurs, les données-radar comme celles de ERS1 qui commencent à être diffusées sont, dans les milieux semi-arides et arides très prometteuses pour la recherche de structures anciennes qu'elles soient visibles en surface ou légèrement enfouies.

Nous espérons avoir montré que l'utilisation des images de satellites ne doit pas avoir pour seul objectif la détection de ces formes du passé. Son intervention dans les recherches qui se sont fixées pour objet l'étude temporelle de faits s'exprimant dans l'espace doit être beaucoup plus ambitieuse. Faire le choix d'un outil, quel qu'il soit, c'est se plier à ses contraintes. C'est aussi tirer partie de ses "capacités", la plus originale et la plus importante étant dans le cas des images de pouvoir étudier un espace à plusieurs échelles. Plus qu'à l'archéologie c'est à une géographie historique ou plus précisément, à l'étude géographique des vestiges archéologiques, que les apports seront sans doute les plus importants ; ces apports seront de nouvelles connaissances sur la façon dont les sociétés anciennes ont occupé, aménagé, utilisé l'espace dans lequel elles se sont installées, la façon dont Homme et Milieu ont interagi, et éventuellement la mise en évidence des influences qu'exercent des structures anciennes dans les organisations spatiales actuelles.

Encore faut-il que les images cessent d'être considérées comme des outils annexes, dans une stratégie de recherche inadéquate à leur utilisation optimale, pour être à l'origine d'une démarche originale, d'une recherche méthodologique qui utilise, adapte et intègre à son profit, les données et les connaissances acquises par ailleurs. C'est dans cette perspective que la télédétection pourra apporter des réponses nouvelles et fiables aux questions géographiques et archéologiques .

Tabl. 1A : Précipitations annuelles :
moyennes (x), minima, maxima, écart-type (σ), en mm, coefficient de variation (V) en %

STATIONS	ANNEES	DUREE (an.)	TOTAUX PLUVIOMETRIQUES ANNUELS				
			X	MIN.	MAX.	σ	V (%)
Gohana	1890-31	38	563	242	935	169,7	30
Rohtak	1890-31	38	497	193	873	172,7	34,8
Bhiwani	1890-31	37	420	204	697	117,5	28
Hansi	1890-31	37	397	104	662	120,7	30,4
Tohana	1890-31	36	388	107	769	131	33,8
Hisar *	1890-31	38	415	134	865	142,3	34,3
	?	30	428	-	-	-	-
Budhalada	1890-31	37	373	142	887	152	40,8
Fatehabad	1890-31	38	339	127	705	123,1	36,3
Sirsa	1890-31	38	313	64	548	122,3	39,1
Jaipur	?	30	598	-	-	-	-
Sambhar	1879-05	21	507	-	-	-	-
Ajmer	?	30	520	-	-	-	-
Didwana	1879-05	21	369	-	-	-	-
Nagaur	1879-05	15	299	-	-	-	-
Bikaner	1879-05	26	252	-	-	-	-
	1896-07	12	236	29	495	132	56
* 1881-42	60	292	-	-	-	-	-
** 1931-60	30	305	-	-	-	-	-
Jodhpur *	1879-05	26	324	-	-	-	-
	1896-07	12	261	24	395	139,6	54
	?	30	366	-	-	-	-
Jaisalmer	?	30	179	-	-	-	-
Minchinabad	1900-10	8	294	76	692	200,4	68,2
Bahawalnagar	1900-10	8	233	32	621	267,9	115
Fort Abbas	?	25	192	-	-	-	-
Khairpur	1900-10	8	141	53	426	119,3	84,6
Bahawalpur *	1900-10	11	106	61	218	46,5	43,8
** ?	30	142	-	-	-	-	-
Ahmadpur East	1900-10	8	119	40	190	44,4	37,3
Multan *	1887-56	33	168	-	-	-	-
** 1931-60	30	167	-	-	-	-	-
Allahabad	1900-10	8	98	43	179	61,4	62,6
Khanpur	1900-10	8	107	37	181	51,9	48,5
* ?	32	120	-	-	-	-	-
Ahmadpur Lamma	1900-10	8	112	58	167	38,6	34,4

Tabl. 2A : Précipitations saisonnières en mm : moyenne (X), écart-type (σ), coefficient de variation (V) en %, part des précipitations d'une saison sur le total annuel (%)¹

a) juin à septembre

STATION	X	MIN.	MAX.	σ	V (%)	%
Gohana	453	53	806	156,7	35	80,5
Rohtak	390	112	692	168,5	43	78,5
Bhiwani	358	146	632	125,1	35	85,2
Hansi	329	78	569	131,8	40	82,9
Hisar *	327	159	665	125,2	38	78,8
Fatehabad	267	90	554	104,9	39	78,8
Sirsa	273	59	471	149,7	55	87,2
Bikaner *	239					81,9
**	263					86,2
Jodhpur *	290					89,5
Minchinabad	234	4	644	199,4	85	79,6
Fort Abbas	148					77,1
Bahawalpur *	60	3	137	45,7	76	56,6
**	101					71,1
Multan *	114					67,9
**	106					63,5
Khanpur *	85					70,8

b) octobre à décembre

STATION	X	MIN.	MAX.	σ	V (%)	%
Gohana	23	0	114	28,8	123	4,1
Rohtak	24	0	109	27	113	4,8
Bhiwani	23	0	84	22,3	99	5,5
Hansi	24	0	198	36,3	149	6
Hisar *	21	0	173	31	150	5,1
Fatehabad	17	0	72	17,5	104	5
Sirsa	18	0	106	21,5	118	5,8
Bikaner *	13					4,5
**	11					3,6
Minchinabad	5	0	36	12,4	245	1,7
Fort Abbas	6					3,1
Bahawalpur *	9	0	30	11,2	126	8,5
	7					4,9
Multan *	11					6,5
**	17					10,1
Khanpur *	2					1,7

c) janvier à mai

STATION	X	MIN.	MAX.	σ	V (%)	%
Gohana	80	22	162	43,7	55	14,2
Rohtak	73	9	141	43	59	14,7
Bhiwani	52	2	107	28,3	54	12,4
Hansi	57	3	145	37	64	14,4
Hisar *	65	0	169	35,3	55	16,1
Fatehabad	49	7	149	30	61	14,5
Sirsa	44	0	119	27,9	63	14,1
Bikaner *	41					14
**	31					10,2
Minchinabad	55	21	96	23,9	43	18,7
Fort Abbas	38					19,8
Bahawalpur *	38	3	91	28,1	75	35,8
**	34					23,9
Multan *	43					25,6
**	44					26,3
Khanpur *	33					29,5

¹ Les * renvoient aux périodes étudiées, cf. Tabl. 2

Tabl. 3A : Les précipitations mensuelles

a) en mm													
STATION	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	TOT.AL
Hisar *	16	13	13	9	16	39	110	112	66	10	3	8	415
Bikaner *	8	8	5	5	15	31	84	91	33	5	2	5	292
	**	6	7	6	5	7	27	87	104	45	6	3	305
Fort Abbas	11	9	6	7	5	13	72	41	22	2	2	2	192
Bahawalpur**	6	6	11	6	5	6	49	38	8	2	2	3	142
Multan **	7	10	13	6	8	8	45	33	20	10	2	5	167
Khanpur *	4	9	11	4	5	23	21	32	9	0,1	0,1	2	120

b) en pourcentage du total annuel													
STATION	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Hisar *	3,9	3,1	3,1	2,2	3,9	9,4	26,5	27	15,9	2,4	0,7	1,9	
Bikaner *	2,7	2,7	1,7	1,7	5,3	10,6	28,8	31,2	11,3	1,7	0,7	1,7	
	**	2	2,3	1,6	2,3	8,9	28,5	34,1	14,8	2	1	0,7	
Fort Abbas	5,7	4,7	3,1	3,6	2,6	6,8	37,1	21,4	11,5	1	1	1	
Bahawalpur **	4,2	4,2	7,7	4,2	3,5	4,2	34,5	26,8	5,6	1,4	1,4	2,1	
Multan **	4,2	6	7,8	3,6	4,8	4,8	26,9	19,8	12	6	1,2	3	
Khanpur *	3,3	7,5	9,2	3,3	4,2	19,2	17,5	26,7	7,5	0,1	0,1	1,7	

Tabl. 4A : Précipitations d'été : juin à septembre (mm / pourcentage des précipitations d'été)

STATION	JUIN				JUILLET				AOÛT				SEPTEMBRE			
	X	σ	V(%)	%	X	σ	V(%)	%	X	σ	V(%)	%	X	σ	V(%)	%
Hisar	38	29,4	78	11,7	109	65	59	33,5	112	92,5	82	34,5	66	81,6	123	20,3
Bikaner	18	14	78	10,3	63	53	84	33,1	83	97,5	117	39,5	33	29	89,7	17,4
Jodhpur	22	29	136	9,4	79	65	82	33,8	84	76	91	35,9	49	50	101	20,9
Fort Abbas	13			8,8	72			48,6	41			27,7	22			14,9
Bahawalpur	6			5,9	49			48,5	38			37,6	8			7,9
Multan	10				51				43				10			
Khanpur	23			27	21			24,7	32			37,6	9			10,6

Tabl. 5A : Nombre d'années sèches et d'années pluvieuses entre 1900 et 1931

(selon deux critères : $\pm \sigma$ et $\pm 60\%$ de la moyenne)

STATION	ANNEES SECHES				ANNEES PLUVIEUSES			
	< σ		< 60%		> σ		> 60%	
	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%
Gohana	6	19	0	0	6	19	2	6
Rohtak	10	31	2	6	4	13	2	6
Bhiwani	6	19	0	0	6	19	1	3
Hansi	6	19	1	3	6	19	1	3
Tohana	5	16	1	3	6	19	1	3
Hisar	7	22	1	3	6	19	1	3
Budhalada	3	9	0	0	5	16	1	3
Fatehabad	5	16	1	3	5	16	1	3
Sirsa	6	19	2	6	5	16	4	13
Minchinabad	2	25	2	25	1	13	1	13
Bahawalpur	0	0	0	0	2	18	1	9
Ahmadpur East	1	13	1	13	1	13	1	13
Khanpur	1	13	1	13	2	25	2	25

Tabl. 6 A: Intensité des précipitations et nombre de jours pluvieux

STATION	NOMBRE DE JOURS PLUVIEUX (MOYENNE)	PRECIPITATIONS : MAX. PAR 24 HEURES (MM)	MOYENNE ANNUELLE JOURS PLUVIEUX
Hisar	25,9	346,7	16,5
Jaipur	35	188,4	16,9
Ajmer	31	165,6	16,8
Bikaner	19	165,6	16,1
Jodhpur	20	215,9	18,3
Jaisalmer	12,5	135,4	14,3
Multan	12	154,9	14

Tabl. 7A : Températures : moyennes mensuelles et annuelles (°C)

STATION	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	A.
Hisar	10,6	11,4	19,4	26,5	31,4	33,5	31	29	28,6	24,4	24,4	15,1	24,5
Bikaner	13,6	17,2	23,5	29,6	34,6	35,6	33,1	31,3	30,7	27,1	27,1	20,2	26
Fort Abbas	13,4	16,3	22,1	28,8	34,6	36,5	34,6	33,1	31,9	27,4	21,4	14,9	26,2
Bahawalpur	13,3	16,5	22,2	28,4	33,1	35,7	34,2	33	31,3	26,5	20,3	15,3	25,8
Multan	13,1	16,5	21,9	28,4	33,4	36,1	34,5	33,4	31,8	27,4	19,8	15,1	27,4
Khanpur	13,6	17	22,6	28,7	37	36	34,7	33,3	32	27,3	21	16	26,6

Tabl. 8A : Températures : maxima moyens mensuels (°C)

STATION	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Hisar	25	25,4	31	36,8	40,6	42,3	37,5	34,4	36,6	36,1	29,7	23,5
Fort Abbas	21,4	25,5	31,1	37,9	43	43,4	40,2	38,5	38,3	36,5	30,5	23,9
Bahawalpur	21,1	24,4	30	36,5	41,5	42,5	39,6	38	37,6	35,3	29,6	23,6
Khanpur	22,1	25,6	31,7	38,1	42,7	43,4	40,9	39,1	38,7	36,1	30,5	24,6

Tabl. 9 A : Températures : minima moyens mensuels (°C)

STATION	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Hisar	7	7,3	14,5	19,2	22,9	33,5	31	29	28,6	24,4	15,1	9,4
Fort Abbas	5,4	7,6	13,2	19,6	26,2	29,6	28,5	27,7	25,5	18,3	12,2	5,9
Bahawalpur	5,5	8,6	14,4	20,3	24,8	28,9	28,8	27,7	24,9	17,8	11	6,9
Khanpur	5,2	8,3	13,6	19,3	31,2	28,5	28,5	27,5	25,5	18,5	11,3	6,9

Tabl. 10 A: Direction des vents (PCRWR, 1986)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Fort Abbas	E	ENE	E	ESE	S	SSW	S W	SW	S	SE	E	ENE
Bahawalpur	ENE	NNE	S W	SSW	SSW	SW	S W	SW	S W	W	SSW	ENE
Khanpur	NE	NE	NE	NE	N	SW	S W	SW	S W	W S W	NE	WNE

Tabl. 11A-a : Vitesse des vents m/sec. (PCRWR, 1986)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Fort Abbas	15,2	18,7	33,2	22,8	28,1	37,5	34,8	30,8	26,3	17,4	12,5	12,0
Bahawalpur	6,7	8,9	10,2	10,2	12,9	20,1	17,8	16,1	13,8	8,5	5,3	7,6
Khanpur	14,7	16,1	17,4	17,4	21,0	29,5	28,0	26,8	21,4	14,3	11,1	12,5

Tabl. 11A-b : Vitesse des vents km/h (Allchin & Goudie, 1978)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX.	X	XI	XII
Sri Ganganagar	5,63	6,76	8,69	8,85	10,78	13,68	11,91	9,50	9,01	7,08	5,63	8,53
Bikaner	4,83	5,79	6,76	7,56	10,14	12,07	11,27	10,14	8,69	6,12	4,02	4,02
Jodhpur	11,10	10,94	17,4	11,10	10,94	17,22	20,28	19,48	14,65	11,75	7,73	7,24

Bibliographie

- ABICHANDANI (C. T.) and ROY (B. B.), 1966 : Rajasthan desert - its origin and amelioration. *The Indian Geographical Journal* 41 (3-4), p. 35-43.
- AGRAWAL (D. P.) and CHAKRABARTY (D. K.), 1979 : *Essays in Indian Protohistory*. Delhi : B.R. Publishing Corp.
- AGRAWAL (D. P.), 1986 : *L'archéologie de l'Inde*. Paris : Editions du CNRS.
- AGRAWAL (D. P.), 1984 : Whatever happened to the river Saraswati ? *Science Age*, february, p. 18-24.
- AGRAWAL (D. P.), and PANDE (B. M.) eds., 1977 : *Ecology and Archaeology of Western India*. New-Delhi.
- AHMAD (K. S. A.), 1947 : Physiography of the Punjab Plain. *The Punjab Geographical Review* 2, p. 2-7.
- AHMAD (A.), 1948 : Drainage of the Punjab. *The Punjab Geographical Review* 3, p. 39-47.
- AHMAD (K. S.) and ABBASI (A. A.), 1960 : Evolution of the Drainage in the Indus Plain. *Pakistan Geographical Review* 15 (2), p. 38-49.
- AHMED (E.), 1969 : Origin and geomorphology of the Thar desert. *Annals of Arid Zone* 8 (2), p. 171-180.
- AHUJA (R. L.), KHANNA (S. S.) and GARALAPURI (V. N.), 1980 : Evolution and distribution of aeolian cover in Haryana. *Annals of Arid Zone* 19 (3), p. 175-182.
- ALI (S. M.), 1941 : The Problem of Dessication of the Ghaggar Plain. *The Indian Geographical Journal* 16 (2), p. 166-178. Et, 1942 : *Calcutta Geographical Review* 4 (1).
- ALI (S. M.), 1942 : Population and settlement in the Ghaggar Plain. *The Indian Geographical Journal* 17 (3), p. 157-182.
- ALLCHIN (B.) and (R.), 1982 : *The rise of civilization in India and Pakistan*. London : Cambridge University Press.
- ALLCHIN (B.) and GOUDIE (A.), 1978 : Climatic Change in the Indian Desert and North-West India during the Late Pleistocene and Early Holocene. In BRICE (W. C.) ed., p. 307-318.
- ALLCHIN (B.), GOUDIE (A.), and HEDGE (K. T. M.), 1978 : *The Prehistory and Paleogeography of the Great Indian Desert*. London : Academic Press.
- ALLCHIN (F. R.) and CHAKRABARTY (D. K.), eds., 1979 : *A Source-book of Indian Archaeology*, vol. 1. Munshiram and Manoharlal Publishers.
- ALLCHIN (F. R.), 1971 : Early cultivated plants in India and Pakistan. In UCIKO (P. J.) and DIMBLEBY (G. W.) eds., *The Domestication and Exploitation of Plants and Animals*, London, p. 323-329. Repris dans ALLCHIN (F. R.), CHAKRABARTY (D. K.), eds., 1979, p. 275-280.
- ANDRIANASOLO (H.) : 1987 : *Analyse statistique des données de télédétection - Statistiques agricoles. Application sur Madagascar*. Thèse de 3^e cycle, EHESS, Paris.
- ANDRIANASOLO (H.) et MALEK (C.), 1988 : Définition et détermination des unités dynamiques d'un paysage sahélien (Oursi), pour un diagnostic des facteurs de dégradation et de régénération des ressources naturelles et renouvelables. *Congrès de l'ISPRS*, Kyoto.

- ANDRIANASOLO (H.), 1989 : Modélisation statistique de la stratification d'un espace régional pour l'estimation de la superficie d'un thème au sol. *Séminaire Informatique de l'ORSTOM, (SEMINFOR 2), 26-28 nov. 1988, Montpellier*. Paris : Editions de l'ORSTOM, coll. Colloques et Séminaires, p. 145-174.
- ANDRIANASOLO (H.), 1990 : Décomposition d'un espace régional pour une approche intégrée. In *Journées Télédétection : "Images satellite et milieux terrestres en régions arides et tropicales, 14-17 nov. 1988, ORSTOM (Bondy)*. Paris : Editions de l'ORSTOM, coll. Colloques et Séminaires, p. 287-299.
- ANDRIANASOLO (H.), 1991 : Découverte et exploration de la structure et de l'organisation d'un espace rural quelconque à partir d'images satellitaires. In *Deuxièmes Journées de Télédétection : Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales, 4-6 déc. 1990, ORSTOM (Bondy)*. Paris : Editions de l'ORSTOM, coll. Colloques et Séminaires, p. 89-122.
- BAKER (W. E.), 1840 : Report on a line of Levels /.../ between the Jumna and Sutli rivers. *Journal of the Asiatic Society of Bengal* 9, p. 688-694.
- BARIOU (R.), LECAMUS (D.) et LE HENAFF (F.), 1985 : *Indices de végétation. Dossiers de télédétection*. Université de Rennes 2 - Haute Bretagne, Centre Régional de Télédétection.
- BARNES (J. W.), 1872 : Notes on the Physical Geography of the Bahawalpore State. *Journal of the Royal Geographical Society of London*, p. 390-408.
- BASHAM (A. L.), 1976 : *La civilisation de l'Inde ancienne*. Paris : Arthaud.
- BENHAMOU (M.), 1987 : *Description et simulation de réseaux de drainage par analyse d'images*. Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- BHADRA (B.), 1976 : A note on the old bed of Drishadvati. In SINGH (U. Vin.) ed., *Archaeological Congress and Seminar 1972, Kurukshetra, D.N. Chakravarty University*, p. 37.
- BHAN (S.), 1973 : The sequence and spread of prehistoric cultures in the upper Sarasvati basin. In AGRAWAL (D. P.) and GHOSH (A.) eds., *Radiocarbon and Indian archaeology*, Bombay, p. 252-263.
- BHAN (S.), 1975 : *Excavation at Mitathal (1968) and other explorations in the Sutlej - Yamuna divide*. Kurukshetra University, Appendix B, p. 95-101.
- BHARADWAJ (O. P.), 1961 : The arid zone of India and Pakistan. In STAMP (L. D.) ed., *A history of land use in arid regions*, Paris : UNESCO, Arid Zone Research 17, p. 143-174.
- BHARDWAJ (S. M.), 1975 : Human geography in the Indian desert. *Geographical Review* 65 (1), p. 113-115.
- BHARUCHA (F. R.), s. d. : Afghanistan, India and Pakistan. *Ecologie semi-aride*, p. 19-39.
- BOSE (A. B.), MALHOTRA (S. P.), JOHORY (C. S. K.) and SEN (M. L. A.), 1965 : Agriculture in Central and Lower Luni Basin in Western Rajasthan. *Annals of Arid Zone* 4 (2), p. 195-206.
- BOTTEMA (S.) and van ZEIST (W.), 1981 : Palynological evidence for the climatic history of the Near East, 50 000-6000 BP. Colloques Internationaux du C.N.R.S. n°598 : *Préhistoire du Levant*, Maison de l'Orient méditerranéen, Lyon, 10-14 juin 1980. Paris : Editions du C.N.R.S., p. 111-132.
- BRICE (W. C.) ed., 1978 : *The Environmental History of the Near and Middle East Since the Last Ice Age*. London : Academic Press.
- BRYSON (R. A.) and BAERREIS (D. S.), 1967 : Possibilities of major climatic modification and their implications : Northwest India, a case for study. *Bulletin of the American Meteorological Society* 48, p. 136-142.
- BRYSON (R. A.) and SWAIN (M. A.), 1981 : Holocene Variations of Monsoon Rainfall in Rajasthan. *Quaternary Research* 16, p. 135-145.

- BUCKLEY (R. B.), 1905 : *The Irrigation Works of India*. London : E. & F. N. Spon, sec. ed.
- BURNES (A.), 1835 : Memoir on the eastern branch of the Indus. *Transaction of the Royal Asiatic Society of Great Britain and Ireland* 3, p. 550-588.
- BUSCHE (D.), DRAGA (M.) et HAGEDORN (H.), 1984 : *Les sables éoliens. Modèles et dynamique. La menace éolienne et son contrôle*. Bibliographie annotée. Eschborn : GTZ.
- CASAL (J.-M.), 1969 : *La civilisation de l'Indus et ses énigmes*. Paris : Fayard.
- CHAKRABARTI (D. K.), 1979 : Size of Harappan Settlements. In AGRAWAL (D. P.) and CHAKRABARTI (D. K.) eds., p. 205-215.
- CHANDON (J.-L.) et PINSON (S.), 1981 : *Analyse typologique, théories et applications*. Paris : Masson.
- CHANG (J.-H.), 1967 : The Indian Summer Monsoon. *The Geographical Review* 57 (3), p. 373-396. New York.
- CHATTERJI (P. C.) and GUPTA (R. K.), 1969 : Geobotanical studies in geo-hydrological surveys in the arid zone of W. Rajasthan. *Annals of Arid Zone* 8 (2), p. 246-250.
- CHERMANT (J.-L.), 1992 : Image analysis and related techniques : who is not interested ? *Acta Stereologica* 11/suppl. I, p. 15-37.
- CHERMANT (J.-L.) et COSTER (M.), 1987 : Introduction à l'analyse d'images. *Journal de Microscopie et de Spectroscopie Electroniques* 12, p. 1-21.
- CHHIBBER (H. L.), 1945 : *India, part 1 : Physical basis of the geography of India*. Bénarès : Nand Kishore.
- CHHIBBER (H. L.), 1949 : Westerly drift of rivers of Northern India and Pakistan. *Bulletin of the National Geographical Society of India* 12, p. 1-16.
- CHOWDHURY (K. A.) and GHOSH (S. S.), 1951 : Plant Remains from Harappa. *Ancient India* 7, p. 3.
- COLVIN Major, 1833 : On the restoration of the Ancient Canals in the Delhi Territory. *Journal of the Asiatic Society* 15, p. 105-127.
- COMMISSION MINISTERIELLE DE TERMINOLOGIE DE LA TELEDETECTION AEROSPATIALE (COMITAS), 1988 : Glossaire des termes officiels de la télédétection aérospatiale. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection* 112/1988-4.
- COOKE (R. U.) and WARREN (A.), 1973 : *Geomorphology in deserts*. London : Batsford.
- COQUE (R.), 1982 : *Géomorphologie*. Paris : Colin, coll. U.
- COSTER (M.) et CHERMANT (J.-L.), 1985 : *Précis d'analyse d'images*. Paris : Editions du CNRS.
- COURTY (M.-A.), 1985 : Le milieu physique et utilisations du sol. In Francfort (H.-P.) éd., p.11-31.
- COURTY (M.-A.), 1990 : *Environnements géologiques dans le nord-ouest de l'Inde. Contraintes géodynamiques au peuplement protohistorique. (Bassins de la Ghaggar-Saraswati-Chautang)*. Thèse d'Etat, Univ. Bordeaux I, 328 p.
- COURTY (M.-A.), DELIBRIAS (G.) et FRANCFORT (H.-P.), 1989 : Late Quaternary evolution of the Indo-gangetic plain : the Ghaggar Bassin. A paraître.
- CUNNINGHAM (A.), 1871 : *The ancient geography of India*. Reprinted, (1979) Varanasi : Indological Book House.
- DANI (A. H.), 1981 : *Indus civilisation, new perspectives*. Islamabad : Centre for the study of the civilisation of Central Asia, Quaid-i-Azam University, p. 67-68.
- DEBAINE (F.), FRANCFORT (H.-P.) et MERING (C.), 1989 : Analyse des images SPOT appliquée à la recherche archéologique. Programme National Télédétection Spatiale : Colloque : "La recherche et les satellites à haute résolution spatiale : SPOT, Landsat-TM..., BRGM, (Orléans), 17-19 janv. 1988. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection* 115 (1989-3), p. 78-80.

- DEBAINE (F.) et FRANCFORT (H.-P.), 1989 : Réseaux d'irrigation et cultures protohistoriques en Asie. Journées du G.M.P.C.A. (Groupement des méthodes pluridisciplinaires contribuant à l'archéologie), La Villette. *Bulletin de la Société Préhistorique Française* 86, Etudes et Travaux n° 10-12, p. 409-411.
- DEBAINE (F.), 1990 : Extraction de réseaux linéaires à partir des images SPOT ; exemple pris dans une région semi-aride : le Nord-Ouest de l'Inde. *Journées Télédétection: "Images satellite et milieux terrestres en régions arides et tropicales"*, 14-17 nov., ORSTOM (Bondy). Paris, Editions de l'ORSTOM, coll. Colloques et Séminaires, p. 225-241.
- DEMANGEOT (1981), : Les milieux naturels désertiques. Paris : CDU / SEDES
- DESHMUKH (P. R.), 1982 : Indus civilization, Rig-Veda and Hindu culture. *Nagpur Times*, India, p. 12-15 et p. 490-495.
- DESTIVAL (I.), 1985 : *Morphologie mathématique et télédétection. Recherche de réseaux linéaires*. Fontainebleau, Ecole des Mines, Centre de Géostatistique et de morphologie mathématique.
- DESTIVAL (I.), 1988 : Détection des réseaux linéaires sur les images SPOT. *Photo-Interprétation Images aériennes et Spatiales* 1988-5 (3), p. 27-32.
- DESTIVAL (I.), s.d. : Morphologie mathématique appliquée aux images de télédétection. In *Actes du Deuxième Colloque Image*, Nice.
- DEY (N. L.), 1927 : *The geographical dictionary of ancient and medieval India*. Reprinted (1979), New Delhi : Cosmo Publications.
- DIDAY (E.), LEMAIRE (J.), POUGET (J.) et TESTU (F.), 1982 : *Eléments d'analyse de données*. Paris : Bordas, Dunod Décision, 462 p.
- DIKSHIT (K. N.), 1977 : Distribution and Relationship of Protohistoric Sites along Old River Channels of the Ghaggar System. In AGRAWAL (D. P.), PANDE (B. M.) eds., *Ecology and Archaeology of Western India*, Ahmedabad, p. 61-66.
- DIKSHIT (K. N.), 1979 : Old Channels of Ghaggar in Rajasthan -revisited. *Man and Environment* 3, p. 105-106.
- DIN (M. A.), 1952 : Drainage in the Punjab. *Proc. of Pakistan Science Conference* 4, p. 13-22.
- DIZIER (J.-L.), LEO (O.), 1980 : *Télédétection, technique et applications cartographiques*. Paris : Editions FORHOM.
- DRESCH (J.), 1965 : Le "désert" de Thar. *Bulletin de l'A. G. F.* 332-333, p. 36-47.
- DUCLAIROIR (X.), ROUQUET (R.) et SERRA (J.), 1987 : Comparaison des Saint Jérôme de Georges de La Tour. *Journal de Microscopie et de Spectroscopie Electroniques* 12, p. 95-99.
- DURAND-DASTES (F.), 1961 : Remarques sur les pluies d'été aux Indes. *Annales de Géographie* 70 (379), p. 225-254.
- DURAND-DASTES (F.), 1968 : *Géographie de l'Inde*. Paris : PUF, Que sais-je ?, n°1184.
- ESCADAFAL (R.) et POUGET (J.), 1989 : Comparaison des données Landsat MSS et TM pour la cartographie des formations superficielles en zone aride (Tunisie méridionale). In *Proc. of a Workshop on "Earthnet Pilot Project on Landsat Thematic Mapper Applications"*, Frascati, Italy, December 1987, ESA, may, p. 301-307.
- FAIRSERVIS (Jr. W. A.) , 1961 : The Harappan Civilization : New Evidence and more Theory. *Novitates* 2055, p. 1-35. New York : American Museum of Natural History.
- FLOUZAT (G.), 1988 : Morphologie mathématique et analyse des images de télédétection. *Photo-interprétation - Images aériennes et spatiales* 1988-5 (1), p. 1-17.
- FRANCFORT (H.-P.) éd., 1985 : *Prospections archéologiques au Nord-Ouest de l'Inde. Rapport préliminaire, 1983-84 (travaux de la Mission Archéologique Française en Inde n°1)*. Paris : Editions Recherches sur les Civilisations, "Mémoires" n°62, 112 p.
- FRANCFORT (H.-P.), 1985 : Distribution des sites. In H.-P. Francfort éd., p. 55-65.

FRANCFORT (H.-P.), 1986 : La civilisation de l'Indus face au désert. *La Recherche* 181 (17), p. 1271.

FRANCFORT (H.-P.), 1987 : Aux frontières de la civilisation de l'Indus. *Dossiers histoire et archéologie* 122, p. 80-81.

FRANCFORT (H.-P.), 1988 : Le développement protohistorique du Bassin de la Ghagghar (Nord-Ouest de l'Inde). *L'Asie centrale et ses rapports avec les civilisations orientales des origines à l'âge du Fer, Actes du colloque franco-soviétique, Paris, 19-26 novembre 1985, Mémoires de la Mission archéologique française en Asie centrale tome I*. Paris : Diffusion de Boccard, p. 109-117.

FRERE (H. B. E.), 1870 : Notes on the Runn of Cutch and neighbouring region. *Journal of the Royal Geographical Society of London* 49, p. 181-207.

GAZETTEERS,

1876 : *Gazetteer of the Province of Sind*. London : A.W. Hughes.

1884 : *India District and Provincial Gazetteers, Punjab, Gazetteer of the Hissar District, 1883-1884*. Lahore.

1884 : *India District and Provincial Gazetteers, Punjab, Gazetteer of the Rothak District, 1883-1884*. Lahore.

1907 : *Gazetteer of the Province of Sind*. Karachi : E.H. Aitken.

1908 : *Punjab States Gazetteers, volume XXXVI. A., Bahawalpur State, with map, 1904*. Lahore.

1909 a : *India District and Provincial Gazetteers, Rajputana. Bikaner State*. Allahabad.

1909 b : *India District and Provincial Gazetteers, Rajputana. Jodhpur State*. Allahabad.

1909 c : *Punjab States Gazetteers, volume XVII A, Jind State, 1904, p. 211-213*. Lahore. In *District and States Gazetteers of the Undivided Punjab (prior to Independance)*, vol. IV BR, Delhi : reprinted by Publishing Corporation, 1985.

1909 d : *Punjab States Gazetteers, volume XVII A, Patiala State, 1904, p. 1-7*. Lahore. In *District and States Gazetteers of the Undivided Punjab (prior to Independance)*, vol. IV BR, Delhi : reprinted by Publishing Corporation, 1985.

1911 : *Punjab District Gazetteer, volume III A, Rohtak District, 1910, p. 1-7*. Lahore. In *District and States Gazetteers of the Undivided Punjab (prior to Independance)*, vol. IV BR, Delhi : reprinted by Publishing Corporation, 1985.

1913 : *Punjab States Gazetteers, volume XXXVI. B., Bahawalpur State, Statistical Tables*. Lahore.

1916 : *Punjab District Gazetteers, volume II A, Hissar district, part. A, 1915, p. 1-9*. Lahore. In *District and States Gazetteers of the Undivided Punjab (prior to Independance)*, vol. IV BR, Delhi : reprinted by Publishing Corporation, 1985.

1916 : *Punjab States Gazetteers, volume II. A., Loharu State, part. A, 1915, p. 1-3*. Lahore. In *District and States Gazetteers of the Undivided Punjab (prior to Independance)*, vol. IV BR, Delhi : reprinted by Publishing Corporation, 1985.

1919 : *Punjab District Gazetteers, volume VI A, Karnal District, 1918, p. 1-13*. Lahore. In *District and States Gazetteers of the Undivided Punjab (prior to Independance)*, vol. IV BR, Delhi : reprinted by Publishing Corporation, 1985.

1925 : *Punjab District Gazetteers, volume VII, part. A, Ambala District, 1923-24, p.1-14*. Lahore. In *District and States Gazetteers of the Undivided Punjab (prior to Independance)*, vol. IV BR, Delhi : reprinted by Publishing Corporation, 1985.

1935 : *Punjab States Gazetteers, Bahawalpur State, Statistical Tables, volume 45*. Lahore.

1936 : *India District and Provincial Gazetteers, Punjab, Gazetteer of the Hissar District, 1936*. Lahore.

- GEDDES (A.), 1960 : The Alluvial Morphology of the Indo-Gangetic Plain, its mapping and ... *Transactions and Papers, The Institute of British Geographers* 28, p. 253-276.
- GENTELLE (P.), 1978 : *Etude géographique de la Plaine d'Al Khanoum (Afghanistan) et de son irrigation depuis les Temps Antiques*, Publications de l'URA n°10, Mémoire n°2. Paris : Editions du CNRS.
- GENTELLE (P.), 1985 : Paysages, environnement et irrigation : hypothèses pour l'étude des 3^e et 2^e millénaires. In Francfort éd., 1985, p. 33-42.
- GHOSE (B.), KAR (A.) and HUSAIN (Z.), 1979 : The Lost Courses of the Sarasvati River in the Great Indian Desert : New Evidence from Landsat Imagery. *The Geographical Journal* 145 (3), november, p. 446-451.
- GHOSE (B.), KAR (A.) and 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, p. 8-12.
- GHOSH (A.), 1952 : The Rajputnana desert, its archaeological aspects. In *Symposium on the Rajputana desert, Proceedings, Bulletin of the National Institute of Sciences, India* 1, p. 3-50.
- GHULAM MOHAMMAD, 1964 : Waterlogging and Salinity in the Indus Plain : A Critical Analysis of Some of the Major Conclusions of the Revelle Report. *The Pakistan Development Review* 4 (3), p. 357-404.
- GIRARD (M.-C.) et (C.-M.), 1989 : *Télédétection appliquée, zones tempérées et intertropicales*. Paris : Masson, Coll. Sciences agronomiques, 260 p.
- GORRIE (R. M.), 1936 : The conservation of Punjab Water Supplies. *Indian Forester*, Nov., p. 675.
- GOUDIE (A. S.), ALLCHIN (B.) and HEDGE (K. T. M.), 1973 : The former extensions of the Great Indian Desert. *The Geographical Journal* 139 (2), p. 245-257.
- GOUROU (P.), 1982 : *Terres de bonne espérance. Le Monde tropical*. Paris : Plon, coll. Terre Humaine, 455 p.
- GREGORY (K. J.) and WALLING (D. E.), 1973 : *Drainage basin, form and process*. London : Arnold.
- GREGORY (K. J.) ed., 1983 : *Background to paleohydrology*. New York : Wiley.
- GREGORY (K. J.), 1983 : Defining paleohydrology. In Gregory (K. J.) ed., p. 3-23.
- GRIFFITH (A. L.), 1946 : The vegetation of the Thar Desert, of Sind. *Indian Forestry* 72, p. 307-309.
- GULSHAL (R.), 1934 : Ancient courses of the Punjab rivers. *Punjab University Historical Society* 3 (1), p. 81-84.
- GUPTA (S. P.) ASTHANA (S.) and NATH (A.), 1977 : Painted Grey Ware Sites in Relation to Old River Beds in Rajasthan. In AGRAWAL (D. P.) and PANDE (B. M.) eds., p. 79-92.
- GUYOT (G.), 1989 : *Signatures spectrales des surfaces naturelles*. Caen : Paradigme, coll. Télédétection satellitaire (5), 178 p.
- HAUDRICOURT (A.-G.) et HEDIN (L.), 1943 : *L'homme et les plantes cultivées*. Paris : Gallimard, coll. Géographie humaine (19), 233 p.
- HICKIN (E. J.), 1983 : River channel changes : retrospect and prospect. *Spec. Publ. int. Ass. Sediment* 6, p. 61-83. In COLLINSON (J. D.) and LEVIN (A.) eds. *Modern and Ancient Fluvial System*. ed.
- HUTCHINSON (J. B.), 1974 ed. : *Evolutionary Studies in World Crops, Diversity and Change in the Indian sub-continent*. Cambridge.
- HUTCHINSON (J. B.), 1974 : Crop Plant Evolution in the Indian Sub-continent. In Sir Joseph Hutchinson, ed. p. 151-152. Repris in ALLCHIN (F. R.), CHAKRABARTY (D. K.), eds., 1979, p. 313-315.
- INDIAN DELEGATION, 1964 : Country progress report on India, 5th Irrigation Practices seminar, New Delhi, p. 55-67.

- INDRAS, 1968 : *Lost Sarasvati*. Sardar Patel University, Wallabh Vidyanagar.
- Irrigation in India*. Review for the year 1916-1917, Calcutta, 1918. p. 37-43.
- ISRAELSEN (O. W.), 1965 : *Traité pratique de l'irrigation*, NW Intercontinental ed. Paris : Les Editions d'Organisation.
- JARRIGE (J.-F.), 1973 : La fin de la civilisation harappéenne. *Paléorient* 1, p. 263-287.
- JARRIGE (J.-F.), 1977 : La civilisation de l'Indus. *La Recherche* (76) vol. 8, mars, p. 245-252.
- JOLY (F.), 1957 : Les milieux arides. Définition. Extension. *Notes Marocaines* 8, p. 15-30.
- JOLY (F.), 1969 : Arid hydrography. *Annals of Arid Zone* 8 (2) sept., p. 283-286.
- JOSHI (K. L.), 1969 : Problems of desert agriculture in Punjab, Haryana and West Rajasthan. *Science and Culture* 35 (10), p. 550-555.
- KAR (A.), 1987 : Origin and transformation of longitudinal sand dunes in the Indian Desert. *Zeitschrift für Geomorphologie* 31 (3), p. 311-337.
- KAR (A.) and GHOSE (B.), 1984 : The Drishadvati river system of India : an assesment and new findings. *The Geographical Journal* 150 (2), July.
- KHAN (M. L.), 1960 : Recent pluviometric changes in the arid and semi-arid zones of west Pakistan. *Pakistan Geographical Review* 15, p. 1-24.
- KRISHNAN (A.) and THANVI (K. P.), 1969 : Water budget in the arid zone of Rajasthan during 1941-1960. *Annals of Arid Zone* 8 (2), Sept., p. 291-299.
- KURESHY (K. U.), 1988 : *Geography of Pakistan*. Lahore : National Book Service, 254 p.
- LABROUE (V.), LEGRIS (P.) et VIART (M.), 1965 : Bioclimats du Sous-Continent indien, Pondichery. *Travaux de la Section Scientifique et Technique de l'Institut Français de Pondichery* 3 (3).
- LAESSOE (J.), 1953 : Reflexions on Modern and Ancient Oriental Waterworks. *Journal of Cuneiform Studies* 8, p. 5-26.
- LAL (B. B.), 1979 : Essays in indian protohistory. In AGRAWAL (D. P.) and CHAKRABARTY (D. K.) eds., p. 65-77.
- LAL (B. B.), GUPTA (S. P.) eds., 1984 : *Frontiers of the Indus Civilization*. Sir Mortimer Wheeler Commemoration Volume. Delhi : Books & Books.
- LAL (S. B.), 1977 : Selective sorting and palaeoclimate of Rajasthan. In *Workshop on paleoclimate and archaeology of Rajasthan and Gujarat*. Ahmedabad : Physical Research Laboratory.
- LAMBRICK (H. T.), 1964 : *Sind : a general introduction*. Hyderabad, Sindhi Adabi Board, app. 1, p. 229-236.
- LAMBRICK (H. T.), 1967 : The Indus flood plain and the Indus civilization. *The Geographical Journal* 133 (4), p. 483-495. Et 1979 : in POSSEHL (G. L.) ed., p. 313-322.
- LAW (B. C.) ed., 1968 : *Mountains and Rivers of India*, 21st International Geographical Congress, National Committee for Geography, Calcutta.
- LEGRIS (P.), 1963 : La végétation de l'Inde. Ecologie et flore. In *Travaux du Labo. Forestier de Toulouse IV, Geo. Forestière, 1^o section : l'Asie, vol. 2 : l'Asie méridionale*. Toulouse : Faculté des Sciences. Et in : *Travaux de la section scientifique de l'Institut Français de Pondichery* 6, thèse.
- LELOUP (Y.), 1964 : L'Aménagement du bassin de l'Indus. *Annales de Géographie* 397, p. 349-354.
- LEOPOLD (L.-B.), 1964 : *Fluvial processes in geomorphology*. London : Freeman.
- LESHNIK (L. S.), 1973 : Land Use and Ecological Factors in Prehistoric North West India. In HAMMOND (N.) ed, *South Asian Archaeology*. London, p. 67-84.
- LOGIN (T.), 1872 : Memorenda on the most Recent Geological Changes of the Rivers and Plains of Northern India... *Quarterly Journal of the Geological Society* 28 (1), may, p. 186-200.

- LUSTIG (L. K.), 1968 : Appraisal of research on geomorphology and surface hydrology of desert environments. In Mc GINNIES et al. eds, *Deserts of the world*, p. 95-283.
- MABBUTT (J.-A.), 1969 : Problems in the climatic geomorphology of arid lands. *Annals of Arid Zone* 8 (2), Sept., p. 209-224.
- MACLAGAN (R.), 1885 : The Rivers of the Punjab. *Proceedings of the Royal Geographical Society* 7, p. 705-719.
- MAINGUET (M.), 1984 : A classification of dunes based on aeolian dynamics and the sand budget. In EL-BAZ (F.) ed., *Deserts and arid lands*, The Hague : Martinus Nijhoff Publishers, p. 31-58.
- MALEK (C.), 1989 : *Diagnostic du paysage à partir des données satellitaires, application au Sahel - Oudalan (Burkina - Faso)*. Thèse Univ. Paris VII, 205 p.
- MANN (H. S.), SHANKARANARAYAN (K. A.) and DHIR (R. P.), 1984 : Natural resource survey and environmental monitoring in arid-Rajasthan using remote sensing. In El-Baz (F.) ed., *Desert and arid lands*, Martinus Nijhoff Publishers, p. 157-170.
- MARSHALL (J.), 1931 : *Mohenjo-Daro and the Indus Civilization*. London : A. Probsthain.
- MEHER-HOMJI (V. M.), 1963 : *Les bioclimats du sub-continent indien et leurs types analogues dans le monde*. Toulouse, Faculté des Sciences.
- MEHER-HOMJI (V. M.), 1973 : Is the Sind-Rajasthan Desert the Result of a Climatic Change ? *Geoforum - Journal of Physical, Human and Regional Geosciences* 15 (3), p. 47-57.
- MEHER-HOMJI (V. M.), 1980 : The Thar Desert : Its Climatic History. *Man and Environment* 4, p. 1-7.
- MERGHOUB (Y.), 1985 : *Reconnaissance et analyse de formes sur des images de télédétection, modélisation par la morphologie mathématique*. Thèse de 3ème cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, 167 p.
- MERING (C.) et DEBAINE (F.), 1988 : Analysis of satellite image applied to archaeological research in North-West India : delimitation of linear networks. *Proceedings of the Ninth Asian Conference on Remote Sensing*, 23-24 nov., ACRS, Bangkok, p. B-2-1 - B-2-8.
- MISRA (S. D.), 1962 : Some observations on the advancement of Rajputana desert. *The Deccan Geographer* 1 (2), p. 28-33.
- MISRA (V. N.), 1977 : Evolution of the pattern of the human settlement in the arid and semi-arid regions. In JAISWAL (P. L.) ed., *Desertification and its control*, New Delhi : Indian Council of agricultural Research, p. 10-24.
- MISRA (V. N.), 1984 : Climate, a Factor in the Rise and Fall of the Indus Civilization - Evidence from Rajasthan and Beyond. In LAL (B. B.) and GUPTA (S. P.) eds., p. 461-489.
- MUGHAL (M. R.), 1980 : *Archaeological surveys in Bahawalpur*. Karachi : Department of Archaeology and Museums.
- MUGHAL (M. R.), 1981 : New archaeological evidence from Bahawalpur. In DANI (A. H.) ed., p. 33-42.
- MUGHAL (M. R.), 1982 : Recent archaeological research in the Cholistan desert. In POSSEHL (G. K.) ed., p. 85-95.
- MUGHAL (M. R.), 1984 : The post harappan phase in Bahawalpur district. In LAL (B.B.) and GUPTA (S. P.) eds., p. 499-503.
- NAQUI (S. N.) and RAHAMATULLAH (M.), 1962 : Weather and climate of Pakistan. *Pakistan Geographical Review* 17 (1), p. 1-18.
- NATIONAL INSTITUTE OF SCIENCES OF INDIA, 1952 : Symposium on the Rajputana desert, *Proceedings. Bulletin of the National Institute of Sciences of India* 1.
- NEARCHUS, 1875 : The lost river of the Indian Desert. *Calcutta Review* 60, p. 323-351.
- OLDHAM (C.F.), 1874 : Lost Rivers of the Indian Desert. *Calcutta Review* 59, p. 1-29 (reprinted in *Selections from the Calcutta Review* second series 3, 1894, p. 1-56).

- OLDHAM (C. F.), 1893 : The Saraswati and the Lost River of the Indian Desert. *Journal of the Royal Asiatic Society* 34, p. 49-76.
- OLDHAM (R. D.), 1886 : On the probable changes in the geography of the Punjab and its rivers : an historico-geographical study. *Journal of the Asiatic Society of Bengal* 55 (2), p. 322-343.
- PAGNEY (P.), 1976 : *Les climats de la Terre*. Paris : Masson.
- PAKISTAN COUNCIL OF RESEARCH IN WATER RESOURCES (PCRWR), 1986 : *Desertification processes in Cholistan desert*. Pakistan Desertification Unit, 118 p.
- PAL (Y.), SAHAI (B.), SOOD (R. K.), and AGRAWAL (D. P.), 1980 : Remote sensing of the "lost" Sarasvati River. *Proceedings Indian Acad. Science* 89 (3), Novem. p. 317-331.
- PANDE (B. M.), 1977 : Archaeological Remains on the Ancient Sarasvati. In : AGRAWAL (D. P.) and PANDE (B. M.) eds., p. 55-59.
- PANDEY (S.), 1969 : Some aspects of arid zone geomorphology. *Annals of Arid Zone* 8 (2), p. 196-208.
- PASCOE (E. H.), 1919 : The Early History of the Indus, Brahmaputra and Ganges. *Quarterly Journal of the Geological Society* 75, London, p. 138-157.
- PAYLORE (P.), 1968 : *Deserts, of the world, an appraisal of research into their physical and biological environments*. Tucson, Arizona, The University of Arizona Press, XXVIII.
- PAYLORE (P.), 1976 a : *Desertification : a world bibliography*. Tucson, University of Arizona, Office of Arid Land Studies.
- PAYLORE (P.), 1976 b : Desertification : what, where, why, who ? In Paylore (P.) and R.A. HANEY (R. A. Jr.) ed., *Desertification : process problems, perspectives*, Tucson, University of Arizona, p. 1-10.
- PEDELABORDE (P.), 1970 : *Les moussons*. Paris : Colin, coll. U2.
- PIGOTT (S), 1950 : *Prehistoric India to 1000 B. C.* Harmondsworth : Penguin Books.
- PITHAWALLA (B. M.), 1952 : The great Indian desert, a geographical study. In Symposium of the Rajputana desert, *Proceedings, Bulletin of the National Institute of Sciences of India* 1, p. 137-150.
- PLANHOL (X. de) et ROGNON (P.), 1970 : *Les zones tropicales arides et subtropicales*. Paris : Colin, coll. U, 487 p.
- PLANHOL (X. de), 1975 : Les pasteurs de l'Inde. *Revue Géographique de l'Est* 15 (3-4), p. 297-302.
- POSSEHL (G. L.) ed., 1979 : *Ancient cities of the Indus*. New-Delhi : Vikas Publishing House.
- POSSEHL (G. L.) ed., 1982 : *Harappan Civilization, A Contemporary Perspective*. New Delhi, Bombay, Calcutta : Oxford & IBH Publishing Co. and American Institute of Indian Studies.
- PRATT (W. K.), 1978 : *Digital Image Processing*. New York : Wiley & Sons.
- RAHEJA (P. C.), 1962 : Recherches et travaux relatifs à la zone aride de l'Inde. UNESCO, *Zone Aride* 15, mars, p. 7-13.
- RAIKES (R. L.), 1969 : Kalibangan : death from natural causes. *Antiquity* 168, p. 286-291.
- RAIKES (R.), 1965 : Physical Environment and Human Settlement in Prehistoric Times in Near and Middle East : A Hydrological approach. *East and West* 15 (3-4), p. 179-193
- RAIKES (R.), 1967 : *Water, Weather, and Prehistory*. London : Humanities Press.
- RAIKES (R. L.) and DYSON (Jr., R. H.), 1961 : The Prehistoric Climate of Baluchistan and the Indus Valley. *American Anthropologist* 63 (2), p. 265-281.
- RAPSON (E.), 1984 : Ancient India from the earliest times to the first century. In *Cambridge History of India* 1. Cambridge University Press.
- RATHJENS (C.), 1957 : Physische - geographische Beobachtungen im Nord-Westindischen Trockengebiet (Ein erster Trochungsbericht). *Erdkunde* 11 (1), p. 49-58.

- RATNAGAR (S.), 1986 : An aspect of harappan agricultural production. *Studies in History* 2, 2 N.S., Sage Publications, New-Delhi, p. 137-153.
- RAVERTY (H. G.), 1892 : The Mirhan of Sind and its tributaries : a geographical and historical study. *Journal of the Asiatic Society of Bengal* 61, p. 155-297 et p. 298-312.
- RAY (A.) and CHAKRABARTI (D. K.), 1975 : Studies in Ancient Indian Technology and Production : A Review. *Journal of the Economic and Social History of the Orient*, p.-229-230. Repris in : ALLCHIN (F. R.), CHAKRABARTY (D. K.), eds., 1979, p. 315-317.
- RAYCHAUDHURY (S. P.), 1963 : *Soils of India*. Indian Council of Agricultural Research.
- REBUFFEL (V.), MIR ALAI (J.-L.), 1983 : *Utilisation de la morphologie mathématique en télédétection*. Mémoire de l'Ecole des Mines, Centre de Géostatistique et de morphologie mathématique, Fontainebleau.
- RECLUS (E.), 1883 : *Nouvelle géographie universelle, La Terre et les hommes*, tome VIII : *L'Inde et l'Indo-Chine*. Paris : Hachette.
- RICE (I.) and MALIK (A. K.), 1964 : Climatology of the crop seasons of India. *Indian Journal of Meteorology and Geophysics* 15 (4), p. 555-564.
- ROGNON (P.), 1989 : *Biographie d'un désert*. Paris : Plon, coll. SCIENTIFIQUE, Synthèse, 347 p.
- ROSSIGNOL-STRICK (M.) and PLANCHAIS (N.), 1989 : Climate patterns revealed by pollen and oxygen isotope records of a Tyrrhenian sea core. *Nature* 342, Nov., p. 413-416.
- ROY CHOWDHURY, 1943 : The Sarasvati. *Science and Culture* 8, p. 468-474.
- SARNTHEIN (M.), 1978 : Sand deserts during glacial maximum and climatic optimum. *Nature* 272, p. 43-46.
- SCHOWENGERDT (R. A.), 1983 : *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing*. Orlando : Academic Press, Inc., 249 p.
- SCHUMM (S. A.), 1977 : *The Fluvial System*. New-York : John Wiley & Sons.
- SCHUMM (S. A.), 1981 : Evolution and response of the fluvial system ; sedimentologic implications. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication* 31, p. 19-29.
- SERRA (J.), 1985 : *Image processing*. New York : Academic Press.
- SETH (S. K.), 1963 : A review of evidence concerning changes of climate in India during the protohistorical and historical periods. UNESCO, *Zone aride XX*, p. 443-454.
- SETH (S. K.), 1978 : The Dessication of the Thar desert and its Environs during the Protohistorical and Historical Periods. In BRICE (W. C.) ed., p. 279-305.
- SHARMA (R. P.), 1977 : The environmental setting of the CCP people . In *Workshop on palaeoclimate and archaeology of Rajasthan and Gujarat*. Ahmedabad. Physical Research Laboratory.
- SHARMA (S. C.), 1974 : The description of rivers in the Rgveda. *The Geographical Observer* 10, p.-79-85.
- SIDDIQI (S. I.), 1944 : River changes in the Ghaggar plain. *The Indian Geographical Journal* 19 (4), p. 139-148.
- SIDDIQI (S. I.), 1945 : The physionomy of the Ghaggar plain. *The Indian Geographical Journal* 20 (1), p. 87-92.
- SIDDIQI (S. I.), 1946 : The physical history of the Ghaggar. *The Indian Geographical Journal* 21 (1), p. 18-22.
- SINGH (G.), 1952 : The Rajputana desert : geography. In *Symposium on the Rajputana desert, Proceedings, Bulletin of the National Institute of Science of India* 1, p. 151-152.
- SINGH (G.), 1969 : Paleobotanical features of the Thar desert. *Annals of Arid Zone* 8 (2), p. 188-195.

- SINGH (G.), 1971 : The Indus Valley Culture seen in the Context of Post-Glacial Climate and Ecological Studies in North-West India. *Archaeological and Physical Anthropology in Oceania* 6 (2), p. 185-186. Repris in ALLCHIN (F. R.), CHAKRABARTY (D. K.), eds., 1979, p. 281-282.
- SINGH (G.), JOSHI (R. D.), and SINGH (A. B.), 1972 : Stratigraphic and radiocarbon evidence for the age and development of the salt lake deposits in Rajasthan, India. *Quaternary Research* 2 (4), p. 496-505.
- SINGH (G.), JOSHI (R. D.), CHOPRA (S. K.) and SINGH (A. B.), 1974 : Late quaternary history of vegetation and climate of the Rajasthan desert, India. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London : Biological Science* 889, p. 467-501.
- SINGH (S.) and GHOSE (B.), 1977 : Geomorphology of the Luni basin and its paleoclimatic inferences. In AGRAWAL (D. P.) and PANDE (B. M.) eds., p. 135-146.
- SINGHVI (A. K.), SHARMA (Y. P.) and AGRAWAL (D. P.), 1982 : Thermoluminescence dating of sand dunes in Rajasthan, India. *Nature* 295, p. 313-315.
- SION (J.), 1929 : *Géographie Universelle. Asie des Moussons (vol. II), Troisième partie : L'Inde*. Paris, Colin.
- SOOD (R. K.), and SAHAI (B.), 1983 : Hydrographic changes in Northwestern India. *Man and Environment* 7, p. 166-169.
- SPATE (O. H. K.) and LEARMONTH (A. T. A.), 1967 : *India and Pakistan, a General and Regional Geography*. Methuen : London.
- STEIN (M. A.), 1942 a : A survey of ancient sites along the "Lost" Sarasvati river. *The Geographical Journal* 99, p. 173-182.
- STEIN (M. A.), 1942 b : An Archaeological Tour Along the Ghaggar - Hakra River. In GUPTA (S. P.) ed., 1989, Kusumanjali Prakashan, Meerut, 97 p.
- SURFACE WATER CIRCLE, 1962 : *Annual report of river and climatological data of West Pakistan*. Lahore : Water and Power Development Authority.
- SYMPOSIUM ON PROBLEMS OF INDIAN ARID ZONE, 1964 : Scientific Papers, organised jointly by Ministry of Education and Unesco South Asian Science Cooperation Office, New Delhi.
- TAYLORE (G. C. Jr.), 1965 : Water, history and the Indus Plain. *Natural History* 74, p. 40-49.
- THAPPAR (B. K.), 1977 : Climate during the period of the Indus Civilization : Evidence from Kalibangan. In AGRAWAL (D. P.) and PANDE (B. M.) eds., p.67-73.
- THAPPAR (B. K.), 1982 : The Harappan Civilization : Some Reflections on Its Environments and Resources and Their Exploitation. In POSSEHL (G. L.) ed., p. 4-13.
- THAPPAR (B. K.), 1984 : Six Decades of Indus Studies. In LAL (B. B.) and GUPTA (S. P.) eds., p. 1-22.
- THIBAUT (C.), 1984 : *Les possibilités d'exploitation des données Thematic Mapper : bases pour des propositions d'études*. Paris, I.A.U.R.I.F. novembre, 22 p.
- TIPPON (R. J.), 1959 : Irrigation and Drainage in West Pakistan. *American Society of Civil Engineers, Annual Convention*, october 1959, 28 p.
- TREMENHEERE, 1867 : *Journal of Geographical Society of London* 37, p. 68-91.
- TRICART (J.), 1969 : *Le modelé des régions sèches, Traité de Géomorphologie*, tome IV. Paris : S. E. D. E. S., 472 p.
- VAN CAMPO (M.), 1984 : Relations entre la végétation de l'Europe et les températures de surface océaniques après le dernier maximum glaciaire. *Pollen et Spores* 26, n°3-4, p. 497-518.
- VASISHTHA (M.), 1962 : The Ancient Geography of North West India. *The National Geographical Journal of India* 8 (3-4), p. 197-214.
- VERSTAPPEN (H. Th.), 1968 : On the Origin of Longitudinal (Seif) Dunes. *Zeitschrift für Geomorphologie N. F.* 12, p. 200-220.

- VISHNU-MITRE, 1974a : Plant remains and climate from the Late Harappan and other chalcolithic cultures of India . A study in interrelationships. *Geophytology* 4 (1), p. 46-53.
- VISHNU-MITRE, 1974b : Paleobotanical Evidence in India. In Sir Joseph HUTCHINSON (J. B.) ed., p. 3-30. Repris in : ALLCHIN (F. R.) and CHAKRABARTY (D. K.), eds., 1979, p. 283-313.
- VISHNU-MITRE and SAVITHRI (R.), 1982 : Food economy of the Harappan's. In POSSEHL (G.) ed., *Harappan Civilization : a Contemporary Perspective*, Delhi, p. 217-218.
- VISHNU-MITRE, 1982 : Harappan Civilisation and the Need, for a New approach. In POSSEHL (G.) ed., *Harappan Civilization : a Contemporary Perspective*, p. 37.
- VOLLE (M.), 1981 : *Analyse des données*. Paris : Economica, coll. "Economie et statistiques avancées".
- VYAS (L. N.) and GUPTA (R. S.), 1965 : Observation on the vegetation of some sandy areas in Alwar district, Northeast Rajasthan. *Annals of Arid Zone* 4 (1), p. 84-92.
- WADIA (D. N.), 1937 : Recent changes in northern India and their effect upon the drainage of the Indo-Gangetic basin. *Science and culture* 2, p. 384-387.
- WADIA (D. N.), 1938 : The post-tertiary hydrography of northern India and the changes in the courses of its rivers during the last geological epoch. *Symposium on River Physics, Proc. Nat. Inst. Sci. India* 4, p. 387-394.
- WADIA (D. N.), 1953 : *Geology of India*. London : Macmillan, 529 p.
- WASSON (R. J.), SMITH (G. I.) and AGRAWAL (D. P.), 1984 : Late quaternary sedimentary minerals and inferred geochemical history of Didwana lake, Thar desert, India. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 46, 345-378.
- WEBER (S. A.), 1991 : *Plants and Harappan Subsistence. An Exemple of Stability and Change from Rojdi*. New Delhi : Oxford & IBH Publishing Co. and American Institute of Indian Studies.
- WHEELER (R. E. M.), 1959 : *Early India and Pakistan*. London.
- WHEELER (R. E. M.), 1968 : *The Indus Civilization*. Cambridge University Press.
- WHITEHEAD (R. B.), 1932 : The River Courses of the Panjab and Sind, Indian. *Antiquary* 61, p. 163-169.
- WILHELMY (H.), 1969 : Das Urstromtal am Ostrand der Induse ebens und das Sarasvati-Problem. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplement band* 8, p. 76-93.
- WILCOX (G. H.), 1989 : *Archaeobotanical analysis from five protohistoric sites in Haryana (Northwest India)*. Interim report to be submitted to the south Asian Conference (Musée Guimet), juillet 1989, 17 p.
- WOOD (W. A.), 1924 : Rivers and Man in the Indus-Ganges Plains. *The Scottish Geographical Magazine* 40, p. 1-16.
- WOOLNER (A. C.), 1931 : The Rgveda and the Panjab. *Bulletin of the School of Oriental Studies* 6 (2), p. 549-554.

Table des tableaux

Tabl. 1 :	Les données climatiques : stations (d'W. en E.) et sources.....	15
Tabl. 2 :	Années sèches et années pluvieuses entre 1900 et 1931	20
Tabl. 3 :	Les différentes phases culturelles reconnues en Haryana et au Cholistan.....	30
Tabl. 4 :	Superficie des sites du Cholistan.....	40
Tabl. 5 :	Différentes séquences chronologiques et culturelles repérées sur les sites mis au jour en Haryana (secteur d'Hisar) et nombre de sites correspondant.....	41
Tabl. 6 :	Nombre de sites par époque (trois degrés de certitude sont attachés aux datations, sûr (I), probable (II), incertaine (III)).	44
Tabl. 7 :	Superficie des sites dans le secteur d'Hisar.....	46
Tabl. 8 :	Le calendrier agricole dans la région de Hisar et dans celle de Bahawalpur.....	50
Tabl. 9 :	Les images traitées.....	101
Tabl. 10 :	Rappel des caractéristiques des différents capteurs.....	102
Tabl. 11 :	Superficie des sites archéologiques sur le terrain et sur l'image (région de Hisar).....	107
Tabl. 12 :	Superficie des sites archéologiques sur le terrain et sur l'image (Cholistan).....	108
Tabl. 13 :	Les cartes topographiques.....	121
Tabl. 14 :	Les cartes topographiques anciennes.....	122
Tabl. 15 :	Variance expliquée par les axes factoriels.....	127
Tabl. 16 :	Caractéristiques spectrales de l'image TM 150-040 du 14 février 1988	142
Tabl. 17 :	Caractéristiques de l'échantillon extrait de l'image TM 150-040 du 14 février 1988	142
Tabl. 18 :	Structure hiérarchique de l'image TM 150-040.....	147
Tabl. 19 :	Caractéristiques spectrales de l'image Spot 203-292 du 22 mai 1986(secteur ouest : Bhadra - Hisar).....	192
Tabl. 20 :	Caractéristiques spectrales de l'image Spot 204-292 du 22 mai 1986 (secteur est : Hisar - Bhiwani).....	192
Tabl. 21 :	Caractéristiques de l'échantillon extrait de l'image Spot 203-292 du 22 mai 1986 (secteur ouest : Bhadra - Hisar).....	193
Tabl. 22 :	Structure hiérarchique de l'image SPOT 203-292	193
Tabl. 23 :	Secteur ouest (Bhadra - Hisar) - Niveau II : distances entre les centres de gravité des classes.....	198
Tabl. 24 :	Caractéristiques de l'échantillon extrait de l'image Spot 204-292 du 22 mai 1986 (secteur Hisar- Bhiwani).....	219
Tabl. 25 :	Structure hiérarchique de l'image SPOT 204-292	220
Tabl. 26 :	Distribution des classes du niveau II de l'image 204-292 (est) dans celles du niveau II de l'image 203-292 (ouest) (%)	232
Tabl. 27 :	Distribution des classes du niveau II de l'image 203-292 (ouest) dans celles du niveau II de l'image 204-292 (est) (%)	232
Tabl. 28 :	Distribution des classes du niveau IV de l'image 204-292 (est) dans celles du niveau III de l'image 203-292 (ouest) (%)	233
Tabl. 29 :	Distribution des classes du niveau III de l'image 204-292 (ouest) dans celles du niveau IV de l'image 203-292 (est) (%)	233
Tabl. 30 :	Nombre de pixels-sites correspondant à chacun des types d'environnement retenus à l'ouest (203-292) et à l'est (204-292).....	255
Tabl. 31 :	Surfaces couvertes par les différentes classes du niveau II de l'image ouest (203-292) en pourcentage du nombre total de pixels.....	255
Tabl. 32 :	Distribution des pixels sites dans chacune des unités retenues pour le secteur ouest (203-292).....	256
Tabl. 33 :	Distribution des pixels sites dans chacune des unités retenues pour le secteur est (204-292).....	256
Tabl; 34 :	Les sites archéologiques reportés sur l'image SPOT 203-292 (ouest) : coordonnées géographiques, superficie datation et carte topographique	303

Tabl. 35 : Les sites archéologiques reportés sur l'image SPOT 204-292 (est) : coordonnées géographiques, superficie datation et carte topographique	315
Tabl. 36 : Nombre de sites recensés pour chaque période et chaque fonction (d'après Mughal, 1980).....	319

Les tableaux en annexe

Tabl. 1A : Précipitations annuelles : moyennes (x), minima, maxima, écart-type (s), en mm, coefficient de variation (V) en %.....	341
Tabl. 2A : Précipitations saisonnières en mm : moyenne (X), écart-type (s), coefficient de variation (V) en %, part des précipitations d'une saison sur le total annuel (%)	342
Tabl. 3A : Les précipitations mensuelles.....	343
Tabl. 4A : Précipitations d'été : juin à septembre (mm / pourcentage des précipitations d'été).....	343
Tabl. 5A : Nombre d'années sèches et d'années pluvieuses entre 1900 et 1931 (selon deux critères : $\pm s$ et $\pm 60\%$ de la moyenne).....	343
Tabl. 6 A: Intensité des précipitations et nombre de jours pluvieux	344
Tabl. 7A : Températures : moyennes mensuelles et annuelles (°C).....	344
Tabl. 8A : Températures : maxima moyens mensuels (°C).....	344
Tabl. 9 A : Températures : minima moyens mensuels (°C)	344
Tabl. 10 A : Direction des vents (PCRWR, 1986)	344
Tabl. 11A-a : Vitesse des vents m/sec. (PCRWR, 1986).....	344
Tabl. 11A-b : Vitesse des vents km/h (Alkchin & Goudie, 1978).....	344

Table des figures

Fig. 1 :	Deux secteurs d'étude aux marges du désert de Thar.....	2
Fig. 2 :	La limite entre le désert (BW) et la steppe (BS) selon W. Köppen.....	10
Fig. 3 :	La limite (-40) entre le domaine aride et le semi-aride selon la formule de Thornthwaite.....	10
Fig. 4 :	La limite (5) entre le domaine aride et le semi-aride selon la formule d'E. de Martonne.....	11
Fig. 5 :	La limite entre les domaines désertique (XS6) et subdésertique (XS5) selon l'indice xérothermique de Gaussen et Bagnouls.....	11
Fig. 6 :	Régime des vents (Durand-Dastès, 1965).....	13
Fig. 7 :	Les données climatiques : les stations étudiées, précipitations annuelles (d'après Seth, 1978), la direction des vents.....	16
Fig. 8 :	L'évolution du réseau d'irrigation entre 1929 (d'après Sion) et 1960 (in Leloup) : le remplacement des canaux de crue par des canaux pérennes.....	24
Fig. 9 :	L'irrigation actuelle à partir du Sutlej.....	25
Fig. 10 :	L'extension de la civilisation de l'Indus.....	32
Fig. 11 :	La prospection géo-archéologique d'Aurel Stein au Cholistan, entre Hanumangarh et Derawar (1942).....	38
Fig. 12 :	La prospection archéologique de M. R. Mughal au Cholistan, entre Fort Abbas et Rahimyar Khan (1982).....	59
Fig. 13 :	Prospection archéologique de la M.A.F.I. en Haryana. Distribution des sites entre Bhadra et Hisar.....	42
Fig. 14 :	Prospection archéologique de la M.A.F.I. en Haryana. Distribution des sites entre Bhadra et Siswal.....	43
Fig. 15 :	Nombre de sites par époque (degré I, II, III confondus).....	44
Fig. 16 :	Nombre de nouveaux sites pour chaque époque (degré I, II, III confondus).....	45
Fig. 17a :	Nombre de sites abandonnés après chacune des périodes (degrés I, II, III).....	45
Fig. 17b :	Nombre de sites abandonnés après chacune des périodes (degrés I, II, III) en pourcentage du nombre de sites par époque.....	45
Fig. 18 :	Nombre de sites ayant connu une occupation continue d'une période à la suivante.....	46
Fig. 19 :	Le réseau hydrographique.....	59
Fig. 20 :	Les limites de "l'ancien lit de la rivière Hakra" entre Fort Derawar et fort Dingarh telles que représentées sur les cartes du Punjab Revenue Survey (Bhawulpoor State, 1876) au one inch to one mile. Extrait réduit.....	62
Fig. 21 :	Les cours actuels et anciens des rivières du Pendjab selon R. D. Oldham (1886).....	64
Fig. 22 :	Les cours de la Hakra selon C. F. Oldham (1893).....	65
Fig. 23 :	Reconstitution de l'Histoire du bassin de la Ghaggar-Hakra-Saraswati selon H. Wilhelmy (1969).....	70
Fig. 24 :	Les anciens cours de la Saraswati selon B. Ghose, A. Kar et Z. Husain (1979).....	72
Fig. 25 :	Le tracé de la Ghaggar-Sarawat selon Pal, Sahai, Sood et Agrawal (1980).....	73
Fig. 26 :	Le "cours perdu de la Hakra" selon M. R. Mughal (1980).....	74
Fig. 27 :	Les terrasses de la Yamuna à son entrée dans la plaine de Delhi.....	76
Fig. 28 :	Les canaux prenant leur eau dans la Yamuna dans le Territoire de Delhi selon Colvin (1883).....	79
Fig. 29 :	Le tracé du Hisar distributary (du Western Yamuna canal) entre Hisar et Bhadra. Extrait de la carte n° 44-0 (Punjab, Punjab States and Rajputana, Hissar) de 1922 au 1/253440 (quarter inch).....	80
Fig. 30 :	Le réseau d'irrigation dans le secteur de Bahawalpur en 1876 : des canaux d'inondation dérivés du Sutlej. Extrait réduit (1cm = m) de la feuille n°11 Punjab revenue Survey Map, Bhawalpoor State, 1876 au one inch to one mile.....	89
Fig. 31 :	Le réseau d'irrigation dans le secteur de Bahawalpur en 1876 : des canaux d'inondation dérivés du	

Sutlej. Extrait réduit (1cm = m) de la feuille n°11 Punjab revenue Survey Map, Bhawalpur State, 1876 au one inch to one mile.	90
Fig. 33 : Courbes schématiques de réflectance pour différents types de couverture du sol	116
Fig. 34 : Courbes schématiques de réflectance de la végétation selon le degré de flétrissement	117
Fig. 35 : Courbes schématiques de réflectance de l'eau	117
Fig. 36 : Courbes schématiques de réflectance de trois types de sols secs et humides	118
Fig. 37 : Transformation locale	128
Fig. 38 : Transformation de voisinage	128
Fig. 39 : Projection d'une fenêtre 3x3 sur une image (Schowengerdt, 1983)	129
Fig. 40 : Erosion binaire	131
Fig. 41 : Dilatation binaire	131
Fig. 42 : Erosion de la FTG	132
Fig. 43 : Dilatation de la FTG	132
Fig. 44 : Fermeture de la FTG	132
Fig. 45 : Chapeau-haut-de-forme	132
Fig. 46 : Variation du ratio R_L	134
Fig. 47 : Longueur géodésique d'un objet ($L_g(x)$) ; centre géodésique ($g(x)$) ; extrémités géodésiques ($e(x)$) (Coster et al., 1985)	135
Fig. 48 : Différents types de linéaments	137
Fig. 49 : Première composante principale	137
Fig. 50 : Chapeau-haut-de-forme (90°) sur Fig. 49	137
Fig. 51 : Chapeau-haut-de-forme (30°) sur Fig. 49	137
Fig. 52 : Erosion sur Chapeau-haut-de-forme (150°)	137
Fig. 53 : Reconstruction	137
Fig. 54 : TM 150-040 du 14/02/92 - Image du canal TM4 A : Amadhpur East - B : Bahawalpur - De : Derawar - Di : Dingarh - M : Marot	143
Fig. 55 : Image TM 150-040 du 14/02/1988 - Composition colorée TM1 (en bleu) - TM4 (en vert) - TM7 (en rouge) A : Amadhpur East - B : Bahawalpur - De : Derawar - Di : Dingarh - M : Marot	145
Fig. 56 : Niveau II : comportement moyen des classes dans les différentes bandes spectrales	148
Fig. 57 : Niveau II : coordonnées des centres de gravité des classes sur l'axe discriminant	148
Fig. 58 : Surfaces couvertes par les classes du niveau II (rapport du nombre de pixels d'une classe sur le nombre total de pixels classés)	148
Fig. 59 : Niveau II : valeurs moyennes des indices de végétation (NDVI) et de brillance (IBRI) calculées pour chaque classe	148
Fig. 60 : Niveau II : partition de l'image TM 150-040 en deux classes (incrément 8) A : Amadhpur East - B : Bahawalpur - De : Derawar - Di : Dingarh - M : Marot	151
Fig. 61 : Niveau III : comportement moyen des classes dans les différentes bandes spectrales	156
Fig. 62 : Niveau III : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 1 sur l'axe discriminant	156
Fig. 63 : Niveau III : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 2 sur l'axe discriminant	156
Fig. 64 : Surfaces couvertes par les classes du niveau III (rapport entre le nombre de pixels d'une classe et le nombre total de pixels classés)	156
Fig. 65 : Niveau III : valeurs moyennes de l'indice de végétation verte (NDVI) et de l'indice de brillance (IBRI) calculées pour chaque classe	156
Fig. 66 : Niveau III : partition des classes du niveau II (4 classes) A : Amadhpur East - B : Bahawalpur - De : Derawar - Di : Dingarh - M : Marot	157
Fig. 67 : Niveau IV : comportement moyen des classes dans les différentes bandes spectrales	161
Fig. 68 : Niveau IV : comportement moyen des classes issues de la classe 1.1 dans les différentes bandes spectrales	161
Fig. 69 : Niveau IV : comportement moyen des classes issues de la classe 1.2 dans les différentes bandes spectrales	161
Fig. 70 : Niveau IV : comportement moyen des classes issues de la classe 2.1 dans les différentes bandes spectrales	161

Fig. 71 :	Niveau IV : comportement moyen des classes issues de la classe 2.2 dans les différentes bandes spectrales	161
Fig. 72 :	Niveau IV : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 1.1 sur l'axe discriminant	162
Fig. 73 :	Niveau IV : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 1.2 sur l'axe discriminant	162
Fig. 74 :	Niveau IV : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 2.1 sur l'axe discriminant	162
Fig. 75 :	Niveau IV : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 2.2 sur l'axe discriminant	162
Fig. 76 :	Surfaces couvertes par les classes du niveau IV (rapport entre le nombre de pixels d'une classe et le nombre total de pixels classés)	162
Fig. 77 :	Valeurs moyennes de l'indice de végétation verte (NDVI) et de l'indice de brillance (IBRI) calculées pour chaque classe du niveau IV	162
Fig. 78 :	Niveau IV: partition des classes du niveau III : 9 classes A : Amadhpur East - B : Bahawalpur - De : Derawar - Di : Dingarh - M : Marot	163
Fig. 79 :	Les dunes paraboliques a : (Manguet, 1984, p. 48) b : (Cooke <i>et al.</i> 1973, p. 288)	169
Fig. 80 :	Dunes paraboliques mises en place par un vent de direction SW / NE. Les bras effilés vers l'amont du vent, plus sombres, sont stabilisés par la végétation (image du canal TM7, quart SE de l'image). 1cm = 1,1 km	165
Fig. 81 :	Dunes paraboliques . Image du canal TM 7 (Fig. 80) filtrée (filtre mettant en évidence les directions où le gradient est maximum). 1 cm = 1,1 km.	165
Fig. 82 :	Dunes paraboliques, formes en rateaux : les bras sont alignés SW/NE (direction des vents dominants de mousson) . Image du canal TM7 (quart sud-est de l'image) (1 cm = 1,1 km)	167
Fig. 83 :	Dunes paraboliques, formes en rateaux. Fig. 82 filtrée. 1 cm = 1,1 km	167
Fig. 84 :	"L'ancien lit de la rivière Hakra" entre les forts de Mirgarh (Meerhurh) à l'est et de Jamgarh (Jamgurh) à l'ouest. <i>Punjab Revenue Survey Map</i> , Bhawalpooor State, 1875, feuille n° 19.(extrait réduit)	176
Fig. 85 :	"L'ancien lit de la rivière Hakra" à l'ouest de Marot. <i>Punjab Revenue Survey Map</i> , Bhawalpooor State, 1875, feuille n° 18.(extrait réduit).	177
Fig. 86 :	"L'ancien lit de la rivière Hakra" aux environs du fort de Moigarh (Moigurh) <i>Punjab Revenue Survey Map</i> , Bhawalpooor State, 1875, feuille n° 18.(extrait réduit)	178
Fig. 87 :	"L'ancien lit de la rivière Hakra" entre Fort Dingarh (Deengurh) à l'est et Fort Bara à l'ouest. <i>Punjab Revenue Survey Map</i> , Bhawalpooor State, 1875, feuille n° 24.(extrait réduit)	179
Fig. 88 :	"L'ancien lit de la rivière Hakra" aux environs de fort Derawar (Derawur). <i>Punjab Revenue Survey Map</i> , Bhawalpooor State, 1876, feuille n° 23.(extrait réduit).	180
Fig. 89 :	"La paléovallée de la Ghaggar-Hakra". Assemblage Images RBV et MSS	181
Fig. 90 :	Niveau V : comportement spectral moyen des classes issues de la classe 1.2.1	184
Fig. 91 :	Niveau V : comportement spectral moyen des classes issues de la classe 2.1.1	184
Fig. 92 :	Niveau V : comportement spectral des classes issues de la classe 2.2.1	184
Fig. 93 :	Niveau V : coordonnées des centres de gravité des classes sur l'axe discriminant	184
Fig. 94 :	Niveau V : comportement spectral des classes issues de la classe 2.1.1	184
Fig. 95 :	Niveau V : comportement spectral des classes issues de la classe 2.2.1	184
Fig. 96 :	Surfaces couvertes par les classes du niveau V	185
Fig. 97 :	Valeurs moyennes de l'indice de végétation (NDVI) et de l'indice de brillance (IBRI) calculées pour chaque classe du niveau V	185
Fig. 98 :	Niveau V: partition des classes du niveau IV: 13 classes A : Amadhpur East - B : Bahawalpur - De : Derawar - Di : Dingarh - M : Marot	187
Fig. 99 :	Secteur ouest (Bhadra-Hisar) - Classification, niveau II : 6 classes	195
Fig. 100 :	Secteur ouest (Bhadra-Hisar) - Classification, niveau III : 12 classes	197
Fig. 101 :	203-292 (ouest) : niveau II : comportement moyen des classes dans les différentes bandes spectrales	199
Fig. 102 :	203-292 (ouest) : Niveau II : coordonnées des centres de gravité des classes sur les deux premiers axes discriminants	199
Fig. 103 :	203-292 (ouest) Niveau II : valeurs moyennes des indices de végétation (NDVI) et de brillance (IBRI)	199

Fig. 104 :	203-292 (ouest) : Surfaces couvertes par les classes du niveau II	199
Fig. 105 :	203-292 (ouest) : Niveau III comportement moyen des classes dans les différentes bandes spectrales	201
Fig. 106 :	203-292 (ouest) Comportement spectral moyen des classes issues de la classe 1	201
Fig. 107 :	203-292 (ouest) Comportement spectral moyen des classes issues de la classe 2	201
Fig. 108 :	203-292 (ouest) Comportement spectral moyen des classes issues de la classe 5.....	201
Fig. 109 :	203-292 (ouest) comportement spectral moyen des classes issues de la classe 6.....	201
Fig. 110 :	203-292 (ouest) niveau III : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 1 sur l'axe discriminant.....	203
Fig. 111 :	203-292 (ouest) niveau III : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 2 sur l'axe discriminant.....	203
Fig. 112 :	203-292 (ouest) niveau III : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 5 sur l'axe discriminant.....	203
Fig. 113 :	203-292 (ouest) niveau III : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 6 sur l'axe discriminant.....	203
Fig. 114 :	203-292 (ouest) niveau III : valeurs moyennes des indices de végétation (NDVI) et de brillance (IBRI) calculées pour chaque classe	203
Fig. 115 :	203-292 (ouest) : surfaces couvertes par les classes du niveau III.....	203
Fig. 116 :	Secteur ouest (Bhadra - Hisar) - classification, niveau III : classes 1.1 et 1.2 (échelle 1 cm=5,5 km).....	215
Fig. 117 :	Secteur ouest (Bhadra - Hisar) - classification, niveau III : classes 2.1 et 2.2	215
Fig. 118 :	Secteur ouest (Bhadra - Hisar) - classification, niveau III : classe 3.0 (échelle 1 cm=5,5 km).....	216
Fig. 119 :	Secteur ouest (Bhadra - Hisar - classification, niveau III : classes 4.0 (échelle 1 cm=5,5 km)	216
Fig. 120 :	Secteur ouest (Bhadra - Hisar) - classification, niveau III : classes issues de la classe 5 (échelle 1 cm=5,5 km).....	217
Fig. 121 :	Secteur ouest (Bhadra - Hisar) - classification, niveau III : classes 6.1 et 6.2 (échelle 1 cm=5,5 km).....	217
Fig. 122 :	Secteur est (Hisar - Bhiwani) - Classification, niveau II : 6 classes.....	221
Fig. 123 :	Secteur est (Hisar - Bhiwani) - Classification, niveau III : 8 classes.....	223
Fig. 124 :	Secteur est (Hisar - Bhiwani) - Classification, niveau IV : 9 classes.....	225
Fig. 125 :	204-292 (est) : niveau II : comportement moyen des classes dans les différentes bandes spectrales	227
Fig. 126 :	204-292 (est) : Niveau II : coordonnées des centres de gravité des classes sur les deux premiers axes discriminants.....	227
Fig. 127 :	204-292 (est) : niveau II : valeurs moyennes de l'indice végétation (NDVI) et de l'indice de brillance (IBRI) calculées pour chaque classe.....	227
Fig. 128 :	204-292 (est) : Surfaces couvertes par les classes du niveau II	227
Fig. 129 :	204-292 (est) : niveau III : comportement moyen des classes dans les différentes bandes spectrales du niveau III	229
Fig. 130 :	204-292 (est) : niveau III : comportement spectral moyen des classes issues de la classe 1.....	229
Fig. 131 :	204-292 (est) : niveau III : comportement spectral moyen des classes issues de la classe 4.....	229
Fig. 132 :	204-292 (est) niveau III : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 1 sur l'axe discriminant.....	229
Fig. 133 :	204-292 (est) niveau III : coordonnées des centres de gravité des classes issues de la classe 4 sur l'axe discriminant.....	230
Fig. 134 :	204-292 (est) niveau III : valeurs moyennes de l'indice de végétation (NDVI) et de l'indice de brillance (IBRI)	229
Fig. 135 :	204-292 (est) : niveau IV : comportement moyen des classes dans les différentes bandes spectrales	230
Fig. 136 :	204-292(est) niveau IV : coordonnées des classes issues de la classe 4.1 sur l'axe discriminant.....	230
Fig. 137 :	Niveau IV - classes issues de la classe 4 : valeurs moyennes de l'indice de végétation (NDVI) et de l'indice de brillance (IBRI).....	230
Fig. 138 :	204-292 (est) : niveau IV : surfaces couvertes par les classes du niveau IV	230
Fig. 139 :	Secteur est (Hisar - Bhiwani) - classes 1. (1 cm =5,5 km)	236

Fig. 140 : Secteur ouest (Hisar- Bhiwani) - classe 2. (1 cm =5,5 km)	236
Fig. 141 : Secteur ouest (Hisar - Bhiwani) - classe 3 (1 cm =5,5 km)	237
Fig. 142 : Secteur ouest (Hisar- Bhiwani) - classe 4 (1 cm =5,5 km)	237
Fig. 143 : Secteur ouest (Hisar- Bhiwani) - classe 5. (1 cm =5,5 km)	237
Fig. 144 : Secteur ouest (Hisar - Bhiwani) - classe 6. (1 cm =5,5 km)	237
Fig. 145 : Les modèles fluviaux (Schumm, 1981).....	241
Fig. 146 : Secteur ouest (203-292) -image de la 3e composante principale réseau de paléochenaux dans la plaine.....	243
Fig. 147 : Secteur est (204-292) image de la 3e composante principale réseau de paléochenaux dans la plaine.....	247
Fig. 148 : Les modèles fluviaux (Schumm, 1981).....	249
Fig. 149 : Distribution (%) par type d'environnement de l'ensemble des pixels-sites à l'ouest (203-292) et à l'est (204-292).....	255
Fig. 150 : Distribution (%) par type d'environnement des pixels-sites protoharappéens (ca. 3000-2500 av. J.-C.)	258
Fig. 151 : Distribution (%) par type d'environnement des pixels-sites harappéens mûrs (ca 2500-1800 av. J.-C.)	258
Fig. 152 : Distribution (%) par type d'environnement des pixels-sites harappéens tardifs (ca. 1800-1500 av. J.-C.).....	258
Fig. 153 : Distribution (%) par type d'environnement des pixels-sites de la période de la céramique grise peinte (PGW) (1500-1000 av. J.-C.)	259
Fig. 154 : Distribution (%) par type d'environnement des pixels-sites de la période de la céramique noire polie du Nord (NBPW) (Ve-IIIe s. av. J.-C.)	258
Fig. 155 : Distribution (%) par type d'environnement des pixels-sites kushans (Ier-IVe s. apr. J.-C.)	259
Fig. 156 : Distribution (%) par type d'environnement des pixels-sites Rang Mahal (IIIe-VIe s. apr. J.-C.)	260
Fig. 157 : Distribution des sites de la période médiévale ancienne (VIIIe-XIIe/XIIIe s. apr. J.-C.).....	260
Fig. 158 : Distribution des sites de la période médiévale récente (XVe-XVIIIe s. apr. J.-C.)	260
Fig. 159 : Distribution des sites protoharappéens (ca. 3000-2500 av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E).....	263
Fig. 160 : Distribution des sites harappéens (ca. 2500-1800 av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E)	265
Fig. 161 : Distribution des sites de la période harappéenne tardive (ca. 1800-1500 av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E).....	267
Fig. 162 : Distribution des sites P. G. W. (ca. 1500-1000 av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E).....	269
Fig. 163 : Distribution des sites N.B.P. (Ve - IIIe s. av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E)	270
Fig. 164 : Distribution des sites kushans. (Ie - IV s. av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E)	273
Fig. 165 : Distribution des sites Rang Mahal (IIIe-VIe s. av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E)	275
Fig. 166 : Distribution des sites médiévaux anciens. (VIIIe - XIIe-XIIIe s. av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani	277
Fig. 167 : Distribution des sites médiévaux récents .(XVe - XVIIIe s. av. J.-C.) entre Bhadra (W) et Bhiwani (E).....	279
Fig. 168 : Distribution des sites protohistoriques (•) par rapport à celle des sites historiques.....	287
Fig. 169 : Distribution des sites historiques (•) par rapport à celle des sites protohistoriques	287
Fig. 170 : Distribution des sites kushans (•) par rapport à celui des sites protohistoriques.....	288
Fig. 171 : Les sites protoharappéens (•) par rapport aux sites protohistoriques.....	288
Fig. 172 : Les sites harappéens mûrs (•) par rapport au peuplement protohistorique.....	289
Fig. 173 : Les sites harappéens tardifs (•) par rapport au peuplement protohistorique	289
Fig. 174 : Les sites kushans (•) par rapport au peuplement historique.....	290
Fig. 175 : Les sites Rang Mahal (•) par rapport au peuplement historique	290
Fig. 176 : Les sites médiévaux anciens (•) par rapport au peuplement historique.....	291
Fig. 177 : Les sites médiévaux récents (•) par rapport au peuplement historique.....	291
Fig. 178 : Secteur ouest (Bhadra-Hisar) - Classification, niveau II : 6 classes	294
Fig. 179 : Secteur ouest (Bhadra-Hisar) - Classification, niveau II : 6 classes	295

Fig. 180 : Secteur ouest (Bhadra-Hisar) - Classification, niveau II : 6 classes	297
Fig. 181 : Secteur ouest (Bhadra-Hisar) - Classification, niveau II : 6 classes	300
Fig. 182 : Secteur ouest (Bhadra-Hisar) - Classification, niveau II : 6 classes	301
Fig. 183 : Secteur est (Hisar Bhiwani) - Classification, niveau 4 : 9 classes.....	307
Fig. 184 : Secteur est (Hisar Bhiwani) - Classification, niveau 4 : 9 classes.....	309
Fig. 185 : Secteur est (Hisar Bhiwani) - Classification, niveau 4 : 9 classes.....	311
Fig. 186 : Secteur est (Hisar Bhiwani) - Classification, niveau 4 : 9 classes.....	313
Fig. 187 : Distribution des sites de la période Hakra Ware d'après les données de M. R. Mughal (1980).....	323
Fig. 188 : Distribution des sites de la période "harappéenne ancienne" (Early Harappan) d'après les données de M. R. Mughal (1980).....	323
Fig. 189 : Distribution des sites de la période harappéenne mûre (Mature Harappan) d'après les données de M. R. Mughal (1980).....	323
Fig. 190 : Distribution des sites datés de la période harappéenne tardive (Late Harappan) d'après les données de M. R. Mughal (1980).....	324
Fig. 191 : Répartition des sites datés de la période de la céramique grise peinte (Painted Grey Ware) d'après les données de M. R. Mughal (1980).....	324
Fig. 192 : Répartition des sites datés de la période historique ancienne et médiévale d'après les données de M. R. Mughal (1980).....	324
Fig. 193 : Localisation des sites harappéens mûrs dans la région de Derawar (image TM quart sud-ouest niveau V)	326
Fig. 194 : Localisation des sites de la période Hakra Ware dans la région de Derawar (image TM quart sud-ouest niveau V).....	329
Fig. 195 : Proximité d'un site protohistorique et d'un chenal (image Spot en mode panchromatique).....	332

Table des photographies

Photo 1 :	A la surface des sites archéologiques : une forte densité de tessons de poterie, de céramique.....	26
Photo 2 :	Aux limites du village actuel (Hajampur, Haryana, Inde), un site archéologique (n°247 - historique) nivelé, facilement identifiable par sa couverture de tessons de poterie, de couleur rouge (7/3/1990).....	26
Photo 3 :	Entouré de champs de blé, le site protohistorique de Siswal (n°11) (Haryana, Inde) au second plan, forme une butte de quelques mètres, au dessus de la plaine. Au loin la bordure continue d'arbres signale la présence d'un canal d'irrigation : le <i>Hisar distributary</i> , abandonné entre 1937 et 1975.	26
Photo 4 :	Au Cholistan (Pendjab, Pakistan), un des canaux terminaux de la Desert Branch, la Derawar branch, abandonné dès sa création en 1932, l'alimentation en eau à partir du Sutlej étant insuffisante (21/2/90).....	82
Photo 5 :	Le Hisar Distributary entre Shapur et Matarsham à l'ouest de Hisar (Haryana, Inde), abandonné entre 1933 et 1975, toujours bordé d'arbres. Son tracé correspond à celui du canal construit par Firuz Shah au XIV ^e siècle dans la dépression de la Chautang (2/1988)	82
Photo 6 :	Les vestiges d'un canal médiéval à l'ouest de Hisar. On distingue au second plan, en clair, les longs bourrelets, vestiges des déblais évacués d'année en année lors des curages et aujourd'hui plus ou moins étalés.....	82
Photo 7 :	Vue aérienne des limites du désert du Cholistan, et de la zone irriguée à partir du Sutlej (11/90).....	153
Photo 8 :	Les limites du désert du Cholistan et de la zone irriguée aux environs de Bahawalpur (11/90).....	153
Photo 9 :	Hétérogénéité de la zone irriguée : champs cultivés, plantations d'arbres fruitiers, villages, canaux.....	153
Photo 10 :	Paysages du Cholistan autour de Fort Dingarh : une pseudo-steppe désertique. A droite, un puits	171
Photo 11 :	Les étendues sableuses faiblement ondulées du Cholistan sont le lieu des activités pastorales.....	171
Photo 12 :	Surfaces planes et sableuses aux limites des formations alluviales, végétation herbacée et buissonnante.....	171
Photo 13 :	Le petit Cholistan. Forte réflectance des surfaces salées.....	173
Photo 14 :	Les "dahars" constituent de très légères dépressions parfaitement planes.....	173
Photo 15 :	Les dépôts argileux de texture fine se craquent en prismes durcis dès qu'ils s'assèchent.....	173
Photo 16 :	Surface parfaitement plane et dure des dépôts argileux. Compacité et sels en excès excluent tout couvert végétal.....	189
Photo 17 et 18 :	En février à la suite d'une grosse pluie. Une mince pellicule d'eau peut stagner ainsi pendant plusieurs jours sur ces surfaces argileuses imperméables.....	189
Photo 19 :	Une route typique D'Haryana, bordée d'acacia et de prosopis.....	205
Photo 20 :	Bordure continue d'acacia le long d'un canal d'irrigation	205
Photo 21 :	<i>Pipal</i> , <i>banyan</i> ou acacia au bord d'un tank en Haryana	205
Photo 22 :	Culture du blé dans la plaine sablo-limoneuse irriguée, aux environs de Hisar en Haryana.....	207
Photo 23 :	Champ cultivé, Texture limono-sableuse des sols dans la plaine de Hisar (Haryana).....	207
Photo 24 :	Ensemble sableux dunaire servant d'aire de pâture naturelle. Végétation herbacée clairsemée. Végétation arborée épineuse (<i>Prosopis</i>).....	209
Photo 25 :	Paysage dunaire aux environs de Gorchi au sud-ouest de Hisar. Les arbres sont coupés pour le bois; les branches fines et le feuillage servent de nourriture pour les animaux	209
Photo 26 :	Culture du gram (pois chiche) sur les dunes en hiver	209
Photo 27 :	Dépression sablo-limoneuse carbonatée aux environs de Sidmukh, entourée par les dunes. Le blé y est cultivé en hiver sans recours à l'irrigation artificielle.....	211
Photo 28 et 29 :	Au sud-ouest de Hisar, les linéaments mis en évidence sur les images de composantes principales correspondent à des dépressions très peu marquées. Des différences de couleur entre	

les bords (clairs) et le fond plus sombre permettent de les repérer (au 3e plan), sur la photo 28.
(au second plan sur la photo 29).....

211

Photo 30 : Nodules carbonatés ou Kankars en surface..... 213

Photo 31 : Forte réflectance des sols carbonatés 213

Photo 32 : Dépression intradunaire cultivée en sec (blé)..... 213

Table des matières

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : LE CADRE ET LA PROBLEMATIQUE	7
1. UN TRAIT ESSENTIEL : L'ARIDITE.....	9
1.1. La médiocrité des précipitations : causes et modalités	12
1.1.1. Les mécanismes climatiques.....	12
1.1.2. Hauteur et régime des précipitations.....	14
1.1.2.1. Les données climatiques.....	14
1.1.2.2. La répartition spatiale des pluies.....	15
1.1.2.3. La variabilité des pluies dans le temps.....	18
1.2. Les termes du déficit hydrique.....	21
1.2.1. Les températures : chaleur torride et fraîcheur.....	21
1.2.2. Les vents.....	22
1.2.3. Humidité relative et évaporation.....	22
1.3. Aridité et irrigation.....	23
2. LES TRACES DE L'OCCUPATION HUMAINE ANCIENNE.....	26
2.1. Les sites archéologiques	26
2.2. Les différentes phases de l'occupation humaine.....	29
2.2.1. Datations : principes, moyens	29
2.2.2. Quelques jalons.....	30
2.2.2.1. La protohistoire	30
2.2.2.2. La période historique ancienne.....	34
2.2.2.3. L'ère médiévale	35
2.3. L'occupation humaine ancienne dans le désert du Cholistan (Pakistan)	36
2.3.1. A propos des prospections archéologiques.....	36
2.3.2. Les données archéologiques de la "vallée de la Hakra"	37
2.4. L'occupation humaine ancienne dans "la vallée de la Chautang"	40
2.5. Les plantes cultivées aux époques anciennes	46
2.6. Les limites des enseignements donnés par l'archéologie.....	51
3. LA QUESTION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	52
4. LA QUESTION DE L'HYDROGRAPHIE.....	57
4.1. Rivières pérennes himalayennes.....	57
4.2. Cours d'eau saisonniers de pléiromé.....	58
4.3. Paléohydrographie et peuplement ancien.....	60
4.3.1. "Le roman de la Saraswati perdue" : une histoire ancienne.....	60
4.3.2. De nouvelles bases, pour d'anciennes théories.....	67
4.3.3. Les données géomorphologiques et sédimentologiques, et la remise en cause des théories antérieures.....	75

5. CULTURE PLUVIALE OU IRRIGUEE ?	77
5.1. Les vestiges archéologiques.....	77
5.2. L'irrigation dans la région de Hisar au XIXe siècle.....	81
5.3. L'irrigation dans l'Etat de Bahawalpur au XIXe siècle.....	85
5.4. L'irrigation durant la protohistoire ?.....	87
5.5. CONCLUSION.....	91
 CHAPITRE II : QUESTIONS, DEMARCHE, METHODES ET TECHNIQUES	93
1. DES QUESTIONS RESTEES SANS REPONSE	95
2. DES CONTRAINTES ET UNE DEMARCHE SPECIFIQUE	96
3. DES METHODES POUR UNE APPROCHE GLOBALE	99
3.1. Des unités homogènes.....	99
3.1.1. Des classifications non dirigées.....	99
3.1.2. Des classifications emboîtées.....	100
3.2. Formes et structures.....	100
3.3. Une première étape : le choix des images.....	101
3.3.1. La date.....	101
3.3.2. La scène.....	101
3.3.3. Le capteur.....	102
4. PROCEDURES ET TECHNIQUES	103
4.1. Sites archéologiques et images satellitaires.....	103
4.1.1. Recalage.....	104
4.1.1.1. Utilisation de la méthode de regression linéaire.....	105
4.1.1.2. recalage géométrique.....	105
4.1.1.3. Contrôle des résultats.....	106
4.1.2. Le codage des données.....	106
4.1.2.1. Les données relatives à la région de Hisar.....	106
4.1.2.2. Les données relatives à la paléovallée de la Hakra.....	107
4.2. Les étapes de l'analyse typologique.....	108
4.2.1. Le choix des objets : procédures d'échantillonnage.....	109
4.2.2. Le choix des variables.....	110
4.2.2.1. Les bandes spectrales originales.....	111
4.2.2.2. Les axes discriminants.....	111
4.2.3. La constitution des classes ou la stratégie d'agrégation.....	112
4.2.4. Combien de classes ?.....	113
4.2.4.1. Un nombre maximal de classes.....	113
4.2.4.2. Un nombre optimal de classes.....	113
4.2.5. Extrapolation.....	114
4.2.6. Interpréter et valider les résultats.....	114
4.2.6.1. La description des classes.....	116
4.2.6.2. La répartition spatiale des classes.....	120
4.2.6.3. Les connaissances exogènes.....	120
4.2.6.4. L'image et le terrain.....	123
4.3. La mise en évidence des linéaments.....	126
4.3.1. La hiérarchisation des contrastes.....	127
4.3.2. L'analyse morphologique.....	128
4.3.2.1. L'élimination du bruit de fond.....	128
4.3.2.2. Extraction des linéaments.....	130
4.3.2.3. Contraintes et limites de ces procédures.....	135

CHAPITRE III : DES UNITES RADIOMETRIQUES AUX PALEOENVIRONNEMENTS	139
1. A L'OUEST : LA PLAINE ALLUVIALE DE LA HAKRA ENTRE FORT ABBAS ET KHANPUR	142
1.1. Niveau II : Agriculture et pastoralisme	147
1.1.1. Une zone irriguée	149
1.1.2. Un "désert"	149
1.1.3. Une limite qui a varié dans le temps	150
1.2 Niveau III : entre rivière et désert	155
1.2.1. Hétérogénéité du domaine irrigué	155
1.2.2. Hétérogénéité de la zone désertique	159
1.3. Niveau IV : la Hakra : un mythe ou une réalité ?	160
1.3.1. La zone irriguée	160
1.3.2. Les dunes	160
1.3.3. Surfaces salées	170
1.3.4. Dépôts limono-sableux	175
1.3.5. A propos de la rivière Hakra	175
1.4. Niveau V : quelques traits d'une évolution récente	185
1.4.1. Sables actifs (211.2) et sables stables (211.1)	185
1.4.2. Sables limoneux et limons sableux	185
1.5. Des éléments pour une reconstitution des paléoenvironnements	186
2. LA PLAINE ALLUVIALE DE LA CHAUTANG ENTRE BHADRA ET BHIWANI	192
2.1. Le secteur ouest : entre Bhadra et Hisar	198
2.1.1. Végétation arborée et sols argileux : la classe 4	200
2.1.2. Une plaine sablo-limoneuse : la classe 3	200
2.1.3. Un ensemble sableux, dunaire : la classe 1	200
2.1.4. Formations alluviales sablo-limoneuses carbonatées : la classe 2	202
2.1.5. Ensemble sableux non dunaire : la classe 5	204
2.1.6. Un ensemble sablo-limoneux composite : la classe 6	218
2.1.7. Conclusion	219
2.2. Secteur est entre Hisar et Bhiwani	219
2.2.1. Classe 5 : végétation verte	220
2.2.2. Classe 2: surfaces argilo-limoneuses ou humides	228
2.2.3. Classe 6 : plaine argilo-limoneuse	238
2.2.4. la classe 4 : sols sablo-limoneux	238
2.2.5. Classe 1	231
2.2.6. Classe 3 : une unité sablo-limoneuse composite	231
2.3. Correspondances entre les deux scènes	231
2.4. Des éléments pour une reconstitution des paléo-environnements	234
2.4.1. La plaine : un écoulement en nappe	235
2.4.2. A propos de la dépression de la Chautang	235
2.4.3. Un réseau de dépressions dans la plaine	240
3. CONCLUSION	250

CHAPITRE IV : OCCUPATION HUMAINE ANCIENNE ET PALEOENVIRONNEMENTS	253
1. L'OCCUPATION HUMAINE ANCIENNE DANS LA PLAINE DE LA CHAUTANG ENTRE BHADRA ET BHIWANI.....	255
1.1. Des sites dans la plaine.....	256
1.1.1. <i>L'occupation harappéenne.....</i>	<i>257</i>
1.1.1.1. Les sites dans la dépression de la Chautang.....	257
1.1.1.2. Sites et chenaux d'écoulement concentré	261
1.1.1.3. Conclusions.....	262
1.1.2. <i>L'occupation post-harappéenne</i>	<i>281</i>
1.1.3. <i>L'occupation historique</i>	<i>284</i>
1.1.3.1. L'occupation kushane	284
1.1.3.2. Les sites Rang Mahal.....	285
1.1.3.3. Les sites médiévaux.....	317
1.2. L'ensemble éolien.....	317
2. L'OCCUPATION HUMAINE ANCIENNE DANS LA PLAINE DE LA HAKRA ENTRE FORT ABBAS ET KHANPUR	318
2.1. Les données.....	318
2.2. La localisation des sites	320
2.3. Conclusion.....	332
 CONCLUSION	 335
 Annexes.....	 341
Bibliographie	345
 Table des tableaux	 357
Table des figures.....	359
Table des photographies	365
Table des matières	367