



Application de la geomatique au suivi de la dynamique environnementale en zones arides

Weicheng Wu

► To cite this version:

Weicheng Wu. Application de la geomatique au suivi de la dynamique environnementale en zones arides. Sciences de l'Homme et Société. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2003. Français. NNT: . tel-00011113

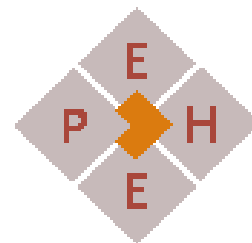
HAL Id: tel-00011113

<https://theses.hal.science/tel-00011113>

Submitted on 25 Nov 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Année : 2003

N° attribué par la bibliothèque

THESE

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS 1-PANTHEON-SORBONNE
ET DE L'ECOLE PRATIQUE DES HAUTES ETUDES**

Discipline : Géographie *Option* : Géomatique

présentée et soutenue publiquement par

Weicheng WU

le 6 décembre 2003

APPLICATION DE LA GEOMATIQUE AU SUIVI DE LA DYNAMIQUE ENVIRONNEMENTALE EN ZONES ARIDES

— Exemple de la région de Nouakchott en Mauritanie,
du Ningxia nord et du Shaanxi nord en Chine du nord-ouest

Directeur de thèse : Mme M.F. COUREL

Membres du jury :

Monsieur Ph. CHAMARD, Maître de Conférence habilité de l'Université de Paris X (Nanterre), France

Monsieur G. D. BENIE, Professeur de l'Université de Sherbrooke, Canada

Président

Madame M. F. COUREL, Directeur de recherche du CNRS, Directeur d'étude de l'EPHE, France

Monsieur E. F. LAMBIN, Professeur de l'Université de Louvain, Belgique

Rapporteur

Monsieur J. P. RUDANT, Professeur de l'Université de Marne-la-Vallée, France

Rapporteur

A mes parents, Songbai et Yingfeng, qui ont souhaité pour leur fils d'être un homme utile au monde.

A mon épouse, Xiaojun, qui partage avec moi le bonheur et les difficultés durant mon doctorat.

A mes enfants, Zhenyu et Yufei, pour le plaisir de les voir grandir sainement.

A mes amis, pour leur aide et soutien aimables.

“L'apprentissage est sans fin.”

— XUN Zi (465-390 B.C.)

AVANT-PROPOS

La société humaine s'est développée de façon très rapide, en particulier depuis la révolution industrielle, au dix-huitième siècle. Parallèlement à cette accélération, son environnement a également évolué du fait des activités humaines telles que le développement industriel, l'utilisation des combustibles fossiles, le déboisement, l'urbanisation et autres utilisations du sol. Ces dernières années, les phénomènes appelés effet de serre, réchauffement global, El Nino et La Nina, ont été de plus en plus souvent évoqués. En résumé, l'homme, par ses activités avait modifié son environnement. En outre, des changements environnementaux, aux conséquences inconnues et potentiellement dévastatrices, sont prévus pour le vingt-et-unième siècle et devraient accélérer ces processus. Bien que de nombreuses théories scientifiques se soient révélées exactes en particulier au cours de la dernière partie du siècle précédent et ont précisé de manière significative notre compréhension de l'environnement, nous avons encore du mal à prévoir avec un degré acceptable de certitude ce qui nous attend dans les prochains siècles, voire décennies. Par conséquent, les défis sont inquiétants. Pourtant, il n'existe aucun moyen pour l'homme de les éviter, il ne peut que les accepter. Ceci signifie que nous devons concentrer nos efforts sur la compréhension du processus d'évolution de l'écosystème et trouver des approches pour commander et réduire les conséquences défavorables provoquées par l'homme lui-même. Les écologistes, les environnementalistes et les géoscientifiques sont les premiers à être confrontés à cette tâche difficile. Cela serait pour moi un privilège et un bonheur que de pouvoir y contribuer et jouer ne serait-ce qu'un petit rôle dans la recherche globale pour l'environnement.

Depuis les années 90 du siècle dernier, 3S (télédétection, systèmes d'information géographiques et systèmes de positionnement globaux) a été une expression "à la mode" dans le domaine des recherches environnementales, elle est depuis peu remplacée par la *géomatique* ou la *géoinformatique*, qu'on emploie pour décrire un système de traitement de l'information géospatiale dont les 3S sont les éléments centraux. Quelle que soit l'expression utilisée, ces techniques représentent actuellement les moyens les plus avancés et les plus pertinents pour étudier l'environnement et l'écosystème. Cette thèse a l'intention de produire des résultats utiles pour comprendre l'environnement et de modéliser l'interaction homme-environnement, en s'appuyant sur l'application de ces techniques.

En fait, mon intérêt pour la scène environnementale a commencé en 1992-1993, alors je participais à une recherche sur l'application des éléments isotopiques stables en géosciences environnementales. Le stage au PNC, Japon, en 1995 et l'étude de DESS en génie de l'environnement à l'Université de Paris XI en 1997-1998 ont intensifié mon intérêt pour ce domaine et me permettent d'identifier mieux l'importance de l'environnement pour l'homme. Mais la première recherche effectuée utilisait un point de vue microscopique comme celui de la géochimie. J'ai donc pensé que l'utilisation d'un outil macroscopique pour étudier notre environnement, serait plus efficace pour aborder les informations macroscopiques de changement de l'environnement. C'est pourquoi je voudrais faire évoluer ma recherche de la géologie (Maîtrise en génie et Master en génie) à la télédétection, ou plutôt, à l'application de géomatique — un domaine que j'avais en partie abordé mais sans grande maîtrise, pour mon doctorat.

Après onze années d'enseignement et de recherche à l'université en Chine, j'ai finalement reçu l'autorisation de participer aux concours nationaux. J'ai alors pu réaliser mon souhait et suis venu en France — pays mystérieux entrevu à travers les romans d'Alexandre Dumas et de Victor Hugo, pour y continuer mes études universitaires en tant que boursier du Gouvernement chinois en 1997.

Mon rêve était d'obtenir un doctorat dans le domaine de l'application de la géomatique. J'ai eu la chance, grâce à Mme Jeannine Le Rhun, de rencontrer Mme Marie-Françoise Courel pendant mes études de DESS à Orsay (Université de Paris XI). J'ai été très heureux que le Professeur Courel accepte d'encadrer et de diriger ma thèse dans le cadre du projet de coopération franco-mauritanienne — CAMPUS du Laboratoire PRODIG. J'ai commencé à réaliser mon rêve en 1998. Au cours de l'avancée des travaux, j'ai rassemblé de plus en plus de connaissances se rapportant aux problèmes écologiques littoraux et urbains à Nouakchott — une des régions hyper arides dans le monde, revu mes connaissances en télédétection — étudiée 11 ans auparavant et assimilé les nouvelles techniques pour le traitement d'image numérique par ER Mapper et le suivi des changements par les SIG (Systèmes d'Informations Géographiques). Je voudrais exprimer ma plus profonde reconnaissance au Professeur Courel pour son encadrement de ma recherche ainsi que pour ses divers soutiens à moi et ma famille.

En tant que chinois, j'aurais été très heureux que mes connaissances et mes recherches puissent être utiles à mon pays. Et ainsi que je le désirais, cette opportunité s'est présentée au début de l'année 2000. Sur la recommandation du Professeur Courel, j'ai rencontré le Professeur Eric F. Lambin à l'Université de Louvain où j'ai entrepris une recherche, sous sa direction, pour le projet de coopération sino-belge sur la Chine du Nord-Ouest. Cette opportunité de travailler avec lui sur ce projet de coopération m'a permis de percevoir les problèmes de la région du Nord-Ouest ainsi que dans l'ensemble de mon pays, problèmes dont je n'avais pas conscience auparavant. Le plus important est que, lors de cette recherche, j'ai pu utiliser des techniques pour modéliser l'interaction homme-environnement en liant la télédétection à des activités humaines. Cette compétence me sera toujours

utile. Par conséquent, je suis chaleureusement reconnaissant au Professeur Lambin pour ce qu'il m'a appris et pour son aide aimable à ma famille lors de mon séjour à Louvain-La-Neuve, Belgique.

Pendant mes cinq années de recherche, j'ai également bénéficié de l'aide efficace de mes collègues et de mes amis. Je voudrais profiter cette occasion pour leur exprimer ma reconnaissance sincère.

Je remercie d'abord mes chaleureux collègues du laboratoire PRODIG, M. André Simonin, et Mme Maorie Seysset qui m'ont non seulement aidé en ce qui concerne la langue française, mais aussi en créant une ambiance de travail agréable. Tout cela a été important pour l'avancement de mes travaux de recherche.

Je voudrais également remercier Mme Michèle Ducouso, Mme Jeannine Le Rhun, Mme Françoise Duraffour, Mme Eliane Letterier, M. Brice Anselme, M. Jean-François Cuenot et certains de mes amis, Mlle Hélène Pébarthe, Mlle Sophie Bahé pour leur aide en langue, maintenance du système informatique et leur divers soutiens.

Naturellement, je n'oublierai pas de remercier mes collègues de Louvain-La-Neuve : Mlle Gabriela Buccini, Mme Carine Petit, M. Fred Stole, M. Frédéric Lupo, M. Helmut Geist et Mme Sabine Henry. Ceux sont eux qui m'ont apporté une première aide sur le PCI dès mon arrivée en Belgique et avec qui j'ai eu des discussions utiles sur la modélisation.

Un remerciement tout particulier est destiné à M. Pierre Beckouche, professeur et directeur du Département de Géographie, et Mme Joëlle Garcia, responsable de la Coordination des Sciences humaines et sociales à l'Université de Paris 1, qui m'ont apporté une aide inoubliable quand j'étais en difficulté.

Ma gratitude concerne également M. G. Béné, professeur et directeur du Département de Géographie, à l'Université de Sherbrooke, Canada, pour sa suggestion concernant les articles sur Nouakchott ; ainsi qu'à M. Philippe Chamard, professeur de l'Université de Paris X (Nanterre) pour son amitié et son soutien.

Il est certain que sans le soutien permanent et la tolérance de ma famille, les recherches de ma thèse auraient difficilement progressé. Je remercie particulièrement mon épouse, Xiaojun et mes parents de leur amour.

On dit que le changement est continu, mais que l'apprentissage est facultatif, cette thèse est donc seulement le résumé de cinq années de recherche. Ce n'est pas le point final mais plutôt le début de ma carrière en sciences environnementales. Comme le proverbe l'explique : l'apprentissage ne connaît pas de fin.



Weicheng Wu

Le 18 juillet, 2003 à Paris

Table des matières

Avant-propos.....	I
Table des matières.....	IV
Chapitre I: INTRODUCTION — ZONES ARIDES ET PROBLEMATIQUES.....	1
I. DISTINCTION DES ZONES ARIDES.....	2
II. PROBLEMATIQUES ET ETAT ACTUEL DE LA RECHERCHE	3
1. DESERTIFICATION.....	5
2. EROSION DU SOL, VENT DE SABLE ET DE POUSSIERE.....	8
3. ETAT ACTUEL DE LA RECHERCHE EN ZONES ARIDES.....	11
4. OBJECTIFS DE CETTE THESE.....	12
III. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE DES SITES ETUDIES.....	13
1. LOCALISATIONS.....	13
2. CONDITIONS CLIMATIQUES.....	16
 Chapitre II: METHODOLOGIE — APPROCHES POUR LA RECHERCHE DES	
 ZONES ARIDES.....	22
I. SUIVI DE L’ENVIRONNEMENT PAR LA TELEDETECTION.....	24
1. PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LA TELEDETECTION.....	25
<i>ORIGINE</i>	<i>25</i>
<i>DISPERSION, ABSORPTION, EFFETS ET FENETRES D’ATMOSPHERE.....</i>	<i>26</i>
<i>REFLECTANCE SPECTRALE</i>	<i>28</i>
<i>BANDES SPECTRALES EN TELEDETECTION</i>	<i>29</i>
<i>DONNEES DIGITALISEES.....</i>	<i>31</i>
2. SUIVI DES CHANGEMENTS	31
<i>CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES.....</i>	<i>31</i>
<i>RECTIFICATION GEOMETRIQUE.....</i>	<i>38</i>
<i>TRANSFORMATION MULTISPECTRALE</i>	<i>38</i>
<i>Indices de végétation</i>	<i>38</i>
<i>Analyse en Composantes Principales (ACP).....</i>	<i>40</i>
<i>Transformation de Chapeau à cône</i>	<i>42</i>
<i>DISTINCTION DES CHANGEMENTS.....</i>	<i>46</i>

	<i>Détection de changement du Delta</i>	46
	<i>Differencing d'image</i>	46
	<i>Ratioing d'image</i>	49
	<i>Analyse du vecteur de changement</i>	49
	<i>Régression d'image</i>	50
	<i>Comparaison de post-classification</i>	51
	<i>Analyse des données multitemporales</i>	51
II.	UTILISATION DU SIG	52
	1. CONCEPTION.....	52
	2. FONCTIONS.....	53
	3. APPLICATION DES SIG A LA RECHERCHE ENVIRONNEMENTALE.....	55
III.	ANALYSE DE L'INTERACTION HOMME-ENVIRONNEMENT	56
	1. INTRODUCTION.....	56
	2. APPROCHES POUR LA MODELISATIONS.....	57
	<i>MODELISATION DE REGRESSION</i>	58
	<i>MODELISATION SPATIALE STATISTIQUE</i>	61
IV.	RESUME	66
 Chapitre III: CAS D'ETUDE 1 — SUIVI DES CHANGEMENTS DE L'ENVIRONNEMENT		
	URBAIN ET LITTORAL A NOUAKCHOTT	70
I.	INTRODUCTION	72
II.	SUIVI DES CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX DE L'URBAIN	74
	1. METHODOLOGIE.....	74
	2. DETECTION DE L'EXTENSION URBAINE.....	75
	3. ANALYSE DE L'EXPANSION URBAINE	79
	4. EVALUATION DU RISQUE D'INONDATION.....	81
	5. EXPOSE SUR L'ENVIRONNEMENT URBAIN.....	84
III.	ANALYSE DE L'EVOLUTION DU LITTORAL	85
	1. METHODOLOGIE	86
	2. RESULTATS.....	87
	3. ANALYSE DE L'EVOLUTION POTENTIELLE DE LA COTE.....	89

<i>VAGUES ET COURANTS LITTORAUX</i>	89
<i>ANALYSE DE L'EROSION A L'AVANT</i>	93
<i>ESPERANCE DE VIE DU PORT</i>	95
4. EVALUATION DU SUIVI DE CHANGEMENT COTIER	97
IV. CONCLUSIONS	98

Chapitre IV: CAS D'ETUDE 2 — SUIVI ET MODELISATION DES CHANGEMENTS

ENVIRONNEMENTAUX AU NINGXIA NORD	100
I. INTRODUCTION	102
II. METHODOLOGIE	104
III. DISCRIMINATION DES CHANGEMENTS	104
1. PROCEDURES.....	105
2. CHANGEMENTS PERCEPTIBLES DANS LES ZOOMS TYPIQUES.....	109
3. CARTOGRAPHIE DES CHANGEMENTS AU NIVEAU DEPARTEMENTAL.....	117
4. RESULTATS.....	118
IV. ANALYSE DES RESSOURCES ACTUELLES DU SOL	122
1. APPROCHES.....	122
2. PROCEDURE ET RESULTATS.....	124
3. EVALUATION DE LA PRECISION ET VALIDATION.....	130
V. EVOLUTION DES DONNEES SOCIO-ECONOMIQUES	131
1. DEVELOPPEMENT DE LA POPULATION ET DE LA MAIN-D'ŒUVRE	131
2. ACCROISSEMENT DES TERRES CULTIVEES	133
3. AUGMENTATION DES PRODUITS AGRICOLS ET INDUSTRIELS.....	134
4. CROISSANCE DU PIB.....	134
5. EVOLUTION METEOROLOGIQUE.....	135
VI. ANALYSE SUR L'INTERACTION HOMME-ENVIRONNEMENT	136
1. ANALYSE DE PANEL	136
2. ANALYSE TRANSVERSALLE	137
VII. DISCUSSION	140
VIII. SYSTEME DE SUIVI DYNAMIQUE	144

IX. CONCLUSIONS.....	145
 Chapitre V: CAS D'ETUDE 3 — EVALUATION DES CHANGEMENTS	
ENVIRONNEMENTAUX AU SHAANXI NORD, CHINE.....	148
I. INTRODUCTION.....	150
II. METHODOLOGIE.....	153
III. IDENTIFICATION DES CHANGEMENTS	154
1. CORRECTION GEOMETRIQUE.....	154
2. CORRECTION ATMOSPHERIQUE.....	155
3. TRANSFORMATION DE CHAPEAU A CONE.....	155
4. DETECTION DES CHANGEMENTS.....	155
5. RESULTATS	157
IV. ENQUETE SUR LES RESSOURCES DU SOL	164
V. ANALYSE DE L'INTERACTION HOMME-ENVIRONNEMENT	166
VI. REFLEXIONS SUR LA DEGRADATION DES SOLS.....	168
1. DEGRADATION DE LA VEGETATION SUR LE PLATEAU DE LOESS.....	169
2. DEGRADATION DE LA VEGETATION AU MU US SANDY LAND.....	172
VII. CONCLUSIONS.....	175
 Chapitre VI: CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	
Bibliographies.....	186
 Annexe I: CORRECTION ATMOSPHERIQUE ET TRANSFORMATION DE LA	
RADIANCE A LA REFLECTANCE	204
 Annexe II: MATRICES DES COEFFICIENTS DE CORRELATION	
Annexe III: LISTE DES PUBLICATIONS DE L'AUTEUR	211
Liste des figures en anglais.....	213
Liste des tableaux en anglais.....	216
 3^{ème} page de couverture : Résumé en anglais	
4^{ème} page de couverture : Résumé en français	



La zone aride, avec une couverture de végétation peu dense et de faibles précipitations, est un écosystème fragile où ont lieu la dégradation de végétation et l'érosion du sol dues aux activités humaines, aux sécheresses, à l'action forte du vent ...

Chapitre I : Introduction

ZONES ARIDES ET PROBLEMATIQUES

Quand les zones arides sont évoquées, les premières images qui nous viennent à l'esprit pourraient être l'immense désert aux grandes dunes de sable sur lesquelles marchent une caravane de chameaux portant des marchandises aucune eau, aucune végétation, seulement une mer de sable..... Il s'agit, en effet, du décor de certains films ou de romans pour décrire le paysage de zone aride. Pourtant, le désert n'est qu'une forme extrême des zones arides, elles sont beaucoup plus complexes en terme de caractères topographiques et biophysiques que ce que l'on imagine de prime abord. Scientifiquement, qu'est ce qu'une zone aride ?

I. DISTINCTION DES ZONES ARIDES

Selon le MAB (programme intergouvernemental sur l'homme et la biosphère) de l'UNESCO (1979), la délimitation des régions arides dans le monde se base principalement sur les indices d'aridité. Le degré d'aridité bioclimatique dépend des quantités relatives d'eau obtenues lors des précipitations et perdues par l'évaporation et la transpiration. L'aridité s'installe lors d'une diminution de précipitations et d'une augmentation de l'évaporation. Par conséquent, les valeurs du rapport P/ETP , où P représente des précipitations annuelles et ETP l'évapotranspiration potentielle annuelle, ont été employées pour classer des régions arides et semi-arides dans le monde. Le FAO/UNESCO (1976) a également adopté cet index pour son étude de risque de désertification, du fait qu'il exprime mieux l'aridité.

Quatre classes ont été délimitées par le MAB (1979) :

Zone hyper-aride : $P/ETP < 0.03$, correspondant au climat de désert : très peu de pluie survenant irrégulièrement et aucune végétation permanente, excepté quelques buissons dans des lits de fleuve. L'agriculture et le pâturage sont généralement impossibles ;

Zone aride : $0.03 < P/ETP < 0.20$, végétation dispersée composée de buissons et de petits arbustes épineux ou sans feuilles. L'utilisation pastorale très légère est possible mais aucune culture sous pluie. Les précipitations annuelles varient entre 80 et 350 mm ;

Zone semi-aride : $0.2 < P/ETP < 0.50$, steppe composée de savanes et de buissons tropicaux où pâturage et culture sous pluie sont possibles. Les précipitations annuelles varient principalement de 500 à 1200mm ; et

Zone sub-humide : $0.5 < P/ETP < 0.75$, comprenant principalement certains types de savanes tropicales, de maquis et de chaparral sous des climats méditerranéens. L'agriculture est une utilisation du sol normale.

En se basant sur cette classification, les régions arides sont principalement distribuées en Afrique du Nord (pays du Sahara et Sahel), proximité du Moyen-Orient et Moyen-Orient (pays arabes), Asie centrale (Kazakhstan, Turkménistan, Ouzbékistan, Chine du Nord-Ouest et Mongolie), Amérique occidentale et l'Australie occidentale. La figure I-1 montre la distribution des zones arides dans le monde.

II. PROBLEMATIQUES ET ETAT ACTUEL DE LA RECHERCHE

Depuis les années 70, la terre aride, en tant qu'un des écosystèmes les plus vulnérables, a considérablement attiré l'attention. La discussion, et même la polémique, sur la désertification du sol et l'étude des influences des variations de climat et des activités humaines en zones arides sont devenus, ces dernières décennies, des sujets brûlants dans le domaine de la recherche de l'environnement écologique.

La particularité commune des environnements arides est l'aridité sérieuse, l'insuffisance en eau, les faibles précipitations, l'érosion du sol par le vent ou l'eau et leur vulnérabilité face à la dégradation. Ces caractéristiques sont présentes dans tous les environnements arides. En raison des différents milieux géographiques, conditions naturelles et activités humaines, ces caractéristiques ont, cependant, des différences dans leurs aspects et leur ampleur d'une région à l'autre. Le problème, fréquemment rencontré dans les différents environnements arides, est une dégradation du sol, qui peut être provoquée par les activités humaines et les changements de climat. Sheridan (1981) a étudié le phénomène de la dégradation du sol comme ayant les symptômes suivants : une baisse de niveau des eaux souterraines, une salinisation du terrain végétal, une réduction d'eaux de surface, une érosion du sol anormalement élevée, et la désolation de la végétation indigène. Parmi ces processus de dégradation, le sujet le plus controversé durant dans les trois dernières décennies est la désertification. Quelques autres phénomènes produisent également des influences sur l'environnement global tels que l'érosion du sol et l'orage de poussière. Une partie est prévue sur ce sujet afin de poser un regard sur ces phénomènes et de mieux comprendre les problèmes de dégradation dans les écosystèmes arides.

1. DESERTIFICATION

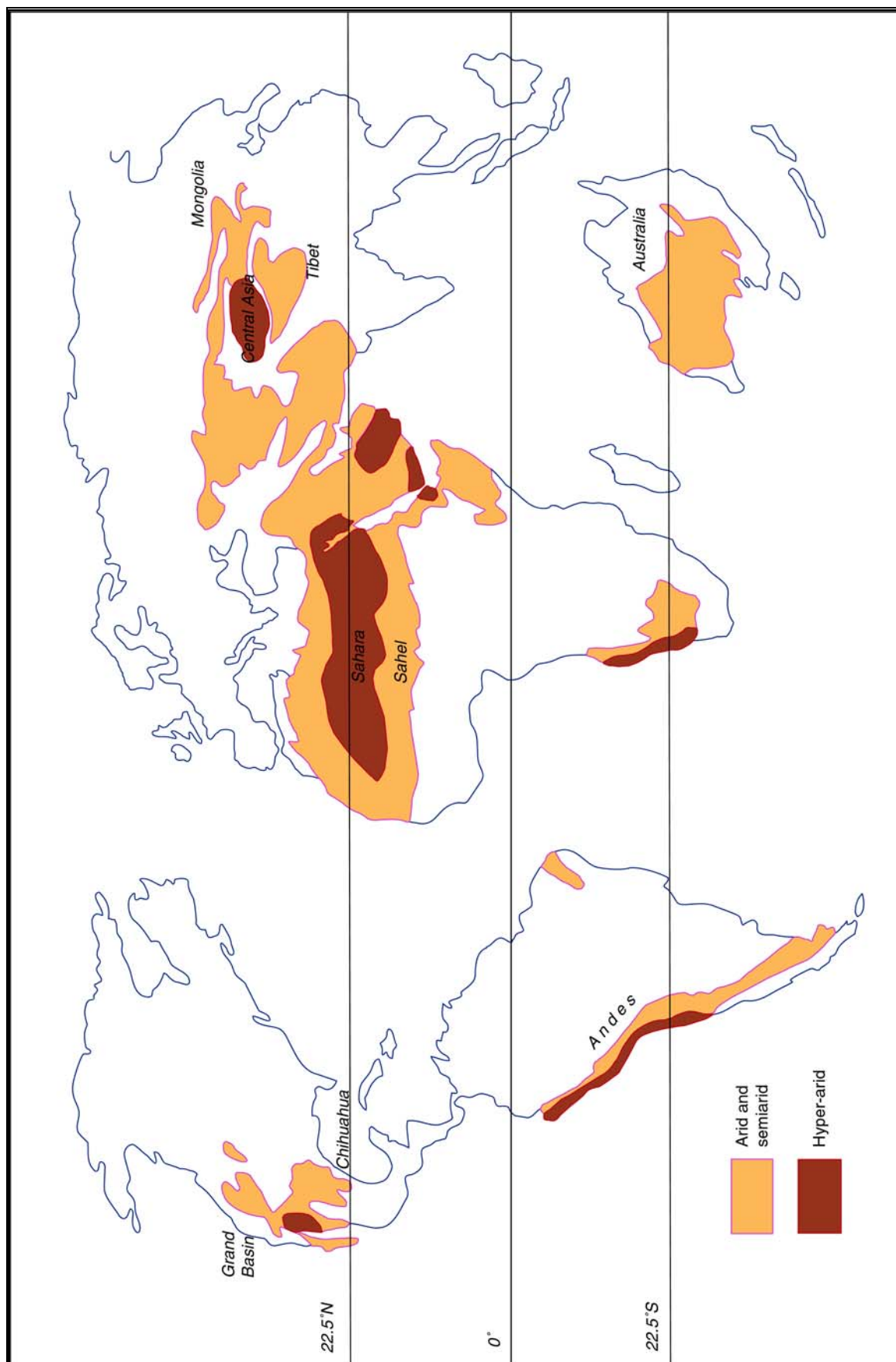


Figure I-1 : Distribution des zones arides

Source: Demangeot et Bernus, 2001

Le terme *désertification* a été inventé par un scientifique et explorateur français, L. Lavauden en 1927 (Smith *et al.*, 1999), et popularisé par un botaniste français, A. Aubréville en 1949. Cette expression a représenté un processus de dégradation du sol dû à l'homme, processus qui a transformé la forêt tropicale en savane, et la savane en désert (Aubréville, 1949 ; Glantz *et al.*, 1983). Cependant, après les sécheresses saharo-sahéliennes en 1968-1973, le désert a semblé connaître une extension vers le sud, ce qui a conduit aux résultats de Lamprey prouvant qu'il y avait une évidente avancée du Sahara vers le sud à un taux de 5-6km par an (Lamprey, 1975). Cette conclusion est issue d'une comparaison entre la position du bord du désert au Soudan occidental, selon la carte de végétation établie par Harrison et Jackson en 1958, et le résultat de l'aperçu aérien conduit par Lamprey lui même en 1975 (Warren *et al.*, 1988 ; Hellden, 1988). Son rapport sur l'empiétement du désert à la conférence d'UNEP en 1975 a suscité une large attention et lancé une forte polémique à l'échelle mondiale. En 1977, l'UNCOD (Conférence des Nations Unies sur la Désertification) a défini la désertification lors de la réunion de Nairobi, Kenya, de cette façon :

“La désertification est la diminution ou la destruction du potentiel biologique du sol, et peut mener finalement à un état de désert. ”

Pendant les années suivantes, de nombreuses agences, organismes, et scientifiques indépendants ont effectué des recherches sur ce sujet en mettant en œuvre la télédétection, les données météorologiques et le relevé de terrain, par exemple, Glantz *et al.* (1983) (National Center for Atmospheric Research, USA ; Dregne (1983), Dregne *et al.*(1992) (Texas Tech University, E.U.) ; Tucker *et al.*(1986, 1991) (NASA Goddard Space Flight Center, E.U.) ; Olsson (1983, 1985) et Hellden (1984, 1988, 1991) (Lund University, Suède) ; Nelson (1988) (Banque de Monde) ; Warren et Agnew (1988) (University College of London, Royaume Uni) ; et Mainguet (1991, 1994) (Université de Reims, France), etc. Une polémique mondiale s'est installée concernant la réalité de la désertification, les causes de sa formation, sa réversibilité ou son irréversibilité (variations de climat et activités humaines). Les résultats de Lamprey ont été étudiés et critiqués.

En 1988, Nelson a indiqué, en commentant des rapports de recherches de l'ONU, qu'il y avait extrêmement peu de preuves scientifiques basées sur des travaux de terrain ou sur des techniques de télédétection donnant des descriptions quant à l'ampleur de la désertification. Il a également rapporté qu'il y avait un rétablissement étonnant de la végétation dans des secteurs considérés comme irréversiblement dégradés en Ethiopie, après des précipitations faisant suite aux sécheresses successives des années 80. Le caractère irréversible de la désertification a donc été remis en question.

Après des analyses par la télédétection et des données météorologiques, Hellden (1984 et 1988) a indiqué qu'il ne semblait y avoir aucune preuve allant dans le sens de la conclusion de Lamprey

affirmant que le désert du Sahara aurait avancé de 90-100km au Kordofan du Nord (Soudan) lors de la période 1958-1975. On ne pourrait pas observer l'empiétement complexe de vastes dunes tracé par Lamprey (1975). Son collègue Olsson (1985) a également trouvé de nombreuses indications montrant que la sécheresse avait affecté la couverture de végétation, mais qui il y avait eu peu de dommages à plus long terme quant aux ressources.

Quelques années plus tard, Tucker *et al.* (1991) et Hellden (1991) ont, en outre, rapporté que le va-et-vient des changements de la couverture végétale sur la bordure sud du désert de Sahara, ou son expansion-contraction, est un phénomène normal lié à la variabilité des précipitations.

Jusqu'à maintenant, l'invasion progressive du désert ou l'empiétement du désert ou la notion de désert en marche, est donc considéré comme un simple mythe (Hellden, 1988, 1991 ; Forse, 1989 ; et Smith *et al.*, 1999). La discussion sur la désertification a pris fin.

Néanmoins, ceci ne signifie pas que la désertification — une transformation de la condition de désert, n'existe pas. La question consisterait plutôt à savoir comment différencier la désertification — un type de dégradation du sol — de l'empiétement de désert. La désertification a été définie de nombreuses manières par des chercheurs de différentes disciplines, aussi bien qu'à travers beaucoup de perspectives nationales et institutionnelles, chacun mettant en son approche différente du phénomène (Glantz *et al.*, 1983). En parallèle à la définition d'UNCOD (1977), en voici quelques exemples :

La désertification est un processus de dégradation continue du sol en zones arides, semi-arides et sous-humides, provoqué, au moins en partie, par l'homme. Elle réduit la capacité à se régénérer et le potentiel productif. Le phénomène n'est que faiblement réversif après la disparition de la cause et ne peut être facilement annulé sans investissement substantiel (Nelson, 1988).

La désertification est le processus de la dégradation du sol causé par l'homme dont la gravité peut varier de très léger à grave, mettant en cause l'érosion, la salinisation, l'accumulation chimique toxique et la dégradation de la végétation, indépendamment du climat (Dregne *et al.*, 1992).

.....

Cette pléthore de définitions mène à un dysfonctionnement de la communication entre chercheurs, entre décideurs du monde politique, et, pire encore, entre chercheurs et décideurs du monde politique (Glantz *et al.*, 1983). C'est dans ce contexte que l'UNEP a tenu une autre conférence à Rio Janeiro en juin 1992 et a défini la désertification ainsi :

“ La désertification est une dégradation du sol en zones arides, semi-arides et sub-humides résultant principalement d'un impact humain défavorable ”.

Cette définition met l'accent sur les activités humaines en séparant désertification et fluctuations climatiques telles que les sécheresses. Elle est proche du point de vue de Nelson mettant en avant

comme cause principale de la désertification non plus la diffusion des dunes de sable, mais la diffusion de la population (Nelson, 1988). Cependant, il est impossible de séparer le changement environnemental dû au climat à court terme de la dégradation du sol induite par des activités humaines ou d'attribuer la responsabilité entière de cette dégradation du sol aux activités humaines et, de ce fait, nous ne pouvons distinguer la responsabilité de l'homme de celle des changements de climat à court terme (Mainguet *et al.*, 1991, 1994). Selon Warren *et al.* (1988), la sécheresse peut précipiter la dégradation du sol en réduisant des approvisionnements en eau d'un système déjà déséquilibré par une surexploitation de l'eau. En revanche, la dégradation, peut contribuer à la sécheresse par des mécanismes de rétroaction impliquant l'albédo extérieur, l'humidité du sol et la poussière. William (2001) a ensuite suggéré que les activités humaines ne sont pas seules en cause et que l'ensemble des processus que sont la variabilité climatique de court terme, la dessiccation à long terme, les inondations et les sécheresses graves et occasionnelles, jouent tous un rôle important. Pour cette raison, pour mesurer les causes et les conséquences de la désertification, il est essentiel d'indiquer quels processus s'appliquent à quel secteur et pendant quelle durée.

Par conséquent, en réponse à la définition originale donnée par Aubréville en 1949, il est plus intéressant de définir la désertification comme *une sorte de dégradation du sol provoquée par des variations climatiques et des activités humaines*. En fait, Warren *et al.* (1988) précisait que la désertification n'est rien de plus qu'une forme extrême de dégradation du sol, se produisant quand la couverture de végétation tombe au-dessous d'environ 35%.

Historiquement, la dégradation du sol n'est pas un phénomène nouveau, elle peut même remonter à plusieurs siècles, voire à plusieurs millénaires. La formation du désert de Negev et l'extinction de la civilisation Maya en sont d'excellents exemples.

Une étude interdisciplinaire a découvert que des systèmes agricoles inadéquats étaient apparemment responsables de la formation du désert de Negev (Olson, 1981). On a signalé que le Negev aurait eu un climat humide un siècle avant JC et jusqu'au III^{ème} siècle. En raison de l'abandon des unités agricoles étroites et terrassées et de l'adoption de systèmes plus grands de captation, l'érosion du sol, l'envasement et la destruction se sont produits. L'environnement humide a été détruit et il est devenu plus sec depuis le V^{ème} siècle (Olson, 1981 ; Smith *et al.*, 1999). Naturellement, les conquêtes multiples et l'occupation par les différentes tribus qui ont mis en œuvre différents modes d'exploitation des ressources furent les causes premières de cette dégradation du sol.

Le deuxième exemple est la destruction de la civilisation Maya, en Amérique Centrale, due à une mauvaise utilisation de terre. Selon Olson (1981), l'état du sol suggère que les Mayas auraient pratiqué l'agriculture dans la Vallée de Naco au Honduras il y a plus de 1000 ans. Avec le temps, la population augmentant dans les collines autour de l'emplacement de la vallée, les forêts des montagnes furent déboisées pour devenir des terres arables. Par la suite, la montagne a été dégradée et son

rendement a diminué. La vallée a été inondée en raison de l'érosion excessive du sol dans la montagne, la population a diminué et la civilisation a fini par s'effondrer. A Tical au Guatemala, une exploitation agricole similaire, due à l'expansion de la population, a dégradé la montagne couverte de forêts fertiles jusqu'à l'érosion et l'épuisement du sol, conduisant ainsi à une fin tragique. Ces sols n'ont pas pu se remettre de l'occupation Maya même après avoir été livrés à la forêt tropicale pendant un millénaire entier.

D'autres exemples se sont produits en Chine. Par exemple, le plateau d'Ordo (Mu Us), appartenant administrativement à la Mongolie intérieure, a été couvert de forêt dense et de prairie où l'on a toujours trouvé quelques peuples nomades. En 1697, l'empereur Kangxi dans la dynastie Qing, a encouragé des paysans de l'intérieur du pays à émigrer dans cette région. Un déboisement étendu s'est produit pour construire les maisons des gouverneurs et les temples sur le plateau. La forêt primaire a été dévastée et la prairie s'est dénudée. Dans la période du "Grand bond en avant", à la fin des années 1950, un important déboisement s'est produit dans l'ensemble du pays en réponse à une volonté politique visant à mettre l'accent sur le développement de l'acier. En Chine du Sud, humide, la couverture de la forêt a eu une capacité à se reconstruire assez importante. Dans le Nord, en revanche, la région du Nord-Ouest, du fait de son aridité, n'a pu que faiblement se régénérer. Le climat est ainsi devenu localement de plus en plus aride (Chen *et al.*, 2002).

En résumé, la dégradation et la désertification du sol sont des problèmes historiques. Si le changement de climat peut avoir partiellement mené à de telles modifications environnementales, les activités humaines sont, cependant, les facteurs principaux de ces dégradations. Il n'existe pas à proprement parler d'avancée des déserts, mais plutôt des "éruptions sporadiques" (Thomas *et al.*, 1994). Si les couvertures végétatives continuent à diminuer jusqu'à exposer le sol à l'érosion, ces éruptions sporadiques continueront à augmenter jusqu'à conduire finalement à la fusion de différents secteurs, pour former de plus grands secteurs sérieusement dégradés (Smith *et al.*, 1999). Par conséquent, nous devons être prudents au sujet de la désertification. En faisant face à ce problème, nous devrions faire attention à ne pas jeter le bébé avec de l'eau du bain, et ne pas tenter de réinventer la roue (Thomas *et al.*, 1994).

2. EROSION DU SOL ET VENT DE POUSSIERE

L'érosion du sol par le vent ou l'eau sont des processus de dégradation communs en environnement aride. Les moussons, au printemps et en hiver sont déterminantes pour chasser le sol superficiel du terrain. Et les précipitations, principalement concentrées en été et en automne, sont, bien que peu importantes, un élément critique pour éroder et transporter le sol (Chamard *et al.*, 1980, 1988

et 1995 ; Xu, 1999 ; Chen *et al.*, 2002). Ainsi l'érosion modifie la qualité du sol et mène à la désertification. L'érosion naturelle est difficile à éviter, mais l'érosion induite par l'homme pourrait être diminuée et contrôlée en changeant la politique et les pratiques en matière d'utilisation du sol.

L'orage de sable et de poussière est, en fait, un vent transportant de la poussière arénacée (figure I-2 et I-3). Ce phénomène a été de plus en plus étudié, ces dernières années, du fait de la survenue de tels orages en Chine, en particulier, dans la région de Beijing. La poussière est passée au-dessus de l'Océan Pacifique et est arrivée dans le ciel de Washington aux Etats-Unis en 1998 et 2002 (Smith *et al.*, 1999 ; NASA, 2003). Cela devrait, sans aucun doute, nous alerter et nous conduire à évaluer l'importance du contrôle de la dégradation du sol en zone aride, dans le monde.

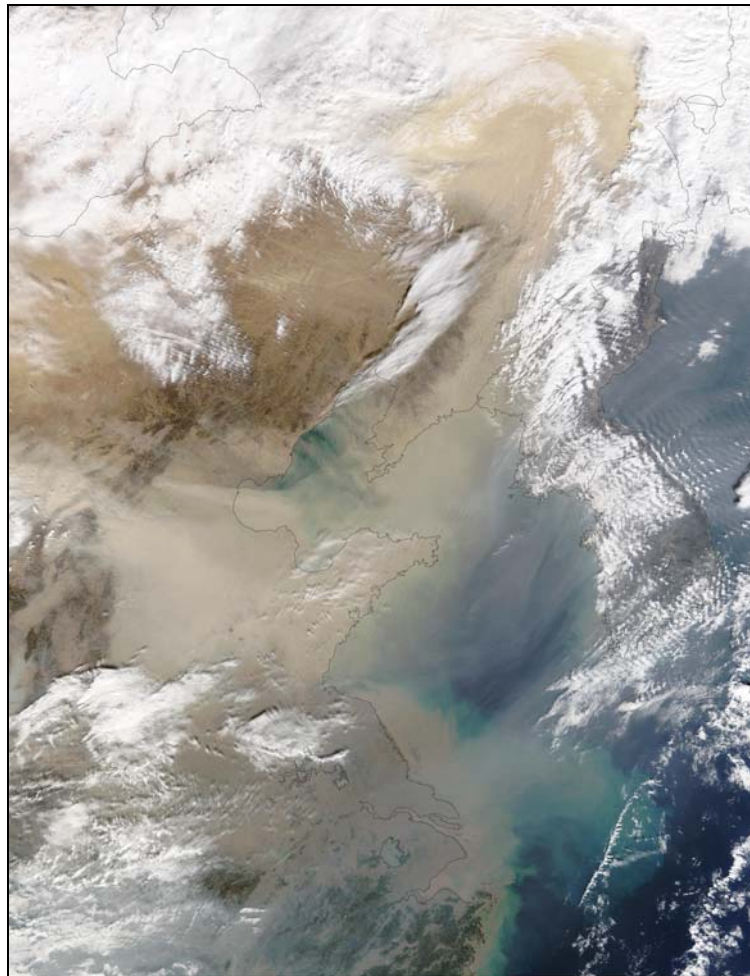


Figure I-2 : Orage de poussière en Chine de l'Est

Note: Le 11 novembre, 2002, le Capteur de MODIS a observé ce grand orage de poussière soufflant au-dessus de la Chine du Nord-Est vers la péninsule coréenne. La poussière semble provenir du désert de Gobi, de la Chine centrale du Nord et de la Mongolie. Source: NASA/Natural Hazard (<http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards>)

L'orage de poussière est une forme d'expression de l'érosion du sol par le vent. Il provoque la perte de sol en zone aride et a également un fort retentissement sur l'environnement humain. En outre, Steiz *et al.* (2001) ont précisé que la poussière apportée par le vent pourrait obstruer certains nuages de

pluie, suspendant les précipitations sur des centaines de kilomètres de distance. Les sécheresses sont aggravées par la poussière et ceci amplifierait donc réellement le processus de création du désert. Si cela se vérifie, améliorer l'environnement aride et en contrôler davantage la dégradation serait une tâche urgente.

La poussière arénacée provient principalement de déserts et de zones arides clairement identifiées, tel que le Sahara en Afrique, le Taklamakan en Chine, le Gobi en Mongolie et d'autres zones arides en Asie centrale et occidentale. La poussière est débarquée et se dépose quand le vent se ralentit. Ceci a causé la formation du Plateau de Löss en Chine. Guo *et al.* (2002) ont rapporté que l'origine du plateau de Löss en Chine serait des orages de poussière remontant à 22 millions d'années. Cela signifie que la désertification en Asie centrale était déjà présente à cette époque. Le löss, fertile et propice à l'agriculture, continue toujours à se déposer aujourd'hui puisque que les orages de poussière sont des phénomènes communs. Ainsi qu'on peut le voir sur la figure I-3, si l'Océan Atlantique était un continent, un autre plateau de Löss y aurait été créé et attribué à la poussière du Sahara. La formation du plateau de löss est probablement le seul aspect positif de l'aridité et des orages de poussière.

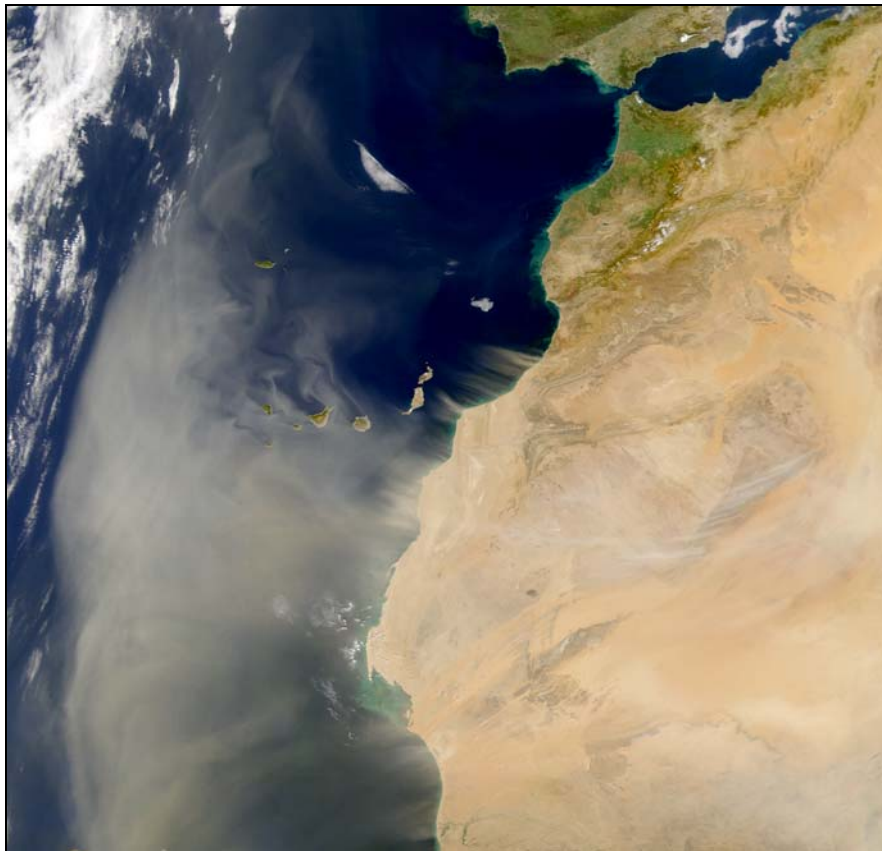


Figure I-3 : Orage de poussière au-dessus de l'Océan atlantique, en provenance du Sahara, 26 février 2000

Source de l'image : NASA/SeaWiFS Dust Storm (<http://www.gsfc.nasa.gov/topstory/20010824redtides.html>)

3. ETAT ACTUEL DE LA RECHERCHE EN ZONES ARIDES

Les recherches concernant les zones arides sont multidimensionnelles et multicouches : de l'identification biophysique de la désertification à l'analyse de sa réalité, de l'influence du climat à la compréhension du rôle des activités sociales et politiques humaines dans la dégradation du sol. Plus concrètement, des recherches réalisées par Olsson (1983), Glanz *et al.* (1983), Hellden (1984, 1988, 1991), Nelson (1988), Warren *et al.* (1988), Tucker *et al.* (1991), Thomas *et al.* (1994), etc., ont réduit à néant le mythe de l'empiétement du désert en démontrant la réalité de la désertification et en attirant l'attention sur les problèmes des zones arides. Le suivi de la désertification et des changements biophysiques, incluant l'albédo de surface au Sahara et Sahel, par les techniques de télédétection (Hellden, 1984, 1988 ; Courel *et al.*, 1984 and Courel, 1985 ; Tucker *et al.*, 1991, 1997) a établi des prototypes permettant de mesurer l'évolution des zones arides. En dehors des Nations Unies et de la Banque mondiale, plusieurs organismes internationaux (non-gouvernementaux) tels qu'IGBP (le programme international de Géosphère-Biosphère) et IHDP (le programme international de la dimension humaine) ont été instaurés par le Conseil international pour la Science (ICSU) en 1986 et 1990, pour étudier les changements environnementaux globaux et le développement durable. LUCC (changement d'utilisation et d'occupation du sol) en tant que projet international central d'IGBP et d'IHDP, est entré en vigueur au début des années 90. Les objectifs du LUCC sont de constituer un réseau en surveillant et en modélisant les changements locaux, régionaux et même globaux d'utilisation et d'occupation du sol, afin de comprendre leurs forces d'entraînement et d'analyser l'interaction homme-environnement (Turner *et al.*, 1995 ; Lambin *et al.*, 1999). Ces programmes et ces projets ont diligenté un certain nombre de recherches multidimensionnelles sur les environnements arides et tenté d'évaluer leur développement durable, en particulier, pour mesurer les impacts des activités humaines sur de tels écosystèmes. Constitués à l'origine pour résoudre le problème du changement potentiel de climat global, l'Organisation météorologique du monde (WMO) et le Programme pour l'Environnement des Nations Unies (UNEP) ont établi, depuis 1988, un panel intergouvernemental sur le changement de climat (IPCC). Le rôle d'IPCC est d'évaluer la pertinence des informations scientifique, technique et socio-économique pour la compréhension du risque de changement de climat causé par l'homme. Certaines recherches modélisant les rapports entre les changements de SST (température de surface de mer) des océans Pacifique et Atlantique et les variations des précipitations au Sahel (Otto-Bliesner-Bliesner, 1999), et entre la végétation-atmosphère et le changement de climat (Ganopolski *et al.*, 1998), etc., ont été effectuées récemment. Leurs résultats ont démontré, à différents niveaux, l'interaction homme-environnement et ont fourni des informations concernant les facteurs potentiels régulant l'écosystème aride. Le rapport de Steiz *et al.*

(2001) démontre le cercle vicieux qui lie utilisation irrationnelle, dégradation, érosion du sol, orage de poussière et sécheresses en Afrique du Nord-Ouest.

Ceci constitue l'état actuel des recherches sur les zones arides.

4. OBJECTIFS DE CETTE THESE

Ainsi que nous l'avons déjà mentionné, les problèmes dans les régions arides et semi-arides sont *à priori* inhérents à l'aridité sérieuse et à son impact sur la productivité végétale. L'être humain possède peu de qualités lui permettant de lutter contre un tel inconvénient naturel. Au contraire, ses activités quant à l'utilisation du sol, le déboisement et l'exploitation des ressources naturelles ont plus ou moins abouti à une aggravation de la situation. Que devrions-nous faire au sujet de la zone aride ? Comme Olson le dit (1981), le passé est une clef du futur. Pour prévoir la situation future de l'environnement, il est nécessaire de comprendre d'abord l'évolution passée. La surveillance ainsi qu'elle est pratiquée par Hellden (1984, 1988) et Tucker *et al.* (1986, 1991) est utile pour distinguer le changement récent dans les caractéristiques biophysiques de surface. D'ailleurs, comme Turner *et al.* (1994) et Lambin *et al.* (1999) le suggèrent, modéliser le processus de changement d'occupation du sol — principale contribution de l'activité humaine à l'environnement et comprendre les moteurs de tels changements, sont les impératifs des recherches de changement de l'environnement global. Ainsi ces deux procédures sont essentielles pour aborder le mécanisme de l'évolution de l'écosystème aride.

De nombreuses études et recherches sur la zone aride, centrées sur le Sahara et le Sahel, ont été accomplies, durant le siècle dernier, par des organismes ou des chercheurs internationaux. L'Asie centrale et la Chine ont été beaucoup moins concernées, bien que quelques auteurs aient consacré leurs travaux à ces régions (Zhu *et al.*, 1993 et 1995 ; Leng *et al.*, 1997 ; Yang, 1997; Glantz *et al.*, 2002). Cette thèse s'intéresse donc à quelques sites rarement étudiés pour le suivi des changements environnementaux, l'analyse et la modélisation des interactions homme-environnement : la bordure occidentale du désert du Sahara (la région de Nouakchott en Mauritanie) et les secteurs critiques de la Chine du Nord-Ouest (Ningxia Nord et Shaanxi Nord).

Les objectifs de cette thèse sont les suivants :

- Construire un système de suivi dynamique des changements environnementaux et modéliser leurs processus.
- Vérifier s'il y a une importante augmentation du désert dans les sites pilotes en Chine, ainsi que cela est rapporté dans les médias, et identifier la dégradation du sol ainsi que ses causes, au cours des dernières décennies.
- Comprendre l'impact de l'activité humaine sur l'environnement et la réaction de l'environnement à l'homme.

III. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE DES SITES ETUDIES

1. LOCALISATIONS

LA REGION DE NOUAKCHOTT

La région de Nouakchott est située dans la marge occidentale du désert du Sahara en Mauritanie, Afrique, s'étendant de 17° à 19°N pour la latitude et de 15° à 17° W pour la longitude (figure I-4). Du point de vue de la géomorphologie, elle est composée d'une zone littorale à l'ouest, d'une sebkha (plaine saline) au centre et des dunes de sable du désert à l'est. Nouakchott, la capitale du pays, est construite sur la sebkha et les queues de dunes de sable. Bien que récente, c'est maintenant la plus grande ville du Sahara.

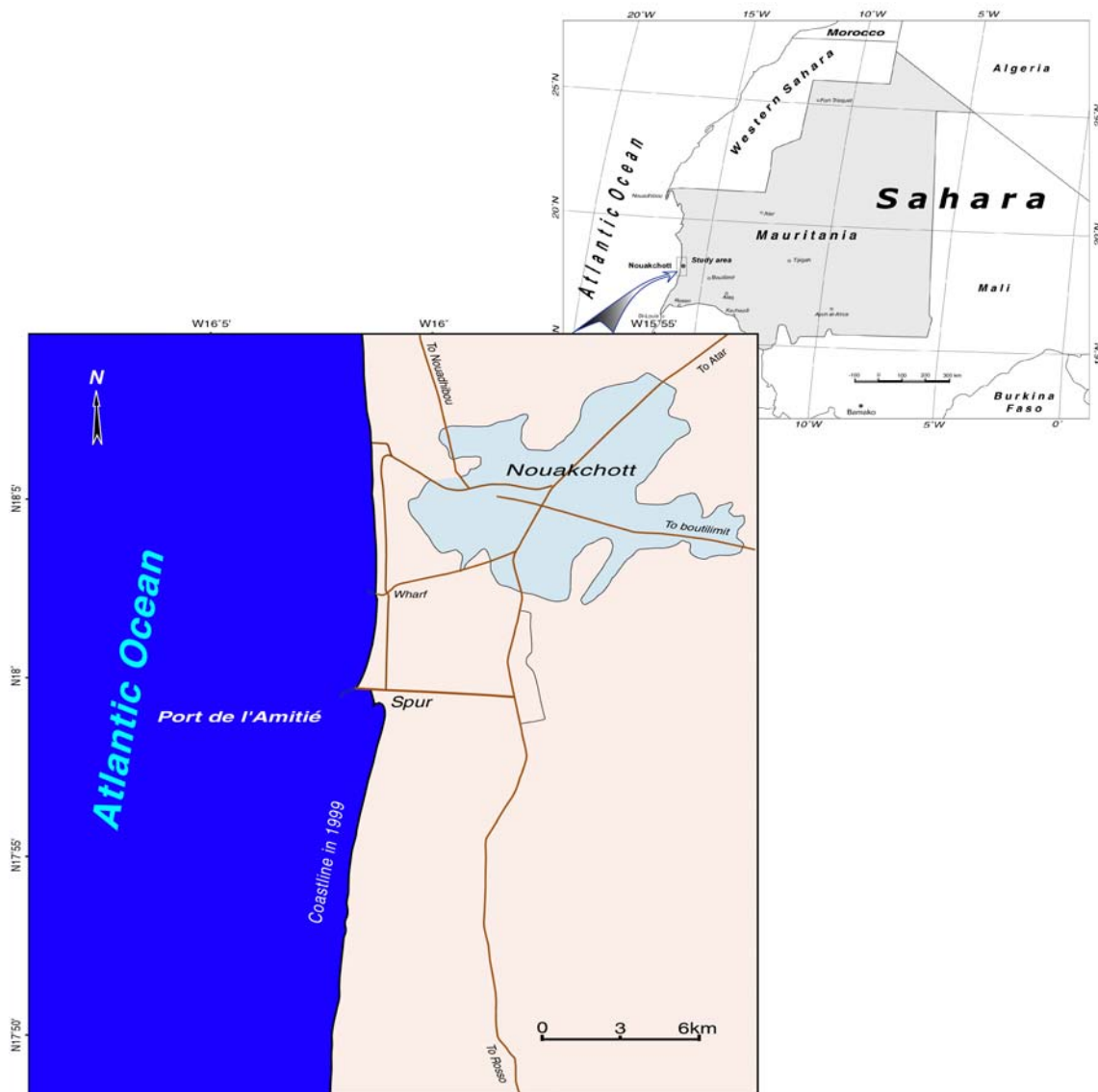


Figure I-4 : Localisation de la région de Nouakchott

Situés sur la côte orientale de l'Océan Atlantique, les environnements urbains et littoraux de Nouakchott ont sensiblement changé depuis les années 80. Le climat est *a priori* un handicap, mais la raison principale de ces changements est l'activité humaine : une urbanisation rapide, l'exploitation des ressources naturelles et une gestion côtière mal conçue qui ont mené à la dégradation environnementale. C'est la raison pour laquelle cette thèse a choisi ce secteur comme terrain d'étude pour la surveillance du changement.

NINGXIA NORD

Le Ningxia Nord est situé dans la partie nord de la province de Ningxia en Chine du Nord-Ouest et est frontalier de la Mongolie intérieure à l'est, au nord et à l'ouest (figure I-5). D'un point de vue géomorphologique, cette région est entourée par le désert d'Ulanbohe au nord, le désert de Tengger à l'ouest et la terre arénacée de Mu Us, à l'est. Ce site pilote d'étude ressemble à une oasis dans un "océan désertique". Le Fleuve Jaune berceau de la civilisation chinoise, est situé à l'est de cette région et coule vers le nord. Les montagnes de Helan situées à l'ouest constituent une barrière naturelle qui protège la plaine de l'attaque des vents du nord-ouest. Comparé à d'autres secteurs arides en Chine du Nord-Ouest, les ressources minérales y sont abondantes, principalement les réserves de charbon de bonne qualité et les mines de phosphore des montagnes de Helan. De plus, la plaine fertile nommée plaine de Yinchuan, a bénéficié de la présence du Fleuve Jaune, elle est connue pour sa production agricole, en particulier rizicole. C'est la raison pour laquelle la région de Yinchuan s'appelle "Jiangnan du plateau" (Jiangnan est une région en Chine du sud bien connue pour son abondante production agricole telle que du riz, les poissons, etc.).

Cependant, l'exploitation des ressources du sol, et en particulier, l'utilisation du sol en agriculture et l'extraction de charbon mal organisées, ont provoqué la pollution et la dégradation du sol ; la sur-irrigation en plaine a conduit à une sur-utilisation du Fleuve Jaune. Ces questions constituent des problèmes écologiques causés par l'homme et méritent une étude précise des interaction homme-environnement.

SHAANXI NORD

Le Shaanxi Nord, site frontalier entre le Shaanxi et la Mongolie intérieure en Chine du Nord-Ouest, est une zone transitoire, du point de vue de la géomorphologie, entre la terre arénacée de Mu Us à l'ouest et le plateau de Löss à l'est (figure I-5). Le Fleuve Jaune découpe le plateau de Löss du nord au sud, à l'est du site. Le löss, produit par la sédimentation et transporté par le vent, est fertile et propice au développement agricole s'il y a suffisamment de précipitations (Guo *et al.*, 2002).

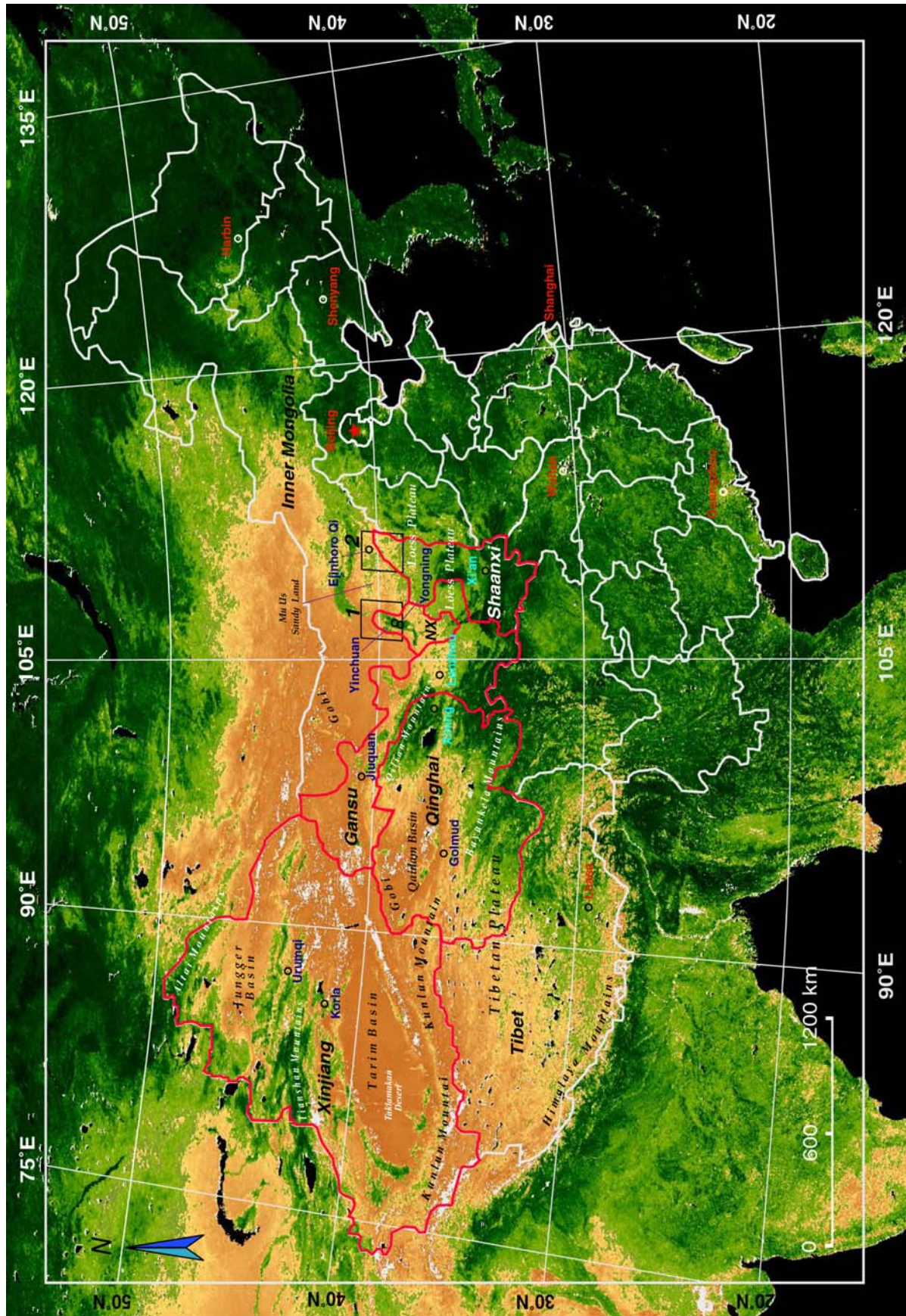


Figure I-5 : Localisation des sites d'étude et les principales stations météorologiques en Chine du Nord-Ouest
1—Ningxia Nord, et 2 — Shaanxi Nord.

Traditionnellement, la Chine du Nord-Ouest inclut cinq provinces appelées respectivement : Xinjiang, Gansu, Qinghai, Ningxia (NX) et Shaanxi (en frontière rouge). Le fond est une image NDVI de SeaWiFS datée d'août 2001 (Source : NASA: <http://www.gsfc.nasa.gov>)

Un grand nombre de réserves de charbon ont été prospectées sous la prairie arénacée et de loess, en particulier, dans les départements (*county*) de Shenmu, de Fugu et d'Ejinhoro. On signale qu'une exploitation à grande échelle a été menée depuis les années 80 et que la dégradation du sol s'est installée dans cet écosystème fragile (Chen *et al.*, 2002).

Zhu *et al.* (1993 et 1995), Chen *et al.*, (1997), Leng (1997) ont étudié le phénomène de la dégradation du sol en Chine du Nord-Ouest et ont précisé qu'une importante superficie de terre a été transformée en désert ou est en cours de désertification. D'ailleurs, une partie de la Grande Muraille, de ce secteur, a été ensablée. Les médias ont ainsi rapporté, dans les années 90, que la terre arénacée de Mu Us avait avancé vers le sud. Un tel mouvement de désert existe-t-il réellement ? Si cela est exact, quelles en sont les raisons ? Il semble donc tout à fait judicieux de choisir une telle zone à la géomorphologie transitoire et au climat aride pour réaliser le suivi de changement et la modélisation de l'interaction homme-environnement.

2. CONDITIONS CLIMATIQUES

Le climat joue un rôle essentiel dans l'écosystème aride. Les précipitations suffisantes sont un préalable à la survie de la couverture végétale et à la préservation d'une certaine biomasse. Les conditions climatiques peuvent également limiter les activités humaines, comme l'utilisation du sol.

CLIMAT A NOUAKCHOTT, MAURITANIE

Située sur la frange occidentale du désert du Sahara, les variations météorologiques de Nouakchott des 40 dernières années sont présentées dans la figure I-6. La température moyenne annuelle varie de 24,85 et 27,85°C avec une nette tendance à l'augmentation entre 1960 et 1999. Les précipitations évoluent de 2,7 à 224,9 mm avec une moyenne de 95,94 mm. Pendant les sécheresses extrêmes de 1977, 1983 et 1984, les précipitations annuelles étaient respectivement de 2,7, 6,8 et 5,2mm. L'aridité est comprise entre 0,001 et 0,086. Selon la classification de MAB mentionnée ci-dessus, le climat de la région de Nouakchott était sur-aride (15 ans) puis aride (25 ans) ces 40 dernières années. Quelques auteurs (Courel, 1985 ; Courel *et al.*, 1993, 1996 ; Demangeot *et al.*, 2000) ont rattaché cette région au Sahel. Cependant, il serait plus raisonnable de la considérer comme une partie du Sahara, si nous considérons l'isohyète de 200 mm comme étant la frontière entre Sahara et Sahel ainsi que cela a été suggéré par Courel (1985) et Tucker *et al.* (1991). Et c'est uniquement quand les précipitations atteignent le niveau maximum que cette région pourrait être considérée comme faisant partie du Sahel.

Pour surveiller l'expansion ou la contraction du désert, Tucker *et al.* (1991) ont indiqué qu'un changement de l'index de végétation (NDVI) est associé avec les mouvements de va-et-vient de cet isohyète (200mm). Ozer (1999) a également conclu que les précipitations sur la frange occidentale du Sahara de Ziguinchor (au Sénégal), via Dakar, Nouakchott à Nouadhibou (Mauritanie), ont une variabilité de sud-nord pour la période 1951-1994. Ces faits impliquent que l'aridité de la zone de transition entre Sahara et Sahel fluctue d'année en année et qu'il est difficile de séparer ces deux unités géomorphologiques d'un simple trait.

En raison de l'aridité, aucune agriculture n'est possible dans Nouakchott.

Un autre facteur météorologique est l'action du vent. C'est un agent morphodynamique important, en zones arides, conduisant à l'érosion du sol et au transport du sable. L'alizé du nord avec une direction moyenne de 360° (de 345° à 6°), détermine la forme des dunes de sable mobiles mais crée également une menace pour la Baie de Lévrier dans la région de Nouadhibou en Mauritanie en transportant du sable et en le déposant dans l'Océan Atlantique (Chamard et Courel, 1988 ; Ozer, 1999). Le vent de NNO avec une direction moyenne de 355° (de 336° à 26°) (Courel *et al.*, 1993 ; Ozer, 1999) joue un rôle important dans l'action éolienne et mène la dérive littorale dans la région de Nouakchott. La vitesse minimale capable de provoquer un orage de sable et de poussière varie de 8 à 12.5m/s (Ozer, 1999). Callot *et al.* (1996) et Chamard (2000) ont résumé ce rôle de l'énergie éolienne dans la formule suivante, proposée par R.A. Bagnold et modifiée par K. H. Lettau (1969) et S. G. Fryberger (1979) :

$$Q = V_i^2 (V_i - V_t) C_d / g \dots\dots\dots (I-1)$$

Où,

Q : quantité de sable transporté

g : constante de la pesanteur

V_i : vitesse du vent

V_t : seuil de vitesse pour déplacer du sable

D : densité de l'air

C : constante empirique basée sur la taille du grain,

i.e. :

$$C = C'(\phi/\phi_s)n, \text{ où,}$$

C' : constante universelle pour le sable (6.7)

φ : diamètre du grain transporté

φ_s : 0.25 (diamètre standard)

n : constante empirique

Cette formule nous fournit une méthode pour estimer quantitativement le transport du sable et l'érosion du sol en zone aride.

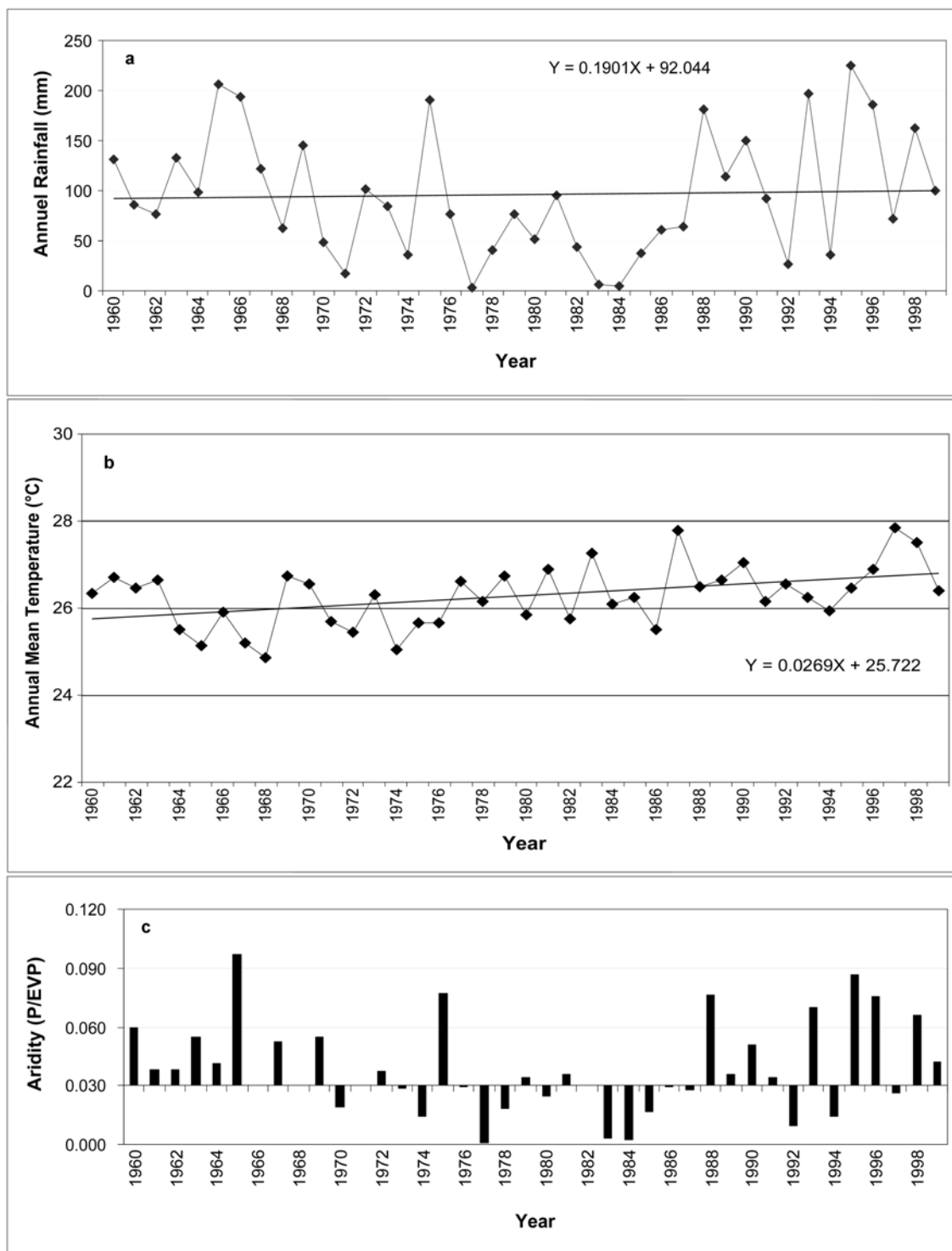


Figure I-6: Evolution des paramètres climatiques des 40 dernières années à Nouakchott

(Data source: ASECNA, after Goutet, 2000)

EVOLUTION CLIMATIQUE AU NORD-OUEST DE LA CHINE

La Chine du Nord-Ouest, incluant administrativement cinq provinces nommées Xinjiang, Qinghai, Gansu, Ningxia et Shaanxi et occupant 1/3 de tout le territoire de la Chine (3,21 millions de km²), est une région aride et semi-aride. Du point de vue de la topographie, elle est diverse et variée au niveau des paysages : montagnes (Altai, Tianshan, Kunlun, Qinling, Qilian et Helan), bassins (Tarim, Junggar, Qaidam), plateaux (plateau tibétain, plateau d'Ordos et plateau de Løess), plaine (plaine de Yinchuan), un couloir (couloir de Hexi), des déserts (Takalamakan, Ulanbohe, Tengger, etc.) et des prairies (pâturages de Qinghai, de Mu Us, etc.). Le climat est donc soumis à une variabilité locale significative d'une unité géomorphologique à l'autre. Les figures I-7 et I-8 montrent ce changement de la moyenne annuelle des températures et des précipitations observé par les principales stations en Chine du Nord-Ouest.

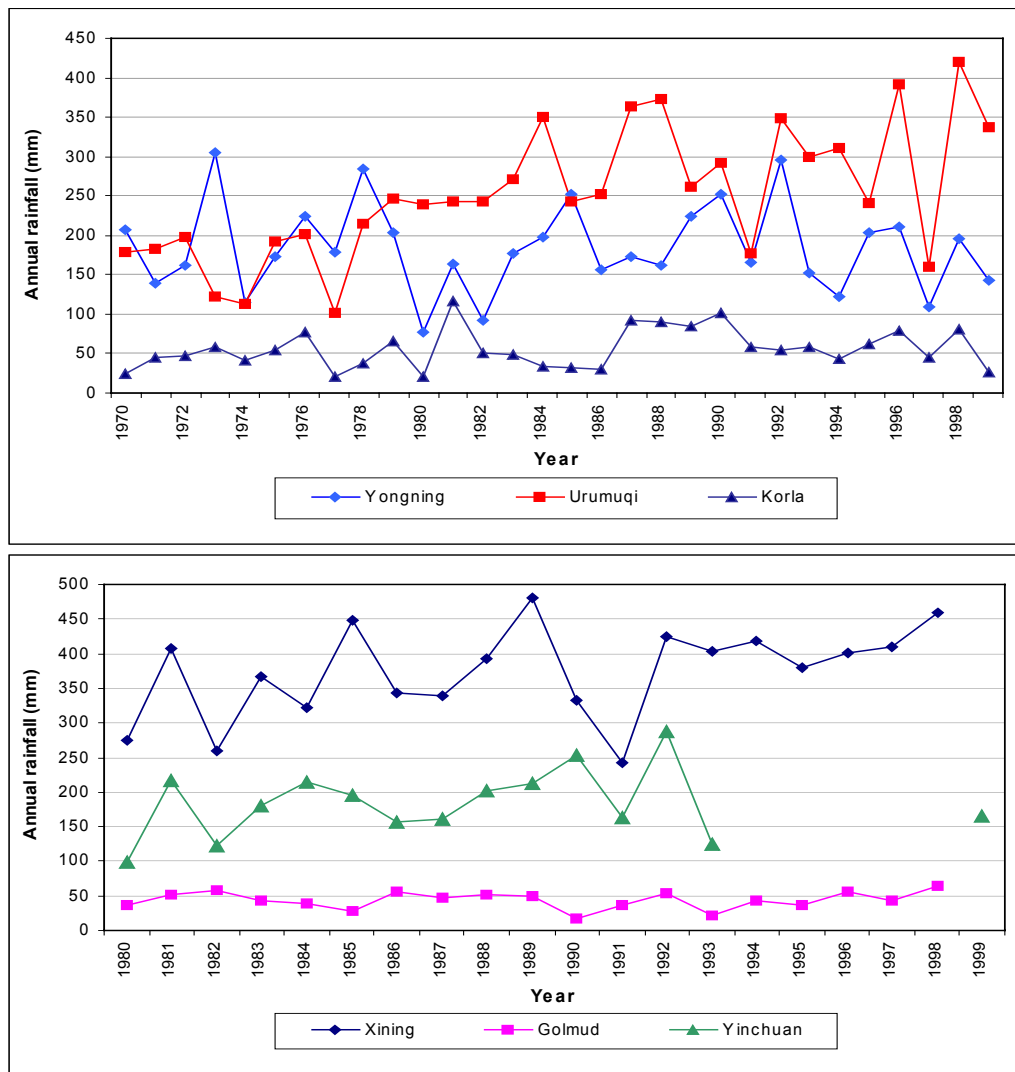


Figure I-7 : Evolution climatique au nord-ouest de la Chine — fluctuation des précipitations annuelles

Note: 1mm de neige en hiver s'est transformé en 0.1mm de précipitations selon Prof. Beltrando (communication personnelle)

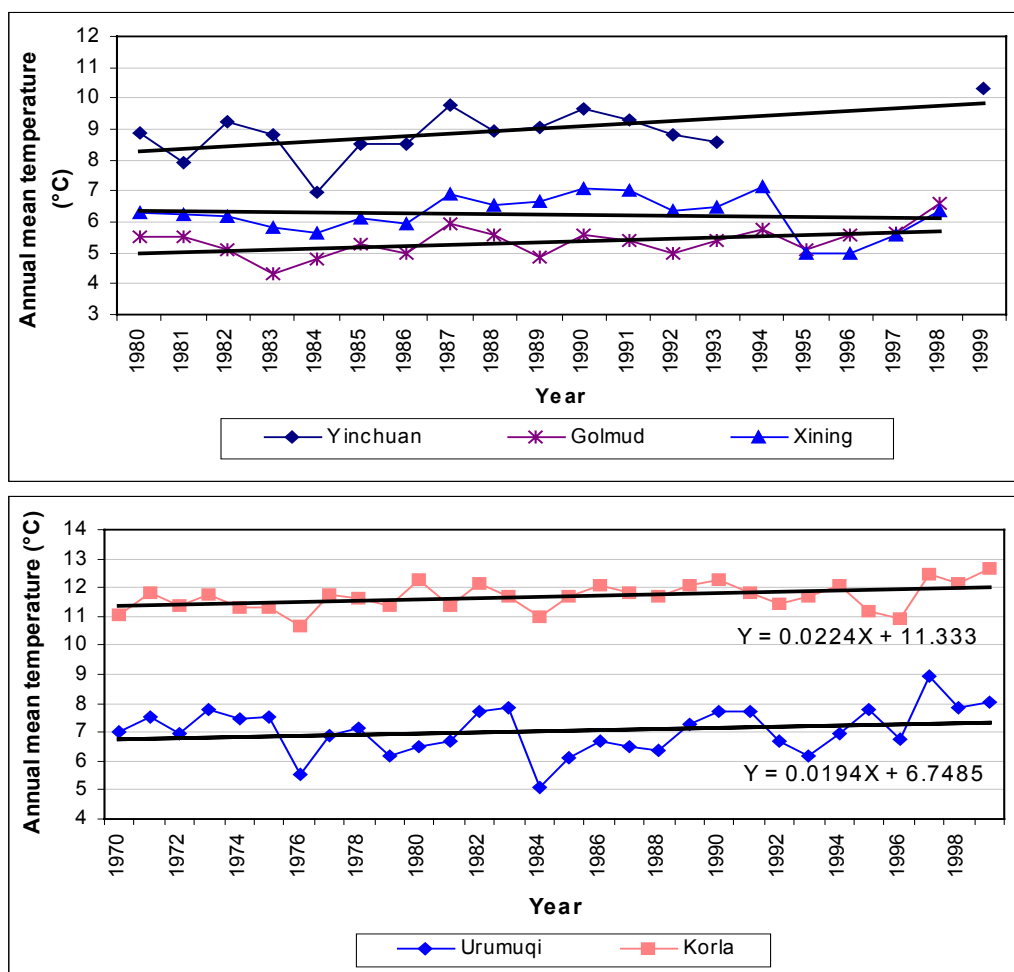


Figure I-8 : Evolution climatique au nord-ouest de la Chine — température annuelle moyenne

D'après les figures I-7 et I-8, on sait que la température moyenne annuelle varie d'année en année et connaît, cependant, une certaine augmentation en Chine du Nord-Ouest de 1970 à 1999, excepté à Xining situé sur le plateau tibétain. L'étude de la variabilité des précipitations annuelles semble plus complexe que celle de la température moyenne annuelle. Quelques stations ont enregistré une tendance à l'augmentation (Xining, Urumqi), d'autres une diminution (Yongning) ou un statut quo (Golmud).

L'aridité moyenne est de 0,052-0,149 pour la plaine de Yinchuan, de 0,141-0,148 pour la terre arénacée de Mu Us (Ejinhoro Qi) et de 0,018-0,078 pour les oasis autour du fleuve de Tarim. Selon la classification de MAB, le désert Takalamakan et le désert du Gobi appartiennent aux zones sur-arides et les autres aux zones arides.

La Chine du Nord-Ouest est également une région souffrant d'une forte action du vent. Les orages de sable et de poussière se produisent fréquemment en hiver et au printemps. La formation du plateau de Loess en est un bon témoignage. Chen *et al.* (2002) affirment qu'un vent fort d'une vitesse

de plus de 11 m/s se produit 26 jours par année dans la terre arénacée de Mu Us. Quand la vitesse du vent atteint 5 m/s, du sol meuble peut être chassé, ce qui produit l'orage de sable et de poussière.

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET ACTIVITE HUMAINE

L'activité humaine, l'utilisation du sol par exemple, dépend, dans une certaine mesure, des conditions climatiques naturelles. En raison de l'aridité, l'agriculture n'est pas possible dans les zones arides excepté dans quelques secteurs particuliers de la Chine du Nord-Ouest, par exemple le Ningxia Nord, le Milieu du Tarim, où il y a des rivières rendant possible l'irrigation. D'autre part, l'activité humaine irrationnelle occasionne des changements de l'environnement et du climat. Par exemple, la mise en culture à grande échelle dans la prairie ou dans la savane conduit à une dégradation du sol et à un assèchement du climat (Chen *et al.*, 2002). La forêt au Sahel a été menacée par l'activité humaine : déboisement pour l'obtention de combustible, de matériaux de construction, et pour la mise en culture (Courel, 1985 ; Chamard et Courel, 1999). D'autres activités telles que l'utilisation agricole du sol ou le surpâturage provoquent inévitablement l'érosion du sol et une diminution de la couverture de végétation, soit du fait du vent soit de trombes d'eau. Le sol dénudé retient moins l'eau nécessaire à la survie de la végétation et est moins efficace pour réduire la vitesse du vent (Warren *et al.*, 1988 ; Ozer, 1999). Par conséquent, l'orage de poussière se produit plus facilement. Un tel orage aggrave les sécheresses, amplifie la création du désert et augmente l'occurrence des dunes de sable mobiles (Chamard et Courel 1988 ; Steiz *et al.*, 2001). Ainsi, l'activité humaine irrationnelle joue un rôle défavorable dans le changement de climat en zone aride.

L'augmentation de la température moyenne annuelle dans les régions étudiées peut être une indication locale du réchauffement global, considéré comme une conséquence de l'activité humaine. Eriksen (2001) a indiqué que le changement de climat est lié à l'augmentation dans l'atmosphère de la concentration des gaz produits par l'homme, provoquant un effet de serre anormal. L'utilisation des combustibles fossiles, la production de ciment et le changement de l'utilisation du sol, ont conduit à une augmentation de la concentration de CO₂ de près de 30% depuis le dix-huitième siècle. D'autres gaz tels que le méthane, le protoxyde d'azote, l'anhydride sulfureux et l'ozone voient également leurs concentrations augmenter dans l'atmosphère du fait de l'activité humaine. Guo *et al.*, (2002) ont précisé que, sans ce réchauffement global, le climat aurait dû se refroidir et s'orienter vers une glaciation.

Par conséquent, l'activité humaine, telle que l'utilisation du sol, l'exploitation des ressources, le déboisement, le développement industriel, etc., a provoqué un changement du climat, ou plutôt, une condition naturelle plus difficile.

Chapitre 2 : Méthodologie

APPROCHES DE RECHERCHE POUR ZONES ARIDES

Comme nous l'avons vu au chapitre I, nombre d'organismes et de chercheurs ont mené différentes études sur l'environnement aride. La télédétection (RS) est l'une des techniques les plus répandues dans leurs recherches pour l'analyse du changement d'albédo (Courel *et al.*, 1984 ; Courel, 1985), la classification d'occupation du sol (Tucker *et al.*, 1985), l'identification de la désertification (Hellden, 1984, 1988 ; Tucker *et al.*, 1984, 1986, 1991 ; Zhu *et al.*, 1993), le suivi des changements d'occupation du sol (Lambin *et al.*, 1994 et 1997a), la cartographie de dunes de sable et la modélisation de l'érosion du sol (Callot *et al.*, 1994, 1996, 2000 ; Simonin *et al.*, 1990), l'étude des ressources d'eau et la typologie de la surface par Radar (Schaber *et al.*, 1986 ; Evan *et al.*, 1988 ; Courel *et al.*, 2000 ; Simonin *et al.*, 2000), etc. La télédétection est donc un outil pertinent pour la recherche en zone aride.

D'autres outils ont été plus récemment largement utilisés dans la recherche pour l'environnement, il s'agit des Systèmes d'Information Géographiques (GIS), capables de stocker et de gérer toutes sortes de données spatiales, de surveiller les dynamiques environnementales et de nous permettre d'effectuer l'analyse ou la modélisation spatiale. L'utilisation de cette technique serait certainement très efficace pour l'étude des zones arides.

Une avancée scientifique s'est produite à la fin des années 1980 et au début de 1990, le Système de Positionnement Global (GPS), largement utilisé en navigation et en positionnement dans le monde entier. Cette technique serait d'une grande utilité lors de voyages de terrain pour vérifier et localiser l'apparition de changements et d'événements pertinents.

Ces trois techniques se sont nommées 3S dans les années 1990. Actuellement, une nouvelle expression est utilisée : la *géomatique* ou *géoinformatique*, terme générique utilisé par les Canadiens ces dernières années pour décrire le système de traitement des géoinformations et les techniques associées, dont les 3S sont les éléments centraux.

Une tendance de ces dernières années est la *modélisation de l'interaction homme-environnement* qui vise à comprendre les forces d'entraînement et le mécanisme des changements environnementaux en s'appuyant sur les SIG et les modèles statistiques (Lambin, 1994 et 1997 ; Mertens *et al.*, 2000 ; Serneels et al., 2001 ; Veldkamp *et al.*, 2001 ; Brun, 2000 ; Parker *et al.*, 2002 ; Verburg *et al.*, 2002 ; Wu *et al.*, 2002a). Cette technique est progressivement devenue une démarche essentielle des recherches de l'environnement global puisqu'elle rend la prévision d'évolution possible.

Ainsi, le suivi et la modélisation par 3S ou, plutôt, les techniques de géomatique combinées avec l'analyse de l'interaction homme-environnement semble être une approche efficace pour l'étude de changement de l'environnement aride. C'est donc la méthode adoptée dans la recherche de cette thèse.

I. SUIVI DE L'ENVIRONNEMENT PAR LA TELEDETECTION

Comme cela fut suggéré par Thomas *et al.* (1994), la surveillance est l'une des méthodes essentielles pour la recherche en l'environnement aride. En fait, le suivi doit observer la dynamique de l'environnement, discerner et mesurer ses changements, en intégrant les dimensions spatiale et temporelle de sa dégradation. Cependant, Lambin (1997) a précisé que la mesure de la dégradation du sol est particulièrement difficile parce qu'il y a une forte interaction entre la variabilité normale ou aléatoire des précipitations et les changements anthropogènes de couverture végétale. Par conséquent, la surveillance constitue une recherche approfondie dans laquelle n'importe quel facteur menant au malentendu doit être pris en considération.

Le relevé de terrain effectué à différentes dates est la méthode de suivi la plus directe, par laquelle nous pouvons directement observer et tracer dynamiquement la situation de l'environnement dans le secteur concerné. L'imperfection de cette méthode se situe dans sa limite à obtenir des données régionales et globales concernant les modes d'occupation et leurs changements pendant une période donnée, avec un soutien financier limité. Les techniques de télédétection surmontent cette imperfection grâce aux divers capteurs qui peuvent être installés sur différentes plates-formes, tels que les satellites artificiels ou les avions, et peuvent régulièrement balayer la surface de la terre ou le secteur intéressé et acquérir multi-temporellement des informations dynamiques sur l'environnement. Cependant, l'interprétation des données télédétectées peut ponctuellement rencontrer une difficulté lorsque ces données sont utilisées pour analyser un changement subtil. Par conséquent, la combinaison du relevé de terrain (avec le GPS) et de la télédétection semble être une méthode plus adaptée pour accomplir un suivi.

Dès 1963, Verstappen a commencé à employer les photographies aériennes et le relevé de terrain pour mesurer le changement côtier. C'est probablement la première détection de changement de l'environnement par la télédétection. Depuis lors, le suivi de changement est devenu une des applications principales des données spatiales. Plusieurs auteurs ont entrepris ce genre d'études et nombre de documents référentiels pourraient être recensés concernant ce sujet. En choisissant de nous limiter à une certaine période, voici une liste d'exemples mentionnés dans cette recherche.

Anuta (1973), Rifman *et al.* (1975), Swain *et al.* (1976), Weismiller *et al.* (1977), Todd (1977), Jensen *et al.* (1982), Nelson (1983), Tucker *et al.* (1984, 1986), Justice (1986), Malingreau *et al.* (1989), Skole *et al.* (1993), Lambin *et al.* (1994, 1997a, 1997b), Collins *et al.* (1996), Mertens *et al.* (2000), Wu *et al.* (2002a and b), etc., se sont servis des données satellitaires pour distinguer et surveiller divers genres de changements environnementaux comme le développement urbain ou de

frange urbaine, le changement de forêt, le déboisement, la modification côtière, les changements d'utilisation du sol en agriculture, etc. Leurs recherches sont à la base de la création d'un algorithme efficace pour le suivi de changement. Certaines recherches portant sur la télédétection appliquée aux zones arides par Courel *et al.* (1984) et Courel (1985), Hellden (1984, 1988, 1991), Tucker *et al.* (1986, 1991), Graetz *et al.* (1988), Price *et al.* (1992), Zhu *et al.* (1993, 1995), Lambin *et al.* (1997a et b), Wu *et al.* (2002a), méritent tout particulièrement d'être mentionnées. Leurs recherches ont à la fois concerné le suivi des phénomènes principaux tels que la mutation d'albédo de surface, la désertification de pâturage, le changement d'utilisation du sol, la dégradation de l'écosystème et la modélisation de l'interaction homme-environnement, elles se sont basées sur les résultats de traitement de télédétection. Ces exemples réussis fournissent de bonnes pistes à cette thèse pour définir des algorithmes de suivi de l'environnement. Une brève introduction portera premièrement sur le principe fondamental de la télédétection avant d'exposer les méthodes de suivi des changements environnementaux.

1. PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LA TELEDETECTION

ORIGINE

Le terme de “Télédétection” (*Remote sensing* en anglais) a été utilisé pour la première fois, en 1955, par Mme Evelyn Pruitt du bureau de la recherche navale des Etats-Unis, pour regrouper la photographie aérienne, l'obtention d'images par satellite, ainsi que d'autres formes de collecte de données à distance. Habituellement elle est définie comme la science, la technologie ou l'art d'obtenir à distance des informations sur des objets ou des phénomènes (Encyclopédie Microsoft Encarta, 2001). A proprement parler, n'importe quel moyen pour obtenir des informations à distance est de la télédétection. D'un point de vue pratique, cette expression se rapporte à la collecte, au traitement et à l'extraction d'informations sur l'environnement sur Terre (Centre canadien de télédétection, 2001).

La technique de la télédétection peut remonter au XIX^{ème} siècle. L'invention de la photographie en 1839 par un inventeur français, J. Daguerre (1787-1851) a donné naissance à la photogrammétrie. En 1858, un autre français, Felix Tournachon (sous le pseudonyme de Félix Nadar) (1820-1910), a pris la première photographie à partir d'un ballon et a déposé un brevet pour le nouveau système de la photographie aérostatique donnant un aperçu de la topographie, de l'hydrographie et des données cadastrales vues du ciel (Chen, 1984 ; Encyclopédie Microsoft Encarta Standard, 2001). Le succès du vol des frères Wright en 1903 a donné le coup d'envoi à l'application de la photographie aéroportée. En 1957, le lancement réussi des satellites en ex-Union Soviétique puis aux Etats-Unis en 1958, avec en particulier, le satellite Landsat de la NASA (Etats-Unis) en 1972, a ouvert une nouvelle ère d'utilisation paisible et d'application civile des techniques de télédétection. Depuis lors, divers capteurs

optiques, des radars mais également une variété de plates-formes, telles que le ballon, l'avion et le satellite ont été développés pour différentes applications. La télédétection a été ensuite largement appliquée dans de nombreux domaines : cartographie géographique et géologique, inventaire des ressources naturelles, suivi de l'environnement, étude sur l'utilisation des sols, estimation de la productivité agricole, prévisions météorologiques, études sur l'atmosphère et l'océan, détection militaire, etc.

PRINCIPE

Le principe de la télédétection, tel qu'il est présenté dans sa définition ci-dessus, repose sur l'acquisition de signaux de radiation ou de réflexion de l'objet, par exemple, l'utilisation des sols, par un capteur à distance installé sur différentes plates-formes (telles que l'avion, le satellite) en utilisant les bandes visibles, infrarouge et micro-onde. La perception et l'enregistrement du rayonnement naturel ou de la réflexion de l'énergie solaire des objets est appelée *télédétection passive*. La trace multibande visible et infrarouge de l'information de surface du sol en est un exemple. En revanche, lorsqu'il s'agit d'illuminer des objets précis puis de récolter l'information à partir de la réflexion de l'énergie émise par la plate-forme elle-même, le procédé s'appelle *télédétection active*. Le radar en est un exemple.

DISPERSION, ABSORPTION, EFFET ET FENETRE D'ATMOSPHERE

L'énergie solaire arrive sur le sol sous forme d'une série d'ondes électromagnétiques, telles que les rayons X, les rayons ultraviolets, les rayons visibles, les rayons infrarouges et les ondes radio. Cependant, du fait de l'absorption et de la dispersion atmosphérique subies par certaines longueurs d'onde de l'énergie solaire, toute l'énergie de rayonnement ne peut atteindre la surface de la terre et donc les radiations ainsi que l'intensité du signal émanant de la cible vers le capteur s'en trouvent atténuées. Ce phénomène s'appelle *l'effet atmosphérique*.

En ce qui concerne la dispersion, deux formes différentes sont discernables dans l'atmosphère : *Rayleigh* et *Mie*. Rayleigh apparaît généralement au moment où le rayonnement interagit avec les molécules atmosphériques ou les autres particules d'un diamètre notablement inférieur à la longueur d'onde du rayonnement. L'effet de dispersion de Rayleigh est inversement proportionnel à la puissance quatrième de la longueur d'onde (Curcio 1961 ; Lillesand *et al.*, 1979 et 1994 ; Slater *et al.*, 1980 ; Richards, 1986 et Chavez, 1988). Par conséquent, il y a une grande probabilité pour que les ondes courtes soient plus menacées par ce mécanisme de dispersion que les grandes ondes. Le ciel "bleu" est une manifestation de dispersion de Rayleigh, car l'atmosphère de la terre disperse plus significativement les rayons d'onde courte (bleue), que les autres longueurs d'onde, dans la bande visible quand les rayons du soleil interagissent avec l'atmosphère. Les lueurs rougeâtres du lever ou du coucher du soleil sont également provoquées par la dispersion de Rayleigh étant donné que, la distance

atmosphérique à ces moments-là favorise la dispersion de la majeure partie du rayonnement d'onde courte par rapport à une longueur d'onde plus longue. La dispersion de *Mie* ou d'*aérosol* existe quand les rayons du soleil interagissent avec de plus grandes particules atmosphériques telles que celles de la vapeur d'eau, de la fumée, de la brume. Ces particules sont de l'ordre d'un dixième à un de longueur d'onde. Ainsi cette dispersion est également dépendante de la longueur d'onde, bien que pas aussi nettement que la dispersion de Rayleigh. Quand les particules sont beaucoup plus grandes que la longueur d'onde, tels que celles des brouillards, des nuages et de la poussière, la dispersion n'est plus dépendante de la longueur d'onde et devient *non-sélective* (Lillesand *et al.*, 1979, 1994 ; Richards, 1986). Dans une atmosphère idéale claire, la dispersion de Rayleigh est le seul mécanisme présent (Richards, 1986).

L'énergie de radiation est absorbée de manière sélective par l'atmosphère à travers laquelle elle transmet un rayonnement à la Terre ou au capteur. Un tel phénomène est appelé *absorption atmosphérique*. Les composants principaux de l'atmosphère qui absorbent l'énergie solaire sont la vapeur d'eau (H₂O), l'anhydride carbonique (CO₂), l'oxygène (O₂) et l'ozone (O₃) (Lillesand *et al.*, 1979, 1994, 2000 ; Chou *et al.*, 1995). L'ozone absorbe principalement les rayons ultraviolets ; l'anhydride carbonique, les rayons infrarouges et thermiques moyens. La vapeur d'eau joue également un rôle significatif en réduisant l'intensité des rayons proche-à-moyens infrarouges. Par conséquent, l'absorption atmosphérique atténue le rayonnement solaire émis vers la Terre.

Les gammes de longueurs d'onde pour lesquelles l'atmosphère est particulièrement transmissive ou à la *transmittance* (nous adopterons ce terme pour définir la capacité à transmettre) de l'énergie élevée sont nommées : *fenêtres atmosphériques* (Lillesand *et al.*, 1979, 1994, 2000 ; Chen, 1984 ; Chou *et al.*, 1995). La figure II-1 montre les localisations de ces fenêtres dans le spectre électromagnétique. Pour collecter les données de la télédétection, il est fondamental de sélectionner les gammes transmissibles. Les fenêtres connues et déjà utilisées à cette fin sont les suivantes (Chen, 1984) :

1. Fenêtres photographiques (0,3-1,3 μ m) : comprenant tout le visible, une partie des ultraviolets (0,3-0,38 μ m) et du proche infrarouge (0,76-1,3 μ m). Cette gamme d'énergie peut être largement transmise par l'atmosphère (> 90%). De plus, cette fenêtre peut être employée pour obtenir et enregistrer l'information électromagnétique des objets par la photographie. C'est pourquoi cette section d'onde électromagnétique est le plus fréquemment utilisée dans le cadre de la télédétection.
2. Infrarouge moyen (1,5-5,5 μ m) : avec une transmittance de 50-90% selon la longueur d'onde. Il existe deux vallées significatives de transmission à environ 2 μ m et 2,5 μ m dues à l'absorption par la vapeur d'eau (H₂O) et le CO₂. Cette fenêtre peut ainsi être divisée en trois sous-fenêtres aux longueurs d'onde respectives de 1,5-1,8 μ m, 2,1-2,4 μ m et 3-5,5 μ m. Les

informations de radiation et de réflexion des objets de la surface du globe peuvent être détectées par le scanner mais pas par l'appareil photo.

3. Infrarouge thermique (8-14 μ m) : à la transmittance d'environ de 60-70%, elle est employée pour la détection de la radiation thermique des objets de la surface ; et
4. Micro-onde (8mm-1m) : fenêtre de transmission totale (100%) utilisée pour la détection par radar.

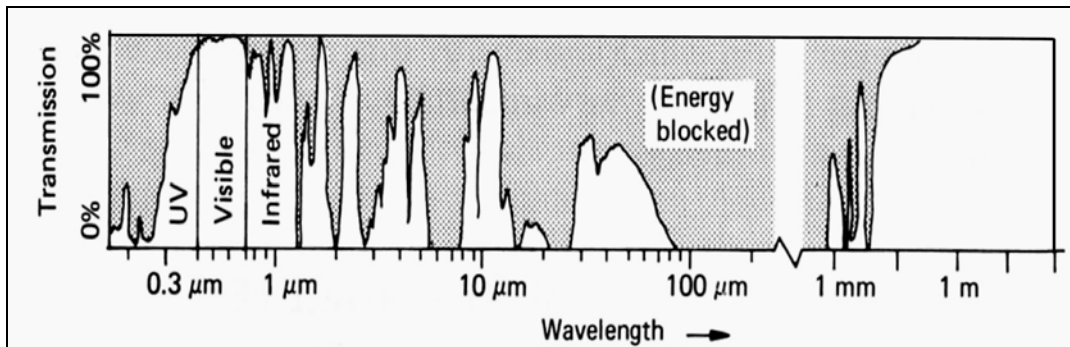


Figure II-1 : Fenêtres atmosphériques

(D'après Lillesand *et al.*, 1994)

REFLECTANCE SPECTRALE

Les caractéristiques de réflectivité des objets de surface de la terre peuvent être quantifiées en mesurant la partie réfléctée de l'énergie incidente. Ce qui est mesuré en fonction de la longueur d'onde est appelé la *réflectance spectrale* et peut être exprimé en pourcentage (Lillesand *et al.*, 1979, 1994 ; Chen, 1984). Une courbe graphique de la réflectance d'un objet en fonction de la longueur d'onde se nomme une *courbe spectrale de réflectance* (figure II-2). La configuration de telles courbes nous donne des indications sur les caractéristiques spectrales d'un objet et influence fortement le choix des régions de longueur d'onde dans lesquelles des données de télédétection sont acquises pour une application particulière (Lillesand *et al.*, 1979, 1994). La figure II-2 présente la réflectance spectrale de trois compositions communes de surfaces de la Terre dans la gamme du visible, de l'infrarouge et de la proche-moyen infrarouge.

En ce qui concerne la végétation saine, la chlorophylle absorbe l'énergie d'une longueur d'onde d'environ 0,45 μ m (bleu) et à 0,67 μ m (rouge) et a une réflexion d'environ 0,55 μ m (vert) dans la gamme spectrale visible. C'est pourquoi nous percevons la végétation saine comme étant de couleur verte. Avec l'augmentation de la longueur d'onde de 0,76 μ m à 1,3 μ m dans la section du proche infrarouge, la végétation reflète fortement l'énergie et montre une réflectance élevée. Toutefois elle diminue dans la gamme infrarouge moyenne et des creux significatifs se produisent à environ 1,4 μ m, 1,9 μ m et 2,5 μ m, parce que l'eau dans les feuilles absorbe fortement, à ces longueurs d'onde. Si la plante est sensible à un risque de maladie ou est menacée par un insecte, la concentration en chlorophylle de la feuille

diminuera et conduira à moins d'absorption dans les bandes bleues et rouges. La feuille devient alors jaune en raison de l'augmentation de la réflectance rouge et bleue.

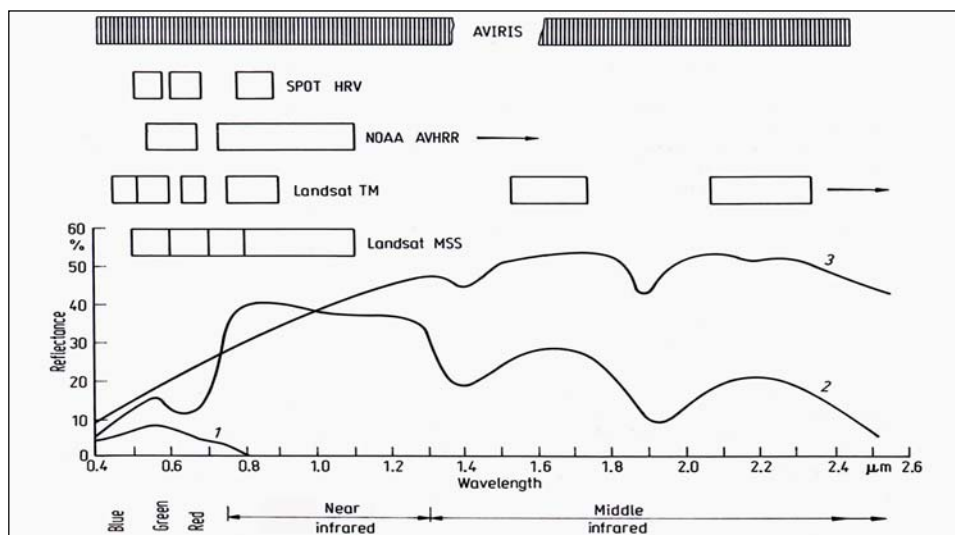


Figure II-2 : Caractéristiques de la réflectance spectrale des matériaux communs de la surface du sol, dans le visible et le proche-moyen infrarouge
(d'après Richards et Jia, 1999).

Le sol nu sec montre une augmentation de réflectance en ce qui concerne la longueur d'onde mais décroît également à environ 1,4μm, 1,9μm et 2,5μm, du fait de l'humidité. La réflectance du sol dépend de l'humidité, du contenu organique, de la texture de sa composition et de la rugosité de surface.

L'eau claire semble avoir seulement un faible pouvoir de réflexion dans le visible. Cependant, avec le changement de la turbidité de l'eau, la transmittance et la réflectance de l'eau changent nettement (Lillesand et al., 1994).

Les positions des bandes spectrales pour les instruments communs de télédétection sont indiquées dans la figure II-2.

BANDES SPECTRALES EN TELEDETECTION

Basée sur les caractéristiques spectrales de réflectance de différents objets, une série de gammes de longueur d'onde du spectre a été employée pour scanner et détecter les informations de surface de la Terre. Ces gammes de longueur d'onde s'appellent les *bandes spectrales*. Chaque bande a une sensibilité spécifique pour certain(s) objet(s) de sorte qu'elle peut être appliquée au balayage ou à l'enregistrement des caractéristiques d'un tel objet. Si l'on observe Landsat MSS, TM, ETM+ et SPOT HRV et HRG par exemple, les gammes de bandes spectrales et leur application potentielle sont présentées dans le tableau 2-1.

Tableau 2-1 : Caractéristiques spectrales de Landsat MSS, TM, ETM et SPOT

Capteur	Gamme de bandes (µm)	Localisation spectrale	IFOV ou résolution (m)	FOV ou swath (km)	Application principale
LANDSAT					
MSS	B4: 0.5 - 0.6	Vert	79×79	185	Cartographie des eaux territoriales, suivi de la pollution et évaluation de la vigueur de la végétation
	B5: 0.6 - 0.7	Rouge	79×79	185	Distinction de la transparence et turbidité de l'eau, étude de l'absorption végétale
	B6: 0.7 - 0.8	proche IR	79×79	185	Distinction des terres humides et de la végétation
	B7: 0.8 - 1.1	Proche IR	79×79	185	Différenciation des types de végétation et limites entre terre et eau
TM & ETM+	B1: 0.45 - 0.52	Bleu	30×30	185	Pénétration des plans d'eau, cartographie des eaux territoriales
	B2: 0.52 - 0.60	Vert	30×30	185	Distinction de la végétation, évaluation de la vigueur et identification des différents types de cultures
	B3: 0.63 - 0.69	Rouge	30×30	185	Absorption de la chlorophylle, et différenciation des espèces végétales
	B4: 0.76 - 0.90	Proche IR	30×30	185	Détermination des types de végétation et surveillance de la vigueur et de la biomasse, définition des limites de plans d'eau
	B5: 1.55 - 1.75	Moyen IR	30×30	185	Indicateurs de végétation et d'humidité du sol utilisés pour la différenciation de la neige et des nuages
	B6: 10.4 - 12.5	IR therm.	TM 120×120 ETM+ 60×60	185	Analyse des contraintes de végétation, distinction de l'humidité du sol et cartographie thermique
	B7: 2.08 - 2.35	Moyen IR	30×30	185	Identification des types de roches et de minéraux, cartographie hydrothermale et mesure de l'humidité du sol et de la végétation
	P: 0.50 - 0.90 Pour ETM+	Visible et proche IR	15×15	185	Images à la résolution plus élevée
SPOT					
Capteur	Gammes de bandes (µm)	Localisation spectrale	IFOV ou résolution (m)	FOV ou swath (km)	Application principale
HRV	B1: 0.50 - 0.59	Vert	20×20	60	Cartographie des eaux territoriales, suivi de la pollution et évaluation de la vigueur de la végétation
	B2: 0.61 - 0.68	Rouge	20×20	60	Vérification de la turbidité de l'eau et étude de l'absorption végétale
	B3: 0.79 - 0.89	Proche IR	20×20	60	Identification des types et de la vigueur de la végétation, mesure de la biomasse et distinction de l'eau et de la terre
	P: 0.51 - 0.73	Visible	10×10	60	Image de résolution plus élevée pour la fusion ou une recherche plus précise
HRVIR	B1: 0.50 - 0.59	Vert	20×20	60	Cartographie des eaux territoriales, suivi de la pollution et évaluation de la vigueur de la végétation
	B2: 0.61 - 0.68	Rouge	20×20	60	Vérification de la turbidité de l'eau et étude de l'absorption végétale
	B3: 0.78 - 0.89	Proche IR	20×20	60	Identification des types et de la vigueur de la végétation, mesure de la biomasse et distinction de l'eau et de la terre
	B4: 1.58 - 1.75	Moyen IR	20×20	60	Indicateurs de végétation et d'humidité du sol utilisés pour la différenciation de la neige et des nuages
	P: 0.61 - 0.68	P	10×10	60	Image de résolution plus élevée pour la fusion ou une recherche plus précise
HRG	B1: 0.50 - 0.59	Vert	10×10	60	Cartographie des eaux territoriales, suivi de la pollution et évaluation de la vigueur de la végétation
	B2: 0.61 - 0.68	Rouge	10×10	60	Vérification de la turbidité de l'eau et étude de l'absorption végétale
	B3: 0.78 - 0.89	Proche IR	10×10	60	Identification des types et de la vigueur de la végétation, mesure de la biomasse et distinction de l'eau et de la terre
	B4: 1.58 - 1.75	Moyen IR	10×10	60	Indicateurs de végétation et d'humidité du sol utilisés pour la différenciation de la neige et des nuages
	P: 0.48 - 0.71	Visible	5×5 et 2.5×2.5	60	Image de résolution plus élevée pour la fusion ou une recherche plus précise
VGT	B1: 0.43 - 0.47	Bleu	1000×1000	2250	Suivi global et régional de la végétation et utilisation pour la météorologie
	B2: 0.61 - 0.68	Rouge	1000×1000	2250	
	B3: 0.78 - 0.89	Proche IR	1000×1000	2250	
	B4: 1.58 - 1.75	Moyen IR	1000×1000	2250	

Source de données : (1) Richard and Jia (1999) ; (2) Lindgren (1985) ; (3) Lillesand *et al.* (1994) ; (4) Chou *et al.* (1995), (5) NASA (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>) ; et (6) CNES, <http://www.cnes.fr/> and <http://www.spotimage.fr>.

Note : VGT— SPOT-4 Vegetation sensor ; FOV— field of view ;
IFOV — instantaneous field of view and P— panchromatic.

DONNEES DIGITALISEES

Ce n'est qu'à partir du lancement de Landsat-1 en 1972, que les données d'image numérique sont devenues largement disponibles pour l'application de la télédétection à l'étude de la Terre (Lillesand *et al.*, 1979). Le mot "image" acquiert une signification plutôt générale dans ce contexte. Une image n'est plus simplement la reproduction ou la simple photographique, c'est également une rangée bidimensionnelle de nombres, de petits éléments spatialement distincts représentant radiométriquement leur niveau de brillance (Schowengerdt, 1983 ; Richards, 1986). Ces petits éléments sont disposés dans une grille rectangulaire et désignés sous le nom de *pixel* au format de *raster*. La valeur de brillance ou le niveau gris de chaque pixel est également appelé le compte numérique (CN) ou le nombre numérique (DN). La taille du pixel, désignée sous le nom de champ visuel instantané (IFOV), dépend de la résolution du capteur. L'IFOV de Landsat TM ou ETM+ est de 30m×30m, celui de SPOT HRV de 20m×20m, et celui de SPOT HRG de 10m×10m. Plus la taille du pixel est petite, plus les contenus de l'image numérique seront détaillés.

Pour faciliter le traitement par ordinateur, les données des images numériques sont habituellement enregistrées et stockées dans un *format binaire*. Les chiffres, dans le système binaire, sont désignés sous le nom de *bits* (Showengerdt, 1983 ; Richards, 1987). Ainsi à 8-bits, les valeurs de luminosité, ou les comptes numériques du pixel, ont 256 (2^8) niveaux possibles dans un *système décimal* avec une variation possible de 0 à 255 (2^8-1) ; pour 16-bits, de 0 à 65535 ($2^{16}-1$). Le groupe de bits représentant chaque pixel se nomme *octet*. Le système binaire le plus fréquemment utilisé dans la télédétection est 8-bits. Une grande partie des images de Landsat MSS, TM et de SPOT sont stockées dans ce format, dans lequel le niveau de gris du pixel s'étend de 0 à 255. Plus récemment, les images de Landsat ETM+ ont fréquemment été enregistrées en 16-bits, leurs niveaux de gris s'étendant alors de 0 à 65535.

L'avantage des données au format numérique est que l'image peut être traitée numériquement par ordinateur pour en extraire l'information pertinente, en utilisant une série de procédures, par exemple, le prétraitement (rectification radiométrique et géométrique), le renforcement, la transformation, la classification etc. Ces procédures seront présentées dans les sections suivantes.

2. SUIVI DE CHANGEMENT

Les approches de suivi par la télédétection sont généralement suivies de la manière suivante : la correction atmosphérique, la rectification, la transformation (si elle se produit) et l'analyse de changement à partir des données spatiales multitemporelles.

CORRECTION ATMOSPHERIQUE

Les signaux de télédétection sont essentiellement constitués de la quantité d'énergie de la cible perçue par le capteur pour une région spectrale donnée. L'image satellitaire résulte ainsi d'un enregistrement global des signaux rayonnés et reflétés par les objets de surface de la Terre, de la radiation et de la dispersion atmosphérique. Par conséquent, les images issues de la télédétection sont habituellement riches de "bruit". Afin d'obtenir l'information originelle à partir des données d'une image ou d'effectuer la détection de changements multitemporels, il est nécessaire d'éliminer un tel bruit de l'image satellitaire avant son utilisation. Le bruit a deux composantes : interne et externe. Le bruit interne est inhérent au capteur et peut être calibré sur la base des paramètres propres à la sonde. Le bruit externe dépend de l'absorption, de la dispersion, et de la radiation atmosphériques (figure II-3), qui atténuent la radiance des cibles et entraînent une diminution des détails fins de l'image. Le traitement pour enlever ou réduire de tels effets atmosphériques sur l'image s'appelle la *correction atmosphérique*.

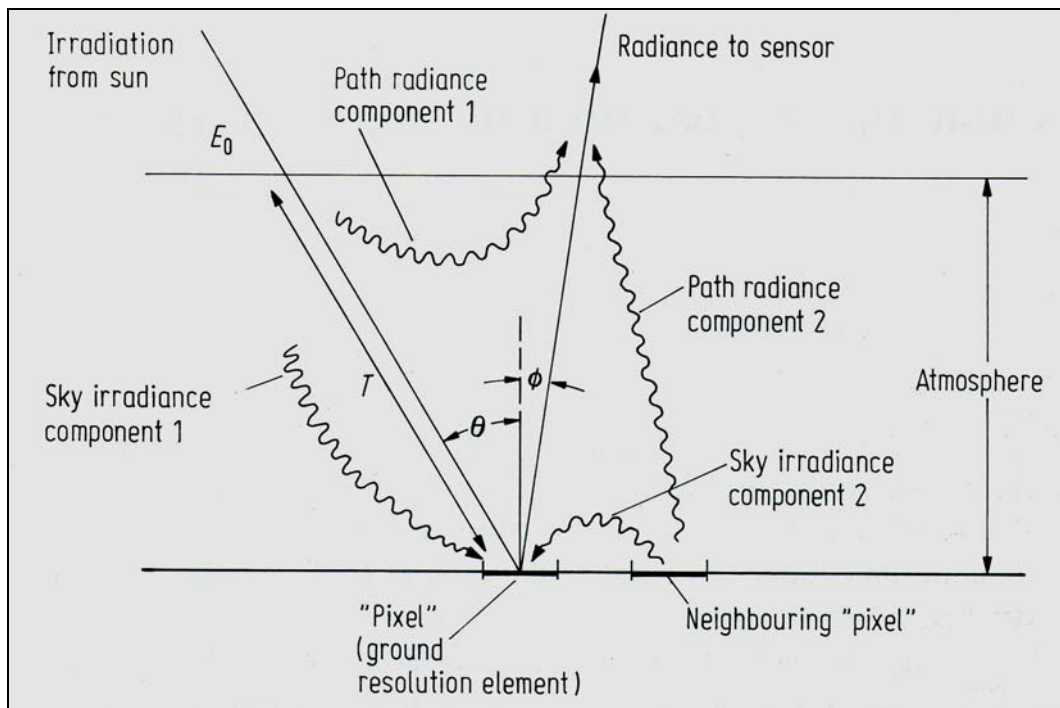


Figure II-3 : Effets atmosphériques en télédétection

(D'après Richards and Jia, 1999)

Les effets atmosphériques sur la télédétection sont multiples. Des facteurs tels que l'angle solaire d'azimut et d'altitude (ou l'angle de zénith), l'angle de vue du capteur (angle de nadir), les paramètres physiques de l'atmosphère (dispersion, transmittance, épaisseur optique), la radiance de trajet, la réflexion spectrale et les caractéristiques de radiation de la cible de surface sur Terre, etc., doivent être pris en compte lors de la correction. Par conséquent, la correction atmosphérique est, en

fait, un traitement physico-mathématique complexe. Depuis les débuts de l'utilisation pacifique de la télédétection avec Landsat par exemple, au début des années 1970, un certain nombre de chercheurs ont exploré et cerné différentes approches pour effectuer cette correction. Turner *et al.* (1972) et Sharma *et al.* (1972) ont développé quelques modèles atmosphériques physiques pour éliminer l'effet atmosphérique et pour augmenter la qualité de l'image satellitaire. Dans les années suivantes, une variété d'algorithmes détaillés basés sur la simulation, la mesure *in-situ* et la simplification des modèles atmosphériques ont été développés par Kiang (1978), Gordon (1978), Dave (1980), Deshamps *et al.* (1982), Kneizys *et al.* (1983), Forster (1984), Woodham *et al.* (1987), Kaufman (1988), Richter (1990), Tanré *et al.* (1990) and Moran *et al.* (1992), etc. Ces algorithmes peuvent aboutir à une évaluation précise de l'effet atmosphérique et obtenir une correction idéale. Cependant, ils doivent toujours disposer des paramètres atmosphériques et même des mesures atmosphériques *in-situ* pour chaque vol de satellite. Ceci est incompatible avec de nombreuses applications, impossible dans le cas de données anciennes ou si le site étudié est très éloigné (Chavez, 1996). En outre, il n'est pas toujours possible pour l'utilisateur de la télédétection d'avoir accès à des programmes appropriés de correction atmosphérique ou d'avoir les moyens de développer de tels programmes ; quant aux paramètres atmosphériques disponibles, ils ne sont pas toujours ceux nécessités par les programmes (Forster, 1984). Richards et Jia (1999) ont précisé qu'il n'est pas toujours nécessaire d'effectuer la correction détaillée des effets de la dispersion et de l'absorption de l'atmosphère du fait de l'indisponibilité des paramètres atmosphériques tels que l'humidité et la visibilité. Une correction grossière, capable d'éliminer approximativement l'effet atmosphérique, qui serait uniquement basée sur l'image numérique elle-même et qui n'exigerait aucune mesure *in-situ* pourrait également être efficace.

Modèles de soustraction d'objet-foncé (DOS) et de COST

Une approche simple nommée "soustraction d'objet-foncé"(DOS) a été développée pour les données de Landsat MSS par Vincent (1972), Chavez (1975) et Potter *et al.* (1975). Elle présuppose que la bande 7 est libre de tout effet atmosphérique. Les comptes numériques (DC) ou les nombres numériques (DN) des objets-foncés, tels que les retenues profondes d'eau claire où les ombres, devraient être zéro ou de près de zéro pour chaque bande dans l'image. Selon la corrélation linéaire entre la bande 7 et les autres, le décalage (*offset*) de chaque bande par rapport à la bande 7, qui représente la valeur de brume attribuée à la dispersion atmosphérique, peut être obtenu à partir d'une analyse de régression linéaire et être soustrait à tous les pixels de cette bande. Une autre manière d'effectuer cette correction est d'ajuster le niveau de gris minimum, dans l'histogramme de comptes numériques de chaque bande, sur zéro ou proche de zéro, en supposant que la radiation, dans les secteurs ombragés ou les plans d'eau, est produite par la brume (Chavez, 1975, 1988). Une telle correction atmosphérique employant la technique de soustraction d'objet-foncé s'appelle la *correction*

de brume (Chavez, 1996) ou l'enlèvement de brume (Richards, 1986 ; Richards et Jia, 1999). En raison de sa simplicité, cette approche a été largement appliquée à la procédure de prétraitement d'image et adoptée dans beaucoup de travaux de télédétection (Sabins, 1978 ; Lillesand *et al.*, 1979, 1994, 2000 ; Schowengerdt, 1983 ; Richards, 1986 ; Chou *et al.*, 1995 ; Richards et Jia, 1999).

Le défaut principal de cette approche réside dans le fait qu'un tel enlèvement de brume peut ne pas être conforme au modèle de la dispersion atmosphérique et donc impliquer une sur-correction (Chavez, 1988). Il est également délicat de l'appliquer pour traiter des images sans objet-foncé. Pour cette raison, Chavez a amélioré la méthode DOS en 1988 et l'a étendue aux images de Landsat TM en considérant le modèle relatif de la dispersion atmosphérique par Curcio (1961) et Slater (1983), dans lesquels la dispersion est divisée en cinq catégories correspondant à différentes conditions atmosphériques (tableau 2-2). Les facteurs de multiplication dérivés de ses travaux pour présager des valeurs de brume, pour les données de TM et de MSS, sont également présentés dans le tableau 2-2.

Dans le tableau 2-2, la bande 1 est choisie pour calculer la première valeur de brume. Quand elle est très claire, par exemple, la valeur de brume pour la bande 1 dérivée de la technique de soustraction d'objet foncé ajustée avec l'offset est 37,42. Les valeurs de brume pour les bandes 2, 3, 4, 5 et 7 sont respectivement 21,1(37,42×0,563), 10,9 (37,42×0,292), 4,4 (37,42×0,117), 2,8 (37,42×0,075) et 0,1 (37,42×0,002). Chavez (1988) a considéré que ces valeurs prévues semblaient acceptables pour l'enlèvement de brume. Des valeurs équivalentes, correspondant à d'autres conditions climatiques peuvent être obtenues avec la même méthode.

Table 2-2 : Facteurs de multiplication pour prévoir les valeurs de brume pour Landsat TM

TM	Facteurs correspondants à différentes conditions atmosphériques				
	Très clair λ^{-4}	Clair λ^{-2}	Moyen λ^{-1}	Brumeux $\lambda^{-0.7}$	Très brumeux $\lambda^{-0.5}$
B1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
B2	0.563	0.750	0.866	0.905	0.930
B3	0.292	0.540	0.735	0.807	0.857
B4	0.117	0.342	0.584	0.687	0.765
B5	0.075	0.086	0.294	0.424	0.542
B7	0.002	0.048	0.219	0.345	0.468

Note: λ représente la longueur d'onde. Tableau simplifié d'après Chavez, 1988.

Cette méthode de DOS améliorée prend seulement en compte l'effet de la dispersion additive et ne corrige pas l'effet multiplicatif de transmission. En raison de cette imperfection, Chavez a

développé, en 1996, un modèle COST intégralement basé sur l'image. Les procédures de correction de ce modèle sont présentées ci-dessous :

(1) Conversion de comptes numérique (DCs) à radiance de à-satellite par l'enlèvement du gain et de l'offset, induits par le système d'imagerie. L'équation pour effectuer cette conversion est la suivante :

$$L_{sat} = (DCs - Offset)/Gain \quad (II-1)$$

Où L_{sat} est la radiance spectrale de à-satellite de la bande donnée ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) ; DC le compte numérique du pixel donné dans cette bande. Le Gain et l'Offset sont le gain et l'offset pour une bande spectrale donnée, généralement inclus dans les données (dataset) de l'image.

(2) Conversion de radiance de à-satellite en réflectance (réflexion) de surface par correction de l'effet solaire et atmosphérique obtenue avec l'équation suivante (Moran *et al.*, 1992) :

$$R_s = \frac{\pi (L_{sat} - L_{haze})}{T_v [E_o T_z \cos \theta + E_{down}]} \quad (II-2)$$

Où:

R_s — réflectance (réflexion) spectrale de la surface de la Terre ;

L_{haze} — radiance spectrale atmosphérique d'*upwelling* (*remontées d'eau*) dispersé dans la direction de et à l'entrée de la pupille du capteur et dans la gamme visuelle du capteur ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), i.e., la radiance du parcours ;

T_v — transmittance atmosphérique le long du parcours entre la surface du sol et le capteur ;

E_o — irradiance spectrale solaire sur une surface perpendiculaire aux rayons du soleil hors de l'atmosphère ($Wm^{-2} \mu m^{-1}$). E_o intègre la distance Terre-soleil, en unité astronomique (AU, qui dépend du moment de l'année et varie de 0,983 à 1,017) ;

θ — angle solaire au zénith (angle incident du rayon solaire sur la surface du sol) ;

T_z — transmittance atmosphérique le long du parcours du soleil à la surface du sol ;

E_{down} — irradiance spectrale de *downwelling* à la surface due à la dispersion du rayon solaire dans l'atmosphère ($Wm^{-2} \mu m^{-1}$).

(3) Détermination des transmittances et autres paramètres

Dans le modèle ci-dessus (II-2), les critères T_z et T_v dépendent, respectivement, de l'épaisseur optique de l'atmosphère, de l'angle solaire au zénith et de l'angle de vue du capteur, c'est-à-dire :

$$T_z = e^{-\tau \sec \theta} \quad (\text{II-3})$$

et

$$T_v = e^{-\tau \sec \varphi} \quad (\text{II-4})$$

où, $\sec$ — le sécant, τ — représente l'épaisseur optique mesurée *in-situ* pour une longueur d'onde donnée, θ — l'angle solaire au zénith— ; et φ — l'angle de vue (zéro degré pour les systèmes de visionnement de nadir).

Le T_z a été mesuré *in-situ* par Moran *et al.* (1992). Par comparaison avec leurs résultats, Chavez (1996) a établi que la valeur de cosinus de l'angle au zénith, $\cos \theta$, dont la moyenne est de 0,80, est très proche de la transmittance atmosphérique le long du parcours du soleil à la surface du sol (T_z), dont la moyenne est d'environ 0,81. Donc, la valeur de $\cos \theta$ est une bonne *approximation* de T_z .

Dans l'équation II-2, E_{down} est dérivé de la mesure *in-situ* de l'atmosphère ou calculé à partir d'une simulation de l'atmosphère, mais il peut être négligé du fait que l' E_{down} est beaucoup moins important que le premier terme dans le dénominateur (Moran *et al.* 1992). Ainsi, l' E_{down} est égal à zéro.

L_{haze} peut être obtenu par la mesure *in-situ* ou par la méthode améliorée de DOS.

Pour système d'imagerie de Landsat, φ est égal à zéro pour le visionnement de nadir, donc $T_v = 1,0$.

E_o (irradiance solaire spectrale au plus haut de l'atmosphère) pour chaque bande de TM et d'ETM+ peut être consulté dans le tableau A1-2 et tableau A1-3 en Appendice I.

Par conséquent, le modèle général de radiance-à-réfectance démontré dans l'équation II-2 peut être simplifié en suivant l'équation II-5 :

$$R_s = \frac{\pi (L_{sat} - L_{haze})}{E_o \cos^2 \theta} \quad (\text{II-5})$$

Chavez l'a intitulée modèle de COST.

En comparant les résultats du modèle de COST aux résultats du modèle de HBC, qui emploie la mesure d'épaisseur atmosphérique *in-situ* (Herman et Browning, 1965), ou bien ceux du modèle 5S qui simule des paramètres de l'atmosphère (Tanré *et al.*, 1990) ou encore à ceux du modèle de DOS (Vincent, 1972 ; Chavez, 1975 et 1988), Chavez précisait que ce modèle de COST a produit des résultats de correction aussi précis que les modèles ayant utilisé les mesures atmosphériques de terrain ou le logiciel de transfert radiatif (RTC). Comme nous pouvons le voir, ce modèle est intégralement basé sur l'image et pourrait être largement utilisé. Cependant, quand il est appliqué au système

d'imagerie d'*off-nadir* tel que l'AVHRR et le SPOT, la correction de visionnement d'*off-nadir* est nécessaire.

Modèle de Lillesand et Kiefer

Lillesand et Kiefer (1994, 2000) ont proposé un modèle de correction de l'effet atmosphérique intégrant l'altitude du soleil, la distance de la Terre au soleil, il est présenté dans l'équation suivante :

$$L_{sat} = R_s ET / \pi + L_p \quad (II-6)$$

$$R_s = \frac{\pi(L_{sat} - L_p)}{ET} \quad (II-7)$$

où R_s — réflectance d'objet ; L_{sat} — radiance spectrale totale mesurée par le capteur ; L_p — radiance de parcours ; T — transmission de l'atmosphère ; et E — irradiance sur l'objet, qui peut être exprimé comme :

$$E = \frac{E_0 \cos \theta}{d^2} \quad (II-8)$$

où E_0 — irradiance solaire avec une distance Terre-soleil moyenne ; θ — angle au zénith; et d — distance Terre-soleil en unité astronomique. Ainsi, l'équation II-7 peut être modifiée ainsi :

$$R_s = \frac{\pi (L_{sat} - L_p) d^2}{E_0 T \cos \theta} \quad (II-9)$$

Selon Lillesand et Kiefer, L_p radiance de parcours représente l'effet de brume produit par la dispersion. Il est similaire à L_{haze} en équation II-5. Les équations II-9 et II-5 peuvent donc, dans une certaine limite, être équivalentes.

Méthode de comparaison relative

Caselles (1989) a proposé une approche plus intéressante pour mettre en application la correction atmosphérique, dans laquelle il suppose que la réflectance de certaines cibles sur Terre reste inchangée dans le temps. Puis les objets ayant une réflectance différente, par exemple, retenue d'eau, bitume (route) et plage de sable, de l'une des images multi-temporelles, sont choisis comme référence standard pour corriger la réflectance de ces objets dans l'image d'un autre jour. Quand les paramètres atmosphériques ou les RTC sont indisponibles, c'est un algorithme utilisable pour enlever l'effet atmosphérique.

RECTIFICATION GEOMETRIQUE

Les images de télédétection subissent une déformation plus ou moins importante, celle-ci est due à la courbure de la Terre, au mouvement de la plate-forme au moment de la détection ainsi qu'à d'autres facteurs. L'objectif de cette procédure de rectification est de corriger cette déformation dans les images multi-temporelles et de les enregistrer sous la même référence géographique (même datum et projection) grâce à des points de contrôle de terrain (GCPs), des cartes topographiques ou des coordonnées GPS. De cette façon, les images de dates différentes seront comparables.

Pour obtenir un bon résultat de détection de changement, une petite erreur de RMS (Root Mean Square) au cours de la rectification image-par-image est recommandée, par exemple, $<1/4-1/2$ pixel (Lillesand *et al.*, 1979, 1994, 2000), $<1/2$ pixel (Sabins, 1978 ; Lunetta, 1999) ou <1 pixel (Lambin, communication personnelle, 2000).

Les modèles utilisés pour la correction géométrique sont habituellement le polynôme, l'orthorectification, la triangulation, etc., qui disposent tous de trois choix pour leur méthode de re-échantillonnage appelés respectivement la convolution cubique, celle de plus grande proximité, ou la bilinéaire (Guide d'utilisation de ER Mapper 6.0).

TRANSFORMATION MULTISPECTRALE

La transformation d'image est, en fait, une conversion de l'information spectrale par certains calculs, ou algorithmes mathématiques, visant à mettre en évidence l'information d'utilisation du sol concerné (par exemple, la végétation, le sol nu), en opérant à une réduction des impacts atmosphériques et des volumes de données (Kauth *et al.*, 1976 ; Lillesand *et al.*, 1979 et 1994 ; Crist *et al.*, 1984b, 1986a ; Richards, 1984 et 1986). Les transformations fréquemment utilisées sont ainsi énumérées :

Indices de végétation

Il y a plusieurs manipulations multispectrales pour appréhender et mettre en œuvre les informations de couverture de végétation, par exemple :

Indice de végétation en ratio = (NIR/R) (Jordan, 1969 ; Knipling, 1970) ;

NDVI (Normalized Difference of Vegetation Index) = $(NIR-R)/(NIR+R)$ (Rouse *et al.*, 1974 ; Tucker 1979) ;

TVI (Transformed vegetation index) = $(NDVI + 0,5)^{1/2}$ (Deering *et al.*, 1975) ; and

PVI (Perpendicular vegetation index) = $a1(NIR) - a2(R) + \text{constante}$ (Richardson *et al.*, 1977) ;
etc.

Ces index ont été suggérés sur la base de la spécificité des données de Landsat MSS dont NIR correspond à MSS7 — la bande proche-infrarouge et R à la bande rouge, MSS5. Ils sont également applicables pour Landsat TM et SPOT HRV (ER Mapper User Guider, 2000 ; Mathieu *et al.*, 1998) et pour d'autres données satellitaires. Ces indices ont été développés pour le renforcement de différence spectrale sur la base du fort pouvoir d'absorption de la végétation dans la partie rouge et du fort pouvoir de réflexion dans la partie proche-infrarouge du spectre. Ils sont corrélés, de manière significative, avec la biomasse verte de sorte qu'ils puissent être employés pour l'évaluation de la productivité de la forêt, du pâturage ou du rendement agricole (Deering *et al.*, 1975 ; Tucker *et al.*, 1975, 1979 et 1991 ; Girard *et al.* 1999 ; FAO, 2000). De plus, Tucker *et al.* (1991) ont rapporté que le NDVI est bien associé aux précipitations annuelles et l'ont employé pour surveiller l'expansion et la contraction du Sahara.

Ces index de végétation peuvent non seulement augmenter les différences entre les sols et la végétation mais également éliminer, dans le temps et l'espace, une variété de facteurs comme le gain et l'offset et supprimer des variations de radiance liées à l'angle, à l'aspect topographique et à l'ombre des nuages (Holben *et al.*, 1981 ; Schowengerdt, 1983 ; Lillesand *et al.*, 1994). Cependant, ils sont également affectés par l'effet atmosphérique et l'angle de vue du capteur (Kaufman, 1986).

Plus récemment, Huete (1988) a développé un index de végétation ajusté sur le sol (SAVI), dont l'équation mathématique est la suivante :

$$SAVI = (1+L) \frac{NIR - R}{NIR + R + L} \quad (II-10)$$

où, NIR et R sont les valeurs de réflectance des bandes proche-infrarouge et rouges et L un coefficient d'adaptation s'étendant de 0 à 1. Pour une végétation de faible densité, $L = 1$, pour une densité de végétation intermédiaire, $L = 0,5$ et pour une densité de végétation plus élevée, $L = 0,25$. Huete (1988) affirme que, quel que soit le coefficient d'adaptation compris entre 0.25 et 1, les influences de sol sont considérablement réduites par rapport au NDVI et au PVI. Cependant, en ce qui concerne une faible densité de végétation, la réflectance du sol augmente dans les bandes rouge et infrarouge. Pour cerner au mieux ce système de sol-végétation et réduire l'effet du sol nu au minimum, un index de végétation ajusté modifié pour le sol (MSAVI) a été développé par Qi *et al.* (1994). Sa formule est la suivante :

$$MSAVI = (NIR + 0.5) - [0.25 (2NIR + 1)^2 - 2 (NIR - R)]^{1/2} \quad (II-11)$$

Du fait que le NDVI est considérablement influencé par la dispersion et l'absorption atmosphérique (Kaufman *et al.*, 1988), Kaufman et Tanré (1992 et 1996) ont développé un index de végétation résistant à l'atmosphère (ARVI). Comparé au NDVI, la résistance à l'effet atmosphérique de l'ARVI est réalisée par un processus d'autocorrection sur la bande rouge. La différence entre les

bandes rouge et bleue réduit au minimum les effets de la dispersion atmosphérique par des aérosols dans la bande rouge. Comme l'ont précisé ces auteurs, l'ARVI a la même gamme dynamique que le NDVI mais est quatre fois moins sensible aux effets atmosphériques que le NDVI. Cet index est calculé comme suit :

$$ARVI = \frac{\{NIR - [Rouge - \gamma(Bleu - Rouge)]\}}{\{NIR + [Rouge - \gamma(Bleu - Rouge)]\}} \quad (II-12)$$

où γ est un facteur atmosphérique d'autocorrection dépendant des types d'aérosol. Kaufman et Tanré (1992) ont suggéré que ce γ soit placé à 1 puisqu'il permet un meilleur ajustement pour la plupart des applications quand les données atmosphériques sont inconnues. De cette façon, la formule présentée ci-dessus peut être simplifiée comme suit :

$$ARVI = \frac{[NIR - (2Rouge - Bleu)]}{[NIR + (2Rouge - Bleu)]} \quad (II-13)$$

ARVI a été conçu pour le capteur MODIS mais il peut également être utilisé pour les données d'autres capteurs, tels que TM, etc.

Analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP a été la première fois présenté par Pearson en 1901 et indépendamment développée par Hotelling en 1933 (Huang *et al.*, 2001), pour une transformation linéaire de l'espace multidimensionnel, par exemple des données multispectrales. L'objectif de cette transformation est de comprimer le volume de données sans déformation significative ou perte d'information. Le processus de l'ACP est également appelé la réduction de dimensionnalité. En ce qui concerne les images multibandes de la télédétection, les informations de couverture du sol contenues dans les différentes bandes sont corrélées de manière interdépendante (Lillesand *et al.*, 1979, 1994 ; Chen, 1984 ; Richards, 1987 ; Chou *et al.*, 1995 ; Girard *et al.*, 1998 ; Richards, 1984 ; Richards, 1986 ; Richards et Jia, 1999 ; Huang *et al.*, 2001). On peut appliquer l'ACP pour éliminer ou réduire une telle redondance.

Pour la région de Ningxia Nord en la Chine, par exemple, la bande 1 (x) et la bande 2 (y) ou la bande 2 et la bande 3 des images Landsat ETM+ en date du 12 août 1999, ont une corrélation positive significative (figure II-4). Si les axes x et y prennent une nouvelle position, x' et y' , il est évident que le groupe de distribution se montrera non-corrélé dans le nouveau système bi-dimensionnel. Une telle rotation est appelée : transformation orthogonale linéaire, c'est l'ACP. Les projections dans le

nouveau système (coordonnées) sont considérées comme deux eigenvaleurs de la matrice de covariance de l'image originelle.

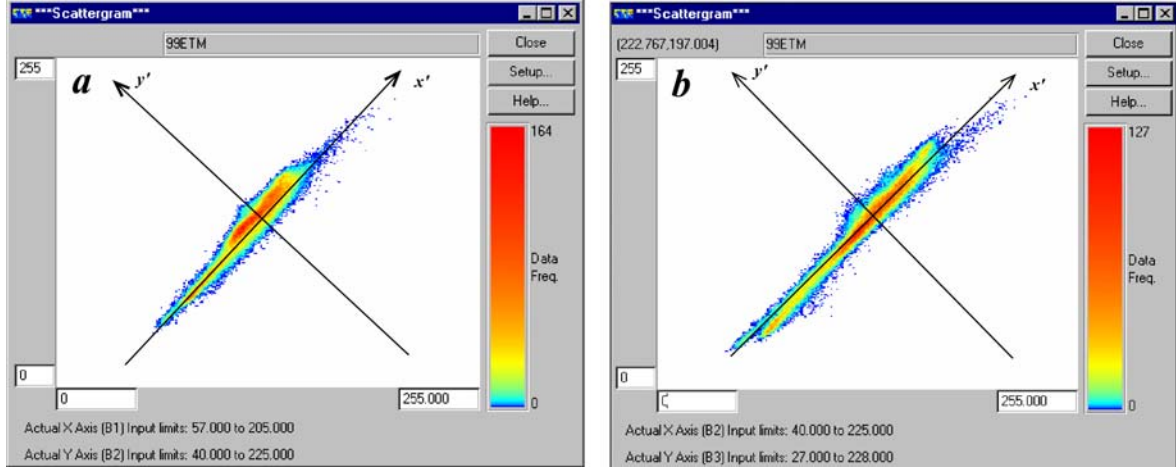


Figure II-4 : Corrélation forte d'interbande dans les images de Landsat TM et ETM +
 En prenant les images du 12 août, 1999 de Landsat ETM du Ningxia Nord comme exemple.
 (Coefficients de corrélation entre B1 et B2 : $R = 0,992$ et entre B2 et B3 : $0,991$)

La clef de ce processus de transformation est de déterminer l'angle de rotation — α , en général, la matrice de transformation. Si α est connu, les nouveaux composants peuvent être exprimés ainsi :

$$\begin{pmatrix} y' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ x \end{pmatrix} \quad (\text{II-14})$$

Généralement, l'ACP de multibande est calculé de la façon suivante (Chen, 1984 ; Richards, 1984, 1986, Richards et Jia, 1999) :

$$y = Gx$$

Où:

x — Vecteur de comptes numériques (CN) des images originelles en p bandes ;

y — Vecteur de CN de q composants après la transformation ; et

G — Matrice de transformation linéaire, composée des eigenvecteurs transposés de la matrice de covariance des images originelles multibandes.

Pour les données de MSS ($p = 4$), les trois premiers composants principaux (y_1, y_2, y_3 , ici $q = 3$) prennent la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} y^1 \\ y^2 \\ y^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^1 \\ x^2 \\ x^3 \\ x^4 \end{pmatrix} \quad (\text{II-15})$$

Les propriétés de l'ACP sont principalement les suivantes : (a) la somme de la variance reste la même après transformation ; (b) le premier composant recueille 80-95% de toute les informations avec peu de bruit ; (c) tous les composants sont verticaux de l'un à l'autre ; et (d) l'ensemble de données originelles est en grande partie compressé ou réduit. Eastman (2001) a estimé que l'ACP est également une alternative pour l'enlèvement de brume et de bruit.

Crist *et al.* (1984a, 1984b) ont noté que l'analyse des composants principaux rencontre des obstacles non négligeables dans l'interprétation physique des caractéristiques dérivées, en particulier entre les dates ou les lieux. Cependant, ceci n'altère pas son potentiel pour la classification et la détection des changements d'occupation du sol.

Les utilisations réussies de Richards (1984), Fung *et al.* (1987), Lambin *et al.* (1994) et Collins *et al.* (1996) en sont de bons exemples.

Transformation de chapeau à cône (tasseled cap)

Kauth et Thomas (1976) ont développé une importante technique de traitement orthogonal linéaire la transformation de chapeau à cône, basée sur une observation de la trajectoire de culture dans la dimension de Landsat MSS. Comme dans la figure II-5, les bandes 4 et 5 constituent un plan des sols. Ils ont noté que, comme les cultures se développent sur n'importe quel type de sol, leurs trajectoires se prolongent en suivant la direction de la bande 6 (NIR) et convergent nettement au moment de la maturité, ce qui implique la fermeture totale du couvert végétal. Pendant qu'elles continuent vers le jaunissement (la sénescence -senescing), ces trajectoires divergent puis reviennent à leur situation originelle de sol après la moisson. Cette trajectoire croissante-sénescence des récoltes forme un chapeau à cône (tasseled cap). En se basant sur cette observation, Kauth et Thomas ont développé une transformation linéaire orthogonale pour distinguer les récoltes et déterminer leur étape de croissance. C'est la dénommée *transformation de chapeau à cône*, dans laquelle les axes orthogonaux majeurs sont respectivement appelés la Brillance (B, Brightness) se situant au niveau du sol, la Verdeur (G, Greenness) verticale à ce plan, utilisée pour mesurer la biomasse verte, et le Jaune (Y, Yellowness) perpendiculaire au plan B-G, employé comme indicateur de maturation de récolte. Enfin, un quatrième axe, sélectionné pour décrire l'information non-relative au B, G et Y, est appelé Non-Such ("autre"). Selon Malila *et al.* (1980), le Jaune et le Non-Such indiquent des changements dans la condition de la brume atmosphérique et peuvent donc être utiles pour le calibrage relatif des images avec des différences atmosphériques. Semblable à l'ACP, cette transformation peut être calculée ainsi :

$$Y = TX$$

Où Y est une matrice composée des vecteurs de CN transformés, X une matrice de vecteurs de CN originels de MSS et T la matrice de transformation produite par une procédure d'orthogonalisation Gram-Schmidt. Ses composants sont listés dans le tableau 2-3.

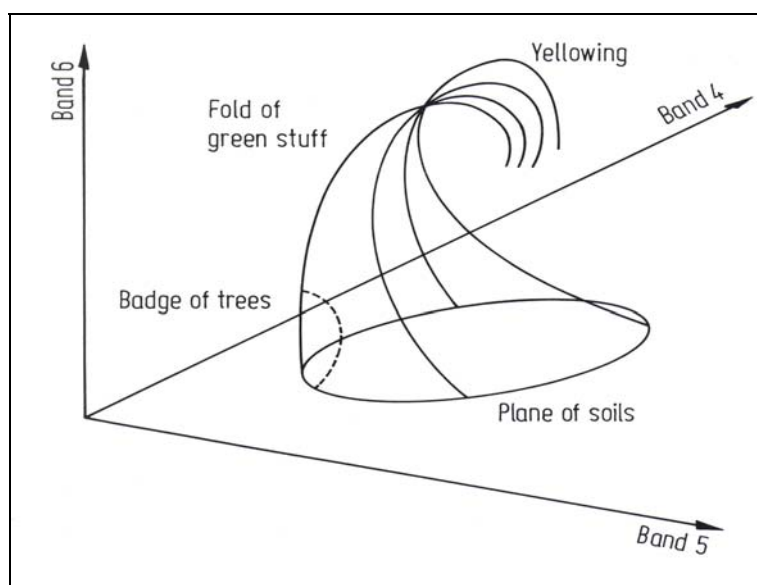


Figure II-5 : Trajectoire de récoltes dans l'espace de Landsat MSS, selon la forme de chapeau à cône (D'après Kauth et Thomas, 1976)

Tableau 2-3 : Matrice de transformation de chapeau à cône pour Landsat MSS

Composantes TC	MSS4	MSS5	MSS6	MSS7
Luminosité	0.433	0.632	0.586	0.264
Verdeur	-0.290	-0.562	0.600	0.491
Jaunissement	-0.829	0.522	-0.039	0.194
Non-such	0.223	0.012	-0.543	0.810

(D'après Kauth et Thomas, 1976)

Ainsi, la Brillance est la somme comparée des quatre bandes originelles de MSS, par exemple $B = 0,433MSS4 + 0,632MSS5 + 0,586MSS6 + 0,264MSS7$. Le G (vert) et le Y (jaune) peuvent être obtenus de la même façon.

Le lancement réussi de Landsat-4 en juillet 1982, a rendu les images du TM disponibles. Crist *et al.* (1984a, 1984b et 1986a) ont étendu la transformation de Kauth-Thomas à l'espace de TM. Par comparaison avec les données de MSS, les images de TM contiennent trois bandes supplémentaires dans des régions bleues et infrarouges (les bandes 1, 5 et 7) et enregistrent plus d'information sur l'occupation du sol. En analysant les données estimées et les données de TM réelles ainsi que diverses rotations spatiales, Crist et Cicone (1984a, b et 1986a) ont obtenu la Brillance (B), la Verdeur (G), l'Humidité (W), et trois autres composantes de moindre importance. La Brillance, une somme de six bandes, est une mesure de réflectance globale. La Verdeur est un contraste entre la réflectance proche-infrarouge et la réflectance visible et est donc une mesure de la présence et de la densité de végétation verte. Ces deux composantes sont comparables à leurs équivalents de MSS. Cependant, la troisième composante, appelé Humidité, contient une nouvelle information liée au contenu d'eau du sol, à la densité de végétation et à d'autres caractéristiques de classification du lieu. Il s'agit, en effet, d'un contraste entre la réflectance du moyen-infrarouge et celle du proche infrarouge-visible. Certaines classes importantes de lieux et de développement spectral de récoltes, dans l'espace du chapeau à cône pour TM, sont présentées dans la figure II-6 et la figure II-7.

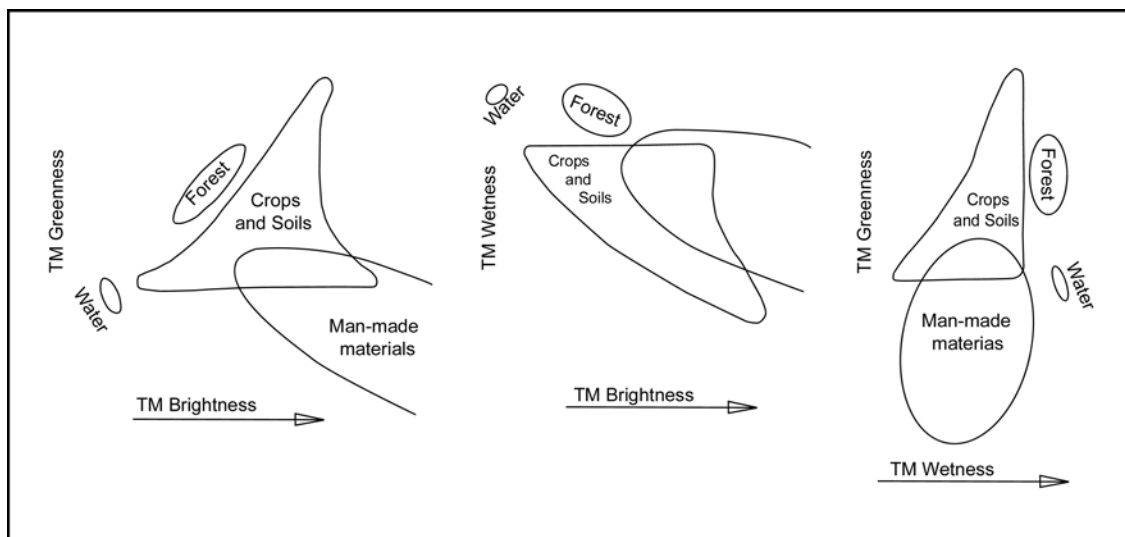


Figure II-6 : Localisations approchées des classes de lieux importants, dans l'espace de chapeau à cône
(D'après Crist *et al.*, 1984b and 1986a)

Comme lors de la transformation pour les données de MSS, la quatrième composante est ici principalement constituée par la bande 1 et probablement associée à la dispersion atmosphérique. Cette composante a, plus tard, été appelée *Brume* (Crist *et al.*, 1986). Ses impacts sur les trois composantes principales sont une augmentation de la brillance et de l'humidité du sol et une diminution de la verdure. Ainsi l'évaluation de l'effet atmosphérique peut également être faite à partir des composantes de chapeau à cône.

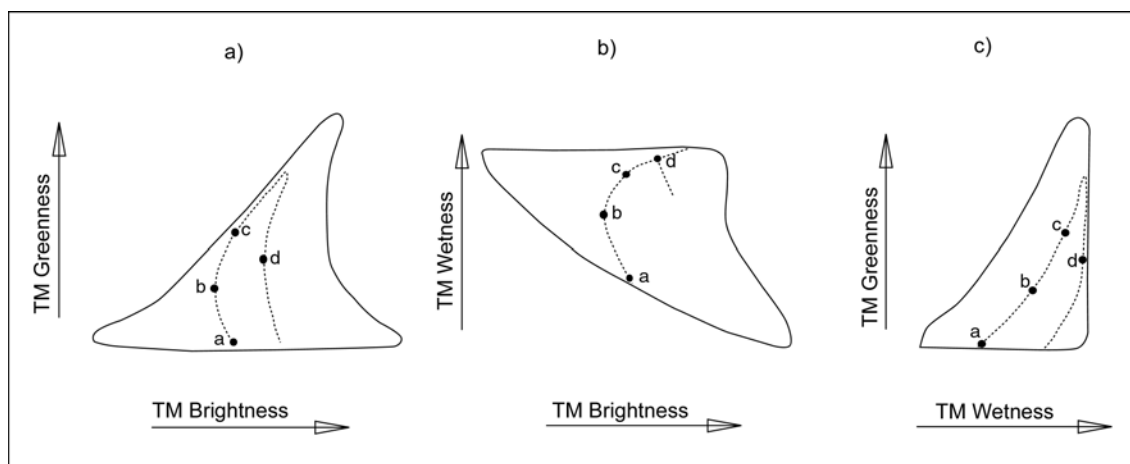


Figure II-7 : Développement spectral de cultures dans l'espace de chapeau à cône

a : émergence, b : verdissement, c : couvert végétal total et d : sénescence

(D'après Crist *et al.*, 1984b et 1986a)

La matrice de transformation de chapeau à cône pour TM est décrite dans le tableau 2-4.

Tableau 2-4 : Coefficients de transformation de chapeau à cône de TM

Composantes	Coefficients					
	Bande1	Bande2	Bande3	Bande4	Bande5	Bande7
Luminosité	0.3037	0.2793	0.4743	0.5585	0.5082	0.1863
Verdeur	-0.2848	-0.2435	-0.5436	0.7243	0.0840	-0.1800
Humidité	0.1509	0.1973	0.3279	0.3406	-0.7112	-0.4572
Brume	0.8832	-0.0819	-0.4580	-0.0032	-0.0563	0.0130
Cinquième	0.0573	-0.260	0.0335	-0.1943	0.4766	-0.8545
Sixth	0.1238	-0.9038	0.4041	0.0573	-0.0261	-0.0240

(D'après Crist *et al.*, 1984b et 1986a)

Selon la conclusion de Crist *et al.* (1984b et 1986a), la transformation de chapeau à cône de TM, en mettant l'accent sur les structures de données inhérentes, est une méthode efficace pour réorienter des données de TM telles que les informations sur la végétation et le sol et leur permettre d'être facilement extraites, identifiées et comprises. On estime donc que c'est une transformation invariable, qui peut être appliquée à n'importe quelle scène de TM. Elle ne représente aucun changement des données de base, mais simplement un changement de perspective de vision, une rotation présentant les données de TM d'une façon plus accessible. En concentrant la majorité de la variabilité de données sous la forme de trois composantes (95% ou plus de toutes les données), la transformation devient une fonction de réduction du volume de données.

L'application du concept de chapeau à cône à un nouveau, ou à différents capteurs, exige une redéfinition de la transformation (Crist *et al.*, 1986b). Cependant, Crist *et al.* (1986b) disaient encore qu'avec des sensibilités spectrales semblables, la base physique de la transformation tendait à donner des structures et des composantes de données semblables. Cela signifie que la matrice de transformation des données de Landsat TM peut être appliquée aux données d'ETM+ puisqu'ils ont les mêmes sensibilités spectrales, pour la plupart des bandes de mêmes régions spectrales et de même résolution de l'espace (excepté les bandes thermique et panchromatique).

Malila (1980), Collins *et al.* (1996), Cohen *et al.* (1999) et Wu *et al.* (2002a) ont appliqué avec succès cette transformation à la détection de changement d'occupation des sols.

DISTINCTION DES CHANGEMENTS

La détection de changement est le processus qui consiste à identifier des différences dans l'état d'un objet ou d'un phénomène en l'observant à différentes dates (Singh, 1989). C'est donc une procédure essentielle pour le suivi de l'environnement. Les types de changements qui pourraient être intéressants vont des phénomènes à court terme, tels que la couverture neigeuse ou les inondations, jusqu'aux phénomènes à long terme, tels que le développement de la frange urbaine ou la désertification. Dans le meilleur des cas, les procédures de détection de changement ne devraient intégrer que des données acquises par un même capteur (ou un capteur similaire) et être enregistrées en utilisant la même résolution spatiale, le même angle de vue, les mêmes bandes spectrales et le même horaire. Des dates anniversaires sont souvent employées pour minimiser l'influence de l'angle solaire et de la différence saisonnière (Lillesand *et al.*, 1994). Depuis les années 70, un certain nombre d'algorithmes ont été développés et employés pour la détection des changements, incluant la *détection de changement de delta*, le *differencing d'image*, la *comparaison de post-classification*, le *ratioing*, et l'*analyse de vecteur de changement*, etc. (Weismiller *et al.*, 1977 ; Lillesand *et al.*, 1979, 1994 ; Jensen *et al.*, 1982 ; Nelson, 1983 ; Schowengerdt, 1983 ; Lindgren, 1985 ; Singh, 1989 ; Collins *et al.* 1996 ; Lunetta, 1999 et Yuan *et al.*, 1999).

Détection de changement de delta

Cette technique, suggérée à l'origine par Anuta (1973), se base sur la classification d'un ensemble de données (dataset) composé de données multispectrales obtenues à dates différentes. Une soustraction (delta) combine deux groupes de données (datasets) de n-canaux obtenus à dates différentes et produit un nouvel ensemble de données (dataset) multispectrales de delta ayant n-canaux. La transformation se présente sous la forme d'une équation II-16 (Weismiller *et al.*, 1977) :

$$\delta X_{ij}^k = X_{ij}^k(t_2) - X_{ij}^k(t_1) + b_k \quad (\text{II-16})$$

où X_{ij}^k est la valeur multispectrale du canal k ; i, j représentent respectivement la ligne et la colonne et sont égaux à 1, 2, ... N sur la base d'une image de $N \times N$; b_k est un offset ajouté au canal k , de sorte que les données du résultat soient non-négatives ; t_2 et t_1 sont les deux dates d'acquisition des images.

Cette méthode n'exige qu'une soustraction simple suivie d'une classification de changement multispectral au lieu de souligner des changements de classification multispectrale.

Comme Weismiller *et al.* (1977) l'ont souligné, cette méthode est peut être trop simple pour traiter avec précision tous les facteurs impliqués dans la détection du changement de lieu. Beaucoup d'informations peuvent être négligées lors de la soustraction. L'image créée par les données de delta peut être tout à fait utile mais le changement d'image est limité à une l'évaluation qualitative.

Le point le plus important de cette méthode tient au fait qu'elle intègre le concept de "soustraction" (*differencing*).

Differencing d'image

Probablement dérivée de la technique de détection de delta, la technique dite de différenciation ou de differencing d'image a été présentée pour la première fois par Rifman (1975) pour la détection de changement puis couramment utilisée, par la suite, pour la discrimination de changement d'utilisation du sol, par Sabins (1978), Toll *et al.* (1980), Ingram *et al.* (1981), Jensen *et al.* (1982), Nelson (1983), Lindgren (1985), Quarmby (1989), Singh (1989), Lillesand *et al.* (1994, 2000). C'est une approche commune employée pour la détection de changement, qui implique une soustraction des images d'une date à celles d'une autre, pixel par pixel. Les valeurs de pixel de soustraction (DCs) peuvent s'étendre de -255 à + 255. Les résultats sont normalement transformés en valeur positive par l'adjonction d'une constante, C . L'opération s'exprime mathématiquement comme suit (Jensen *et al.*, 1982 ; Nelson, 1983) :

$$\Delta X_{ijk} = X(t_1)_{ijk} - X(t_2)_{ijk} + C \quad (\text{II-17})$$

où

i — numéro de ligne,

j — numéro de colonne,

k — numéro de bande,

ΔX — valeur de pixel après la soustraction

$X(t_1)$ — valeur de pixel à temps 1

$X(t_2)$ — valeur de pixel à temps 2

C — constante, par exemple 255

Les recherches effectuées par Toll *et al.* (1980) et Ingram *et al.* (1981) prouvent que la méthode du differencing d'image occasionne moins d'erreurs de détection de changement que les autres approches.

L'élément délicat de cette méthode est le choix des *seuils* entre pixels de changement et pixels de non-changement, comme cela fut démontré dans l'histogramme (Jensen *et al.*, 1982). L'analyste peut déterminer les seuils en utilisant les données statistiques de l'image soustraite ou sa propre connaissance empirique. Mais quelle que soit la procédure, le choix des seuils nécessite de nombreux essais. L'exemple suivant se base sur les données statistiques.

Habituellement, les données statistiques de l'image soustraite sont disponibles après avoir exécuté la fonction d'histogramme ou la fonction de statistique dans le système de traitement d'image comme PCI, ER Mapper, ENVI, etc. Ainsi la valeur moyenne (M), écart type (variance, σ) sont connus pour l'image soustraite. Donc, les seuils potentiels pour les changements positifs (T_p) ou négatifs (T_n) peuvent être décrits comme suit :

$$T_p = M + v\sigma, \text{ and } T_n = M - u\sigma$$

où v et u sont les coefficients à déterminer par le test. Ils seront probablement 1,5, 1,625, 1,75, 1,875, 2,0, 2,125, 2,25, 2,375, 2,50, 2,625, 2,75, 2,875, 3,0 ... Cela signifie que les seuils potentiels seront fixés par la confrontation, dans l'histogramme, des valeurs de la moyenne (M) aux deux extrêmes (-255 et +255) en ajoutant ou en ôtant chaque fois un $\frac{1}{4}\sigma$ ou un $\frac{1}{8}\sigma$ ch. Une comparaison entre les deux composantes colorées de différentes dates est simultanément appliquée pour vérifier la pertinence des valeurs-test. Cette procédure ne sera considérée terminée qu'à l'apparition d'un changement positif ou négatif précis. La figure II-8 décrit simplement la procédure d'établissements des seuils.

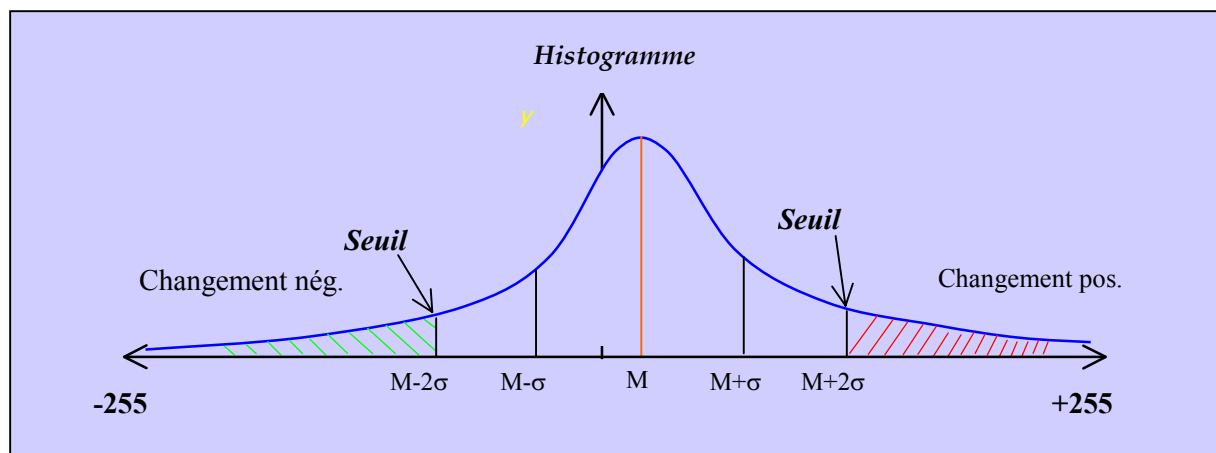


Figure II-8 : Etablissement des seuils pour déterminer les changements

La détermination de seuils précis peut demander beaucoup de temps mais produit des résultats idéaux de détection de changement parce que ces seuils peuvent mettre en avant précisément le point où le changement est intervenu, en particulier dans le cadre de la détection de changement local.

Cet algorithme de détection de changement peut être appliqué aux images multitemporelles (Riftman, 1975 ; Toll *et al.*, 1980 ; Jensen *et al.*, 1982 ; Nelson, 1983 and Quarmby *et al.*, 1989) mais aussi aux indicateurs de transformation multispectrale (par exemple, NDVI, Verdeur) (Nelson, 1983 ; Cohen *et al.*, 1999 ; Mertens *et al.*, 2000 ; Wu *et al.*, 2002a). Nelson (1983) trouve que le differencing sur le NDVI produit de meilleurs résultats que celui directement appliqué sur la bande-à-bande.

Ratioing d'images

Le ratioing (l'établissement d'un ratio) d'images multitemporelles (Todd, 1977 ; Howarth *et al.*, 1981 ; Nelson, 1983 ; Lindgren, 1985 ; Singh, 1989 ; et Lillesand *et al.*, 1994) concerne le calcul du ratio des données de deux dates. Les valeurs de radiance ou les CN d'un ensemble de données (dataset) sont divisées, pixel par pixel, par celles du second groupe de données (dataset). Cette technique peut également être présentée sous la forme d'une équation :

$$R = \frac{X_{ijk}(t_2)}{X_{ijk}(t_1)} \quad (\text{II-18})$$

où R représente la valeur du pixel après (détermination du ratio) ratioing, l'autre paramètre étant identique à celui présenté ci-dessus. Les rapports pour des secteurs sans changement auront une valeur tendant vers 1 et pour des secteurs de changement auront des valeurs de ratio plus élevées ou plus basses (Howarth *et al.* 1981 ; Lillesand *et al.*, 1994). Un des avantages de la technique de ratioing est qu'elle tente de compenser la différence de l'angle solaire, de l'intensité de rayonnement solaire et de l'ombre (Lindgren, 1985). Comme le differencing d'image, la ratioing d'image exige également de déterminer un seuil pour différencier les pixels de changement de ceux de non-changement.

Analyse de vecteur de changement

Le vecteur décrivant la direction et l'importance de changement entre la première et la deuxième date est le *vecteur spectral de changement* (Engvall *et al.*, 1977 ; Malila *et al.*, 1980 ; Colwell *et al.*, 1981 ; Singh, 1989 ; Lambin *et al.*, 1994). La direction du vecteur contient des informations sur le type du changement (par exemple coupe de bois ou repousse (regroth). C'est, en fait, une extension conceptuelle du differencing d'image, dans laquelle un seuil concernant la grandeur est établi comme base pour déterminer les secteurs de changement (Lillesand et Kierfer, 1994). Malila *et al.* (1980) ont appliqué pour la première fois une transformation de chapeau à cône sur les données de Landsat MSS acquises à deux dates différentes pour obtenir les indices de Brillance et de Verdeur. Ils ont ensuite

groupé les pixels dans l'espace de G-B (vert-bleu) selon la direction et l'importance de la signature de changement, et ont finalement analysé le changement de forêt en se basant sur la direction des vecteurs (figure II-9). Cohen *et al.* (1999) ont utilisé cette méthode pour détecter le changement de forêt de conifères en se basant sur une transformation de Kauth-Thomas à partir des données de Landsat TM et obtenu le même résultat que Collins *et al.* (1996) qui affirmaient que la composante Humidité est la plus importante pour différencier les classes de forêts de conifères.

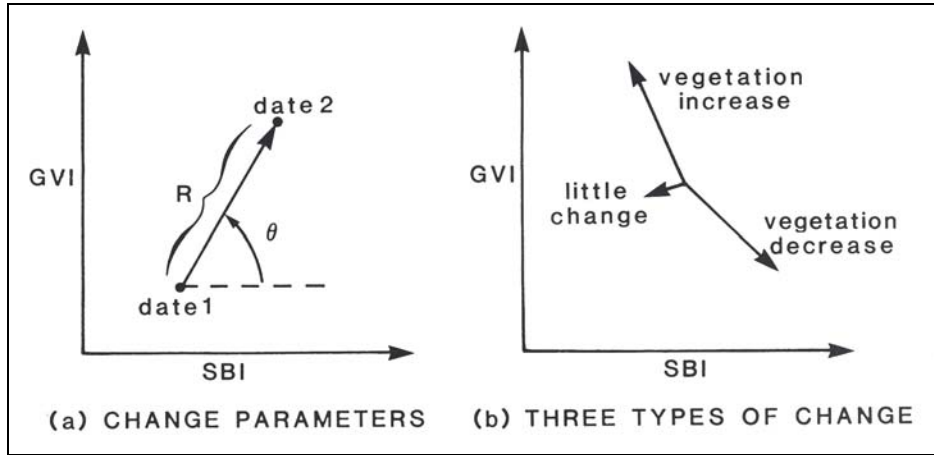


Figure II-9 : Analyse de vecteur de changement

(D'après Schowengerdt, 1983)

Lambin *et al.* (1994) ont étendu le vecteur de changement spectral à l'espace multitemporel et ont mis en application une détection de changement par l'observation en série chronologique d'un indicateur d'occupation du sol (par exemple, NDVI) mesuré pour les différentes années. La trajectoire de temps du vecteur d'indicateur contient l'information détaillée et permet de distinguer les changements brusques et subtils d'occupation du sol.

Régression d'images

La technique de régression d'images (Ingram *et al.*, 1981, Jensen, 1983 et Singh, 1989) suppose une relation linéaire entre les pixels de temps 1 et de temps 2. Il est donc possible de calculer les valeurs de pixels de temps 2, *prévues*, à partir de celles de temps 1 par l'analyse de régression. En utilisant $\hat{Y}_{ij}^k(t_2)$ pour exprimer les valeurs de pixels prévues dans la ligne i et la colonne j de la bande k , alors l'image de différence peut être définie de la façon suivante :

$$\delta Y_{ij}^k = \hat{Y}_{ij}^k(t_2) - Y_{ij}^k(t_1) \quad (\text{II-19})$$

A nouveau, une procédure d'établissement de seuil (thresholding) est nécessaire pour déterminer les pixels de changement. Singh (1989) affirmait que cette technique produisait des résultats exacts pour la détection de changement.

Comparaison de post-classification

La comparaison de post-classification (Swain, 1976 ; Weismiller *et al.*, 1977 ; Gordon, 1980; Howarth *et al.* 1981 ; Schowengerdt, 1983 ; Singh, 1989 ; Skole *et al.*, 1993 ; Lillesand *et al.*, 1994) est un autre algorithme fréquemment utilisé pour la détection de changement, basé sur la comparaison des images obtenues à deux dates différentes et indépendamment classifiées. C'est la méthode de détection de changement la plus évidente (Singh, 1989). Weismiller *et al.* (1977) affirment que les zones de changement principales étaient identifiées de manière fiable par cette méthode de travail. Cependant, l'exactitude d'une telle procédure dépend de la précision de chaque classification indépendante (Lillesand *et al.*, 1994, 2000) et il est de temps en temps difficile de produire des classifications comparables d'une date à l'autre (Toll *et al.*, 1980). D'ailleurs, cette approche peut générer un grand nombre d'indications de changement erronées (Singh, 1989) et ne permet pas de discriminer les changements subtils dans une même classe d'occupation du sol (Lambin *et al.*, 1994).

Avec le développement des techniques informatiques et des logiciels de traitement d'image, les algorithmes de classification et leur précision se sont largement améliorés. La méthode de la comparaison de post-classification a encore un fort potentiel. Skole *et al.* (1993) ont appliqué cette approche avec succès à l'étude de la déforestation en Amazone. Dans certains cas, la classification basée sur les transformations multispectrales telles que l'ACP, le NDVI et la Verdeur et Brillance de la transformation de Kauth-Thomas, pourraient produire des résultats plus fiables. Richards (1984, 1986) a utilisé la classification basée sur l'ACP pour la détection des feux de broussailles en Nouvelles Galles du Sud (Australie) et Tucker *et al.* (1984, 1986 et 1991) procédaient à une classification du NDVI pour surveiller l'évolution de l'environnement aride en Afrique du Nord.

Analyse de données multitudes

Appelée *classification de changement temporel* à ses débuts (Weismiller *et al.*, 1977) et plus récemment intitulée *analyse de composition* (Lunetta, 1999), cette approche est basée sur une simple classification de groupes de données (dataset) multitudes en utilisant la technique de reconnaissance de modes pour identifier les modifications d'occupation du sol. En employant les données (datasets) collectées dans des conditions similaires, presque le même jour mais d'années différentes, on peut découvrir que les classes où se produisent des changements pourraient avoir des données statistiques significativement différentes par rapport aux classes où ne se produisent aucun changement (Weismiller *et al.*, 1977).

Au lieu de classer directement les données multidates, Richards (1984) leur applique d'abord une transformation de type ACP puis classe les composants dérivés pour distinguer les feux de broussailles. Il en a conclu que la classification sur les composantes 3 et 4 produisait le meilleur résultat.

Les techniques mentionnées ci-dessus sont les plus employées, en particulier celles de la différenciation (differencing), de l'analyse de vecteur de changement et de la comparaison de post-classification. L'utilisation de la transformation multispectrale décrite précédemment peut largement révéler et amplifier les informations d'occupation du sol telles que de celle de la végétation et de la phénologie, un algorithme de combinaison de differencing et de détermination de seuil (seuillage ou thresholding) basé sur la transformation de chapeau à cône serait souhaitable pour le suivi de l'environnement aride.

II. UTILISATION DES SIG

1. CONCEPTION

Les SIG ont été définis comme étant “un système informatisé conçu pour saisir, stocker, manœuvrer et produire des données géographiquement référencées” (CCRS, 2002) ou “un ensemble de matériel informatique, de logiciel, de données, d'hommes, d'organisation, de montages institutionnels destinés à rassembler, stocker, analyser et diffuser l'information concernant les différents secteurs de la terre ” (Dueker *et al.*, 1989). Les SIG sont en fait “une vue simplifiée du monde réel” (Bernhardsen, 1999) et “un système de soutien de la décision spatiale” (Cowen, 1988).

La conception des SIG a été premièrement mise en œuvre par Dr Roger Tomlinson et son équipe en 1962, afin d'établir un système d'information géographique du Canada (CGIS), le premier SIG du monde (Yan *et al.*, 1998 ; Geoplace, 2002). Dans les années 1970, une tentative d'application d'un tel système a été entreprise aux Etats-Unis. Depuis 1980, grâce au développement des techniques informatiques, les SIG ont évolué et ont été utilisés dans de nombreux domaines de recherches, tels que la cartographie, la gestion de territoire, la surveillance d'occupation des sols et l'analyse du changement de l'environnement (pollution, catastrophes naturelles, etc.), les analyses géologiques, agricoles et démographiques. Ainsi que Longley *et al.* (1999) l'ont précisé à propos des SIG, un nouveau domaine de l'innovation et de l'application technologique change très rapidement.

2. FONCTIONS

Les SIG nous permettent d'établir les liens complexes entre ou, plutôt, de relier dans l'espace de multiples types d'informations issues de sources variées, comme la géographie, la géologie, la géomorphologie, la pédologie, la phytogéographie, la météorologie, l'analyse d'utilisation du sol, etc. Les informations sont organisées en couches de données qui peuvent être superposées, mises en interaction ou isolées (figure II-10). Les données peuvent être organisées en raster (cellule de grille) ou en vecteur (polygone, polyligne et point). Les images digitalisées issues de la télédétection et les données scannées, par exemple, la carte du sol, la carte hydrologique, apparaissent habituellement sous forme de raster.

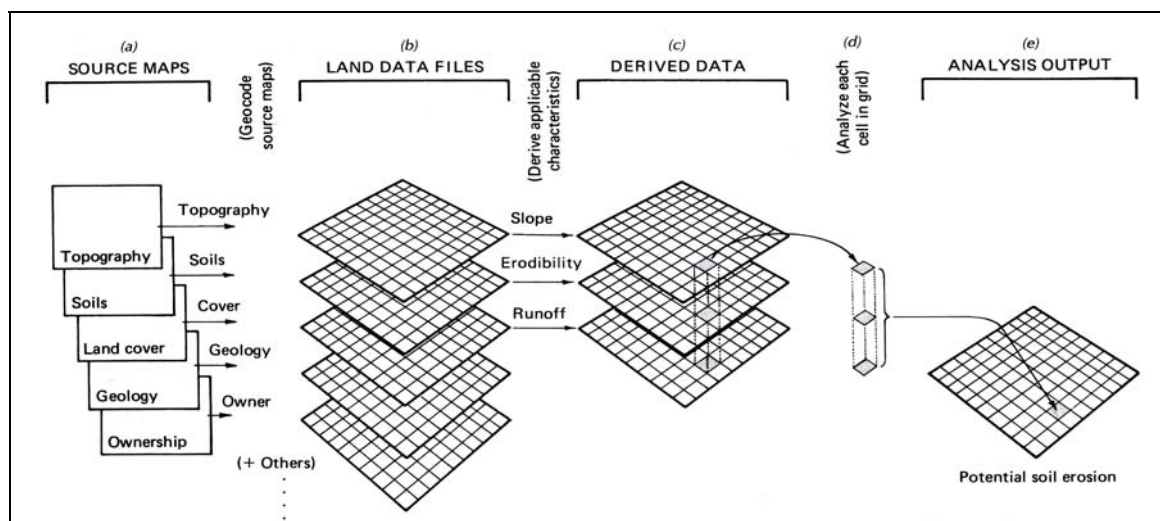


Figure II-10 : Un exemple de SIG et des procédures d'analyse

(D'après Lillesand and Kiefer, 1994, 2000)

Le feed-back (retour d'information) de l'analyse peut être présentée sous forme de diagrammes, de tableaux et de statistiques synthétisant les données. C'est l'autre principe fondamental des SIG. Concrètement, les applications des SIG peuvent être les suivantes :

STOCKAGE ET GESTION DES DONNEES

Un stockage et une gestion efficaces sont les fonctions premières des SIG. L'échelle des SIG peut s'étendre d'un niveau local, régional jusqu'à un niveau global et leurs contextes de gestion varient de l'environnement à la sociologie et de l'administration civile à l'économie. Ainsi que nous l'avons démontré plus haut, n'importe quel type de sources de données pertinentes telles que les cartes géologiques et géographiques, l'information d'utilisation du sol, les images spatiales, les données démographiques, socio-économiques, etc., peuvent être intégrées dans les SIG pour le stockage, la gestion ou d'autres analyses.

SUIVI ET DETECTION DE CHANGEMENT

Il est possible de surveiller le changement environnemental et d'entreprendre une détection simple de changement par la vectorisation puisque des données spatiales dynamiques multitemporelles et leur information de changement peuvent être intégrées et mises à jour dans le système d'information géographique. Avec des SIG, il est facile de localiser et distinguer n'importe quel changement spatial.

ANALYSE SPATIALE

L'analyse spatiale se compose de deux genres d'analyse : l'analyse de base et l'analyse avancée. L'analyse de base inclut la logique, l'arithmétique, les opérations statistiques, la classification, la création de zones d'amortisseur (*buffer*) pour les caractéristiques des intracouches et l'analyse en superposition (*overlay*) pour les caractéristiques des intercouches, ce qui nous permet de manipuler, de calculer les dispositifs spatiaux pertinents dans ou entre les couches thématiques. La zone-tampon définissant la proximité spatiale est créée grâce à la fonction de création d'amortisseur (*buffer*) autour du dispositif intéressé. L'analyse de couches en superposition peut être exécutée pour des données de vecteur et de raster (cellule de grille).

L'analyse avancée ou modélisation spatiale, vise à résoudre des problèmes d'ordre spatial, par exemple déterminer géologiquement les endroits d'éboulement potentiel ou les sections d'érosion de sol ou le choix du meilleur emplacement pour une nouvelle école ou une usine. Exécuter la modélisation spatiale sur un sujet intéressant en s'appuyant sur une base de données disponible est l'une des fonctionnalités les plus utiles des SIG. Ainsi que McCoy *et al.* (2001) l'ont représentée, la modélisation peut être traitée en cinq étapes :

Etape 1 : énoncé du problème et objectif ;

Etape 2 : décomposition du problème (identification des éléments et de leurs interactions, établissement des paramètres et création de l'ensemble de données nécessaires pour développer les modèles de représentation) ;

Etape 3 : exploration de l'ensemble des données à intégrer (prise en compte du rapport spatial et d'attribut des objets individuels dans le paysage ainsi que leurs rapports réciproques) ;

Etape 4 : analyse (identification des outils à employer pour établir le modèle global tel que le buffering, l'inclinaison et l'estimation (la pesée, le soupesage -weighting) ;

Etape 5 : vérification du résultat de la modélisation (confirmation du résultat de la modélisation sur le terrain pour voir s'il est raisonnable et acceptable, sinon, retour à l'étape 4 en changeant les paramètres) ; et

Etape 6 : mise en œuvre des résultats.

Ainsi pour déterminer, d'un point de vue géologique, qu'une zone présente un risque potentiel d'éboulement (étape 1), l'analyse des éléments ou des paramètres tels que les types de pente, de sol et

de roche, la densité de rupture, les précipitations, l'activité humaine, liés au phénomène ainsi que leurs interactions doit impérativement être effectuée (étape 2). Puis il s'agira d'explorer et de créer les ensembles de données nécessaires pour la quantification des paramètres. Habituellement, un modèle de MNT dont les données de pente et d'aspect peuvent être déduites, des cartes géologiques et lithologiques détaillées, la carte de sol, les capacités de résistance, la densité de fissure, les immersions et les angles d'immersion des ruptures principales, les données de précipitations, de présence ou d'absence de faille active ou du volcan actif, etc., sont nécessaires (étape 3). Il s'agit d'utiliser les outils nécessaires pour concevoir un modèle dans lequel tous les paramètres soit combinés ensemble. C'est en intégrant l'importance de chacun dans le phénomène potentiel d'éboulement et en évaluant les rôles potentiels de tous les éléments, que la modélisation sera réalisée (étape 4). Si la vérification de terrain confirme le bien fondé du résultat de modélisation (étape 5) on peut passer à l'étape 6 pour l'exécution du résultat ou retourner à l'étape 4, en changeant les paramètres de modélisation, une nouvelle fois. Ce processus peut être répété jusqu'à l'obtention d'un résultat satisfaisant. Un bon résultat pourra être utilisé pour prévenir des risques ou tout autre usage. Par conséquent, l'analyse spatiale des SIG peut nous aider dans la prise de décision.

3. APPLICATION DES SIG A LA RECHERCHE ENVIRONNEMENTALE

Sur la base des fonctions présentées ci-dessus, les SIG ont été largement appliqués aux aspects suivants de la recherche pour l'environnement :

- Gestion, suivi et planification de l'environnement (Lindgren, 1985, De Sède *et al.*, 1992 ; Didon *et al.*, 1992 ; Meuret *et al.*, 1992 ; Nicoullaud *et al.*, 1992, Duguay *et al.*, 1996 ; French *et al.*, 1996 ; Negahban *et al.*, 1996 ; Bibby *et al.*, 1999 ; Larsen, 1999) ;
- Cartographie (Vidal *et al.*, 1992) ;
- Analyse et modélisation spatiales (Baize *et al.*, 1992 ; Gaury, 1992 ; Legros *et al.*, 1992 ; Gessler *et al.*, 1996 ; Mackey *et al.*, 1996 ; Maidment, 1996 ; Mitsova *et al.*, 1996 ; Aspinall *et al.*, 1996 ; Aspinall, 1999 ; Verburg, *et al.*, 2000 ; Serneels *et al.*, 2001) ;
- Evaluation d'écoulement (King *et al.*, 1992 ; Battaglin *et al.*, 1996 ; Vieux *et al.*, 1996),
- Evaluation du risque naturel (Brimicombe *et al.*, 1996 ; Emmi *et al.*, 1996 ; Wu *et al.*, 2003a).

Cependant, une grande partie de l'utilité des SIG réside dans leur efficacité pour la gestion et la mise en œuvre des données spatiales (Aspinall, 1999). La réflexion spatiale a pris peu de place dans la

recherche écologique qui s'est plutôt orientée vers la compréhension des processus que vers l'analyse de mode (Getis, 1999 ; et Openshaw *et al.*, 1999). L'utilisation d'une analyse statistique spatiale avancée, intégrant d'une manière synthétique divers genres d'information spatiale, et permettant de traiter de nombreuses données spatiales à l'échelle régionale voire globale, pourrait être fort utile. Il est probable que le manque d'ensemble d'outils (*package*) de modélisation plus performants pouvant être intégrés dans les GIS, implique que ce potentiel reste encore beaucoup à développer. Quelques efforts ont été faits, par exemple, Anselin (1992) a développé le logiciel SpaceStat pour l'analyse de données spatiale qui a été lié avec l'ArcView (<http://www.rri.wvu.edu/utilities.htm>) (Anselin, 1999). Mais l'analyse spatiale liée aux SIG reste toujours à améliorer en particulier pour traiter les très nombreuses et hétérogènes données spatiales. Un exposé plus détaillé en ce qui concerne l'analyse statistique spatiale basée sur les SIG sera présenté dans la section suivante.

L'objectif final de l'application des SIG est de participer à la prise de décision des dirigeants, en s'appuyant sur une analyse synthétique. Par conséquent en intégrant la télédétection et les données géographiques, les SIG constituent un outil puissant pour surveiller et modéliser l'environnement aride.

III. ANALYSE DE L'INTERACTION HOMME-ENVIRONNEMENT

1. INTRODUCTION

Tout au long de leur histoire, les activités humaines comme les cultures agricoles, l'urbanisation et le déboisement, ont été contraintes, dans une certaine mesure, par les conditions naturelles et ont simultanément provoqué la modification, voire la dégradation de l'environnement. Pour évaluer le potentiel de développement des ressources naturelles telles que le sol ou prévoir la tendance de changement environnemental, on doit connaître la trajectoire de changement passé, comprendre les forces d'entraînement d'un tel changement et estimer la future évolution probable. Par conséquent, l'analyse de l'interaction entre l'homme et la nature a été de plus en plus considérée, lors des dernières décennies, comme essentielle dans la recherche de l'environnement. Cependant, le changement environnemental est un processus complexe provoqué par des facteurs humains et naturels. Il n'est guère possible d'effectuer une simulation parfaite pour modéliser le processus de changement. La modélisation est donc bien une tentative pour appréhender approximativement le mécanisme de changement environnemental et estimer son évolution future.

La modélisation de changement environnemental remonte au début des années 1970. Les approches fréquemment utilisées sont la *chaîne de Markov*, le *modèle de la fonction logistique*, le *modèle de régression*, le *modèle statistique spatial*, le *modèle de simulation spatiale dynamique*, etc. Selon l'analyse de Lambin (1994), tous ces modèles peuvent être principalement classés en trois types selon leur capacité à répondre aux trois questions pertinentes : *pourquoi*, *quand* et *où* la modification environnementale, telle que le déboisement, se produira-t-elle ? Les différents modèles servent pour les différentes questions et sont essentiellement complémentaires. Le *modèle de régression* peut indiquer les causes ou les forces d'entraînement et répondre à la question *pourquoi*. La *chaîne de Markov* et les *modèles de la fonction logistique* indiquent la probabilité et le taux de changement temporel et répondent à la question *quand*. Le *modèle statistique spatial* étudie la probabilité de changement dans l'espace en répondant la question *où*. Les modèles plus complexes tel que les *modèles de simulation spatiale dynamique* cherchent des réponses pour l'ensemble de ces questions.

Les objectifs de la modélisation sont d'améliorer notre compréhension des forces régissant le changement environnemental, de décrire quantitativement le rapport homme-environnement et de prévoir l'évolution temporelle, en particulier pour le futur.

2. APPROCHES POUR LA MODELISATION

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, plusieurs approches pour la modélisation environnementale sont réellement utilisables.

La *chaîne de Markov*, qui décrit stochastiquement les processus passant par étapes, d'un état à l'autre, a été à l'origine étudiée par A. A. Markov en 1906 (Dynkin, 1960). Elle a été appliquée à la géographie par Brown (1970) et Collins *et al.* (1974), au changement d'utilisation du sol par Burham (1973), Bell (1974), Bell *et al.* (1977), Robinson (1978), et Brown *et al.* (2000), et au déboisement par Miller (1978) et Nualchawee *et al.* (1981). Wang *et al.* (1980 et 1992) ont appliqué cette théorie à la naissance et au processus de la mort en démographie. Son avantage réside dans sa simplicité mathématique et opérationnelle (Lambin, 1994). Pour étudier les changements de l'occupation du sol, le mécanisme central de la chaîne de Markov est une probabilité, p_{ij} , qui se réfère à la probabilité de transition ou de mouvement de l'état i à l'état j dans un intervalle de temps connu, représentée par la fraction ou le pourcentage de l'occupation du sol de différents types. Le processus de Markov, en ce qui concerne le modèle de paysage distinct, peut s'exprimer comme suit (Lambin, 1994) :

$$\mathbf{n}_{t+1} = \mathbf{M} \mathbf{n}_t \quad (\text{II-20})$$

où $\mathbf{n}_t$ est un vecteur de colonne, $\mathbf{n}_t = (n_1, \dots, n_m)$, dont les éléments sont les fractions de secteur du terrain dans chacun des m états au temps t et M est une matrice $m \times m$ dont les éléments, p_{ij} , sont les probabilités de transition pendant l'intervalle de temps t à $t+1$. En cas de difficultés pour comprendre la dynamique de changement et ses autres impacts, un tel modèle probabiliste permet de mieux appréhender le processus de changement.

Le *modèle de la fonction logistique*, dépeignant mathématiquement les courbes en forme de S, a, pour la première fois, été appliqué à la biologie par Verhulst en 1845 pour simuler la stabilisation de la croissance d'une population dans un environnement où les ressources sont limitées. Palo *et al.* (1984, 1987), Esser (1989), Scotti (1990), Grainger (1986, 1990), Reis *et al.* (1990) (voir la revue par Lambin, 1994) l'ont ensuite utilisé pour modéliser les taux de déboisement.

Le *modèle de simulation spatiale dynamique*, est en fait un *modèle de simulation dynamique d'écosystème*, mettant en avant une analyse de l'interaction de tous les composants formant l'écosystème, tels que la condition écologique, l'utilisation du sol, le déboisement, la prise de décision et les activités socio-économiques humaines, et utilisant les outils mathématiques ou statistiques. Sklar *et al.* (1985, 1991), Wilkie *et al.* (1988), Costanza *et al.* (1990), Rotman *et al.* (1991), Southworth *et al.* (1991), Dale *et al.* (1993a, b), etc., ont développé quelques modèles pour évaluer les impacts pour l'écosystème du changement d'occupation du sol, par exemple le déboisement. De tels modèles sont les approches de modélisation les plus avancées pour un problème complexe, dynamique et spatial. Ils permettent de prévoir les changements temporels de l'environnement, de déterminer où le changement interviendra et peuvent probablement être efficacement liés avec des données de télédétection pour le calibrage et la validation de modèles (Lambin, 1994). Cependant la question du *pourquoi* devrait être résolue avant le développement d'un tel modèle.

Récemment, Barbier *et al.* (1990), Howarth *et al.* (1992), Willinger (1997) ont proposé la *modélisation de développement durable*. Une tentative pour prouver l'interaction entre les sciences économiques et l'environnement, en déterminant les critères du développement durable et en utilisant différents modèles mathématiques.

Cependant, les approches les plus fréquemment utilisées dans la modélisation de changement environnemental sont les *modèles de régression* et les *modèles statistiques spatiaux*. Les paragraphes suivants présenteront plus particulièrement ces deux modèles.

MODELISATION DE REGRESSION

L'analyse de régression peut être grossièrement définie comme une analyse des rapports entre des variables. Elle est un des outils statistiques les plus largement répandus, du fait de la simplicité de

sa méthode, pour établir un rapport fonctionnel entre des variables (Chatterjee *et al.*, 1977, 1991) ou évaluer le rapport entre une ou plusieurs variables indépendantes et une variable continue dépendante simple (Kleinbaum *et al.*, 1978, 1998). Sa formule mathématique est la suivante (Chatterjee *et al.*, 1977 et 1991 ; Kleinbaum *et al.*, 1978 et 1998 ; Cohen *et al.*, 1983 ; Lambin, 1994) :

$$\begin{aligned}
 Y &= \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \\
 &= \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \varepsilon
 \end{aligned}
 \tag{II-21}$$

où Y est la variable dépendante, X_i représentent les variables indépendantes, β_0 est une constante et β_i sont les coefficients de régression qui peuvent être acquis, la plupart du temps, par la *méthode de least squares* ou la *méthode de minimum-variance* ; ε est une erreur aléatoire.

Une équation contenant seulement une variable indépendante est appelée *équation de régression simple*, si elle en contient plus d'une, elle est appelée *équation de régression multiple*. Dans le deuxième cas, l'équation ne représente pas une ligne droite mais une surface, ou plutôt, une *surface de régression* (Kleinbaum *et al.*, 1998). Les variables indépendantes à droite ne devraient pas être fortement corrélées. Selon Kleinbaum *et al.* (1978 et 1998), le modèle de régression linéaire peut être appliqué dans les cas suivants :

- Pour caractériser le rapport entre les variables dépendantes et indépendantes en déterminant l'ampleur, la direction et la force de la corrélation.
- Pour fournir une formule ou une équation quantitative décrivant la variable dépendante en fonction des variables indépendantes.
- Pour déterminer quelles sont les variables indépendantes importantes et quelles sont celles qui ne le sont pas pour description ou la prévision d'une variable dépendante.
- Pour trouver le meilleur modèle mathématique décrivant le rapport entre une variable dépendante et une ou plusieurs variables indépendantes.
- Pour évaluer les effets interactifs de deux ou plus de deux variables indépendantes par rapport à une variable dépendante.

Les changements environnementaux sont des processus spatio-temporellement complexes qui sont liés aux facteurs naturels (changement de climat, occurrence des catastrophes naturelles) et aux activités humaines (changement d'utilisation du sol, exploitation des ressources naturelles). En considérant le changement environnemental comme une variable dépendante et les facteurs humains et

naturels comme deux groupes de variables indépendantes, les modèles de régression pourraient distinguer quel paramètre(s) parmi les deux groupes est (sont) le(s) plus important(s) pour la modification environnementale en établissant leur rapport grâce à l'équation. En mettant à profit cet avantage, Allen *et al.* (1985), Grainger (1986), Palo *et al.* (1987), Rudel (1989), Kummer (1991), Lambin (1994), Brown *et al.* (2000), Wu *et al.* (2002a), etc., ont appliqué de tels modèles à l'identification des causes de la déforestation et des forces socio-économiques entraînant les changements d'occupation du sol.

La modélisation de régression peut être calibrée de deux manières différentes : soit par l'*analyse transversale*, c'est-à-dire, à un instant précis et à travers un grand nombre de lieux ; soit par l'*analyse de panel*, c'est-à-dire, en reliant une variable de changement pendant un intervalle de temps donné avec les changements de variables indépendantes, pendant le même laps de temps, à travers un grand nombre de localités (Lambin 1994).

L'analyse transversale lie transversalement l'élément(s) environnemental avec les facteurs socio-économiques à un temps donné. Si l'on prend la figure II-11 comme exemple, l'équation du rapport homme-environnement aux temps t_1 et t_2 peut être posée ainsi :

$$A_{t_1} : E_{1j} = \beta_{10} + \sum_{i=1}^n \beta_{1i} S_{1i} + \varepsilon_1 \quad (\text{II-22})$$

$$A_{t_2} : E_{2j} = \beta_{20} + \sum_{i=1}^n \beta_{2i} S_{2i} + \varepsilon_2 \quad (\text{II-23})$$

où E_{1j} et E_{2j} sont les éléments environnementaux, β_{10} et β_{20} les constantes ou plutôt les interceptions, β_{1i} et β_{2i} les coefficients de régression, S_{1i} et S_{2i} les paramètres socio-économiques ou déterminants spatiaux, ε_1 et ε_2 les erreurs. On peut ainsi déduire les modèles indiquant le rapport dynamique entre la composante environnementale et ses déterminants spatiaux et socio-économiques aux instants t_1 et t_2 .

Un autre rapport peut être étudié à partir de la figure II-11, l'autocorrélation spatiale, qui décrit le rapport entre les éléments environnement eux-mêmes. Nous détaillerons cela dans la prochaine section.

L'analyse de panel décrit le rapport entre le changement environnemental et les changements des éléments socio-économiques humains. Dans le cas présenté par la figure II-11, ce rapport peut prendre les formes suivantes :

$$\Delta E_j = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \Delta S_i + \varepsilon \quad (\text{II-24})$$

où ΔE_j représente le changement de l'élément environnemental j durant l'intervalle de temps Δt , et ΔS_i représentent le changement des paramètres socio-économique pendant le même laps de temps.

L'analyse de panel résout le problème des forces d'entraînement ou des causes des changements environnementaux et établit leurs équations de rapport.

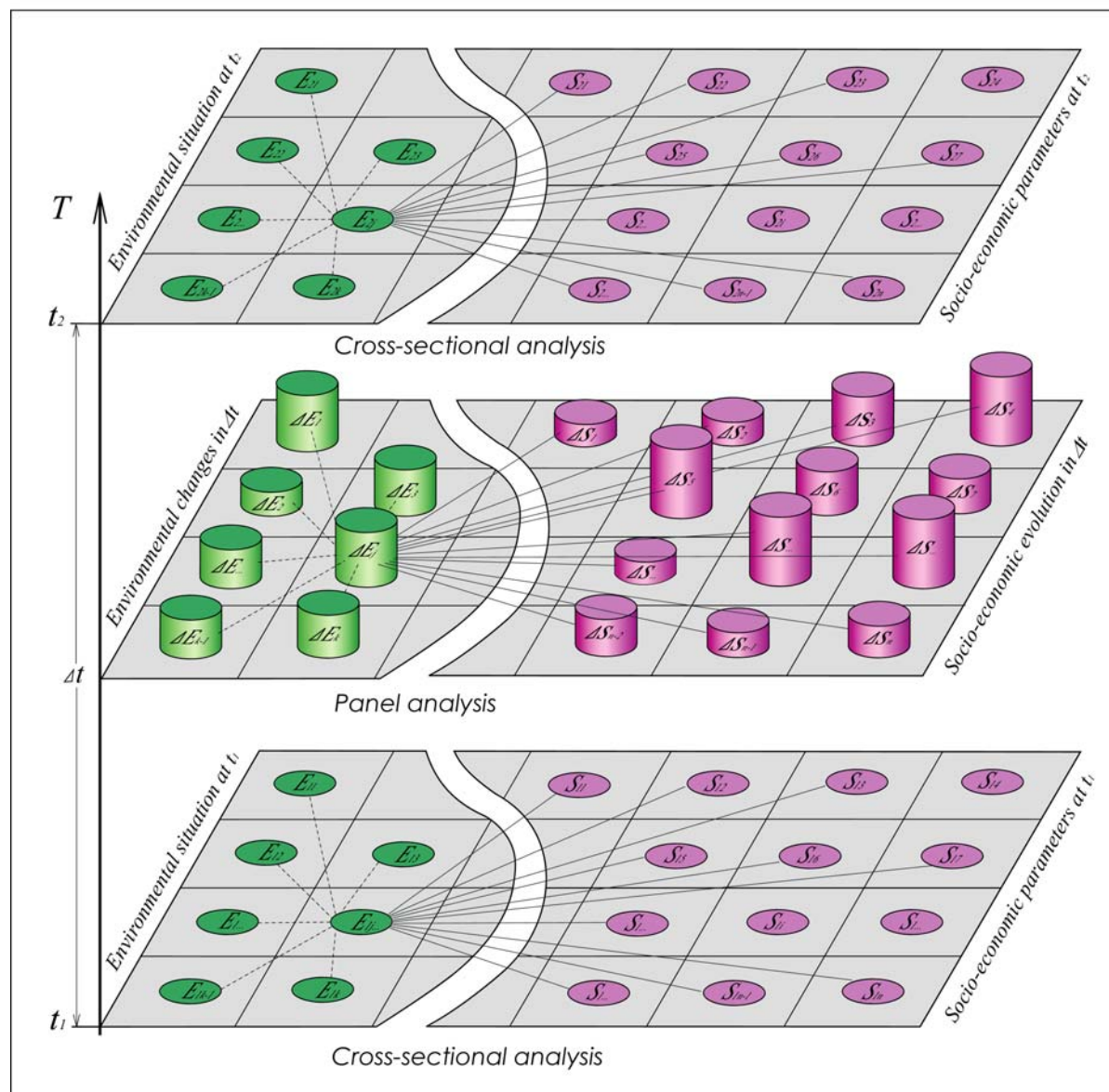


Figure II-11 : Analyses de l'interaction homme-environnement, par les modèles de régression

Les modèles de régression peuvent répondre à la question *pourquoi* en nous permettant d'identifier les variables les plus importantes, associées aux changements environnementaux, voire même sans doute aider à prévoir *quand* le changement aura lieu, dans le cas où le mécanisme produisant les changements resterait inchangé (Lambin, 1994). L'utilisation réussie de tels modèles pour comprendre les déterminantes spatiales et les forces d'entraînement du déboisement et des

changements de l'utilisation du sol par Allen *et al.* (1985), Grainger (1986), Palo *et al.* (1987), Rudel (1989), Southgate *et al.* (1991), Kummer (1991), Lambin (1994), Veldkamp *et al.* (2002), Wu *et al.* (2002a, 2003b) etc., démontre leur potentiel pour la recherche concernant l'environnement aride. Cependant, les modélisations de régression ne sont pas de l'analyse spatiale et ne peuvent donc pas être utilisées pour répondre à la question où.

MODELISATION STATISTIQUE SPATIALE

L'analyse spatiale est un ensemble de méthodes et de techniques pour analyser des *événements* à une variété d'échelles spatiales ; ses résultats dépendent de l'organisation spatiale des événements (Goodchild *et al.* 1992 ; Fischer 1999). Les événements peuvent être représentés par des points, des lignes, des objets de surface ou des primitifs spatiaux, situés dans l'espace géographique et possédant une série d'autres attributs. La localisation, la topologie, l'organisation spatiale, la distance, et l'interaction spatiale deviennent le centre d'intérêt de l'analyse de données spatiales (Fischer, 1999).

Deux autres types d'information sont pratiquement intégrés à l'analyse spatiale : les informations de *localisation* (géométrie/topologique) concernant les objets spatiaux et les informations d'*attribut* sur les objets spatiaux pertinents telles que les caractéristiques socio-économiques et physiques (désignées par l'expression attribut primaire) et le rapport entre les objets spatiaux (attribut secondaire).

Anselin (1989) a analysé la spécificité de l'information géographique selon deux aspects essentiels. Le premier est exprimé dans la célèbre loi de Tobler *Première loi de la Géographie* : toutes les choses sont connexes mais celles qui sont proches sont plus connectées que celles qui sont éloignées (Tobler, 1970 et 1979). Une telle propriété est appelée *dépendance* ou *autocorrélation spatiale*. Ainsi, la dépendance spatiale implique que les données pour les unités spatiales particulières soient connexes et semblables aux données pour d'autres unités spatiales voisines. En d'autres termes, l'autocorrélation spatiale se produit quand il y a un rapport entre les observations d'une ou plusieurs variables à un point précis dans l'espace et à un autre point dans l'espace (Getis, 1999). La seconde est l'*hétérogénéité spatiale*, présentant la propension des données géographiques à *varier* de telle manière que les conditions à un endroit précis ne seront pas identiques ailleurs. Statistiquement, cette conception correspond à la *non-stationnarité* (Longly *et al.*, 1999). Ces caractères particuliers des données spatiales rendent des méthodes statistiques classiques non-fiables à moins qu'elles n'aient été modifiées pour s'adapter au problème spatial actuel (Fischer, 1999). Ces propriétés d'information spatiale exigent que l'analyse soit traitée en particulier.

Les objectifs de l'analyse spatiale sont la détection des modes des données spatiales, l'exploration et la modélisation du rapport entre de tels modes, la compréhension renforcée des processus qui pourraient être responsables des ces modes, et l'amélioration de la capacité à prévoir et contrôler des événements apparaissant dans l'espace géographique. C'est précisément ce centre

d'intérêt de l'analyse spatiale qui distingue l'analyse de données spatiales des autres formes d'analyse de données (Goodchild *et al.* 1992 ; Fischer 1999).

Les développements que l'analyse spatiale a connu, lors des dernières décennies, sont énumérés comme suit :

(1) La modélisation de régression spatiale — une extension du modèle de régression linéaire traditionnelle à l'analyse de données spatiale—, est employée pour mesurer l'autocorrélation spatiale, l'association spatiale et l'hétérogénéité (Cliff *et al.*, 1973, 1981a et 1981b ; Anselin, 1988 ; Griffith, 1988 ; Fischer, 1999 ; Getis 1999). Elle prend la forme suivante :

$$Y = \rho WY + X\beta + \varepsilon \quad (\text{II-25})$$

où la variable dépendante Y est un vecteur de colonne composé de y_i dans lequel tous les $y_i = f(y_i)$ sont en relation les uns avec les autres ; X est un vecteur de colonne de variables indépendantes, β est une matrice de coefficients de régressions. W est la matrice de relation voisine et ρ un paramètre qui reflète la force de dépendance spatiale entre les éléments de la variable dépendante. Après avoir présenté le terme ρWY , les composants du vecteur d'erreur résiduelle ε sont maintenant supposés être le produit des variables indépendantes et montrent une distribution normale standard identique. Ce procédé est désigné sous le nom de *modèle auto-régressif spatial*.

(2) Les statistiques bayésiennes de probabilité utilisées pour l'analyse exploratoire inductive de données spatiale (Aspinall, 1992 ; Aspinall *et al.*, 1996).

(3) La *modélisation de régression logistique* a de plus en plus attiré l'attention de géographes, de biologistes et d'environnementalistes, lors des dernières décennies, du fait de sa capacité d'analyse des causes explicites dans l'espace et de prévision des changements potentiels dans l'écosystème. Avec l'amélioration des capacités analytiques des SIG et des logiciels associés (par exemple, SAS, SYSTAT, SPSS), cette technique de modélisation a été fréquemment employée pour résoudre les problèmes écologiques, par exemple, le déboisement (Nualchawee *et al.*, 1981 ; Sader *et al.*, 1988 ; Ludeke *et al.*, 1990 ; Lambin 1994 ; Mertens *et al.*, 2000), les changements d'utilisation des sols (Serneels *et al.*, 2001 et Verburg *et al.*, 2002).

Le modèle de régression logistique s'étend à la fonction logistique en prenant l'expression mathématique suivante :

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (\text{II-26})$$

où z est une variable indépendante de $-\infty$ à ∞ . Il est clair que quelle que soit z , la valeur d' $f(z)$ est toujours comprise entre 0 et 1. Donc la fonction logistique peut être utilisée comme une *fonction de probabilité*. Prenons z comme indicateur de variables multiples indépendantes $X = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_k)$ sous la forme de :

$$z = \alpha + \sum \beta_i X_i$$

La fonction logistique prend la forme de (Kleinbaum, 1994) :

$$\begin{aligned} P(X) &= P(D = 1 \mid X_1, X_2, X_3, \dots, X_k) \\ &= \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \sum \beta_i X_i)}} \\ &= \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k)}} \\ &= \frac{e^{(\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k)}}{1 + e^{(\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k)}} \end{aligned} \quad (\text{II-27})$$

où $P(X)$ est la probabilité pour l'apparition de l'événement considéré, par exemple, le changement en éléments environnementaux, $X_1, X_2, X_3, \dots$; X_k , les variables indépendantes qui pourraient être *dichotomiques* (0, 1), *discrètes* ou *continues* ; α et β_i ($i = 1, 2, 3, \dots, k$) les coefficients inconnus à estimer ; D l'événement considéré, par exemple, la variable dépendante (0, 1). $D = 1$ démontre que cet événement ou que le changement concerné a lieu.

Ce modèle est employé pour estimer la probabilité de l'apparition d'un événement, dans notre cas, le changement des éléments de l'environnement tels que le déboisement, l'urbanisation, la conversion agricole, etc. Afin de faciliter l'analyse, une *transformation de logit* est habituellement appliquée de cette façon :

$$\begin{aligned} \text{logit } P(X) &= \ln \frac{P(X)}{1 - P(X)} \\ &= \alpha + \sum \beta_i X_i \end{aligned}$$

$$= \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k \quad (\text{II-28})$$

Cette *forme de logit* est une façon alternative d'écrire le modèle de régression logistique. Les coefficients α et β_i ($i = 1, 2, 3, \dots, k$) sont généralement estimés par *l'approche du maximum de vraisemblance* (Kleinbaum, 1994 et Lambin, 1994).

Un autre concept utile dans ce modèle de régression logistique est la *chance, le hasard (odds)*, qu'on peut définir de cette façon (Kleinbaum, 1994) :

$$\begin{aligned} \text{odds} &= \frac{P(X)}{1 - P(X)} \\ &= e^{(\alpha + \sum \beta_i X_i)} \end{aligned} \quad (\text{II-29})$$

Il est utilisé pour décrire le risque pour l'individu X , ou plutôt en ce qui nous concerne, pour le changement en éléments environnementaux. Le *"taux de chance"* (*Odds ratio OR*) est aussi un concept pertinent qui s'exprime ainsi :

$$\begin{aligned} \text{OR} &= \frac{\text{odds for } X_1}{\text{odds for } X_0} \\ &= \frac{e^{(\alpha + \sum \beta_i X_{1i})}}{e^{(\alpha + \sum \beta_i X_{0i})}} \\ &= e^{\sum \beta_i (X_{1i} - X_{0i})} \\ &= \Pi e^{\beta_i (X_{1i} - X_{0i})} \end{aligned} \quad (\text{II-30})$$

où Π représente la multiplicité ; X_{1i} et X_{0i} deux différentes situations de i ème variable indépendante X_i . Etant donnée que les autres variables sont contrôlées, la variable binaire X_i ($X_{1i} = 1$ et $X_{0i} = 0$) peut subir un *ratio d'odds ajusté* ainsi exprimé :

$$\text{OR} = e^{\beta_i}$$

OR est utile pour évaluer le rôle de certaines variables indépendantes dans l'apparition de l'événement prévu et pour l'estimation du risque quand cette variable est présente ou non.

Dans notre cas, en prenant la qualité du sol (1 pour un sol pouvant être mis en culture et 0 pour un sol non-arable, par exemple) si d'autres paramètres indépendants tels que l'accès à la route, le système d'irrigation, de village ou de ville, l'altitude, la pente et les conditions climatiques, etc., sont contrôlés, la conversion d'une certaine surface du sol en terre cultivée dépend de la qualité du sol. La parcelle permettant la mise en culture a une possibilité e^{β_s} fois plus importante que celle de faible qualité (β_s est le coefficient estimé pour la qualité de sol dans le modèle). En nous intéressant au même exemple, si nous considérons la distance à la route comme une variable exposée et contrôlons les autres variables indépendantes, la parcelle située à 0,1 km de la route a $e^{-0.4\beta_{DR}}$ fois plus de chances d'être mise en culture que celle située à 0,5km de la route (β_{DR} est le coefficient estimé pour la distance à route).

Les modèles de régression logistique sont capables d'évaluer la probabilité de changement dans l'espace en indiquant les rôles des éléments de paysage et des déterminants spatiaux pour les processus de changements environnementaux. Ils peuvent donc répondre à la question où. Mertens *et al.* (2000), Serneels *et al.* (2001) et Verburg *et al.* (2002) et d'autres ont appliqué, avec succès, ces modèles pour la modélisation du déboisement et des changements d'utilisation du sol.

IV. RESUME

En s'appuyant sur cette présentation de la télédétection, des SIG, de la surveillance jusqu'à la modélisation, une approche synthétique interdisciplinaire réalisée pour les recherches de cette thèse pourrait être ainsi présentée (figure II-12) :

ACQUISITION DES DONNEES SPATIALES

Les images de SPOT HRV (XS and Panchromatique) datées du 1989, 1995, 1998, 1999 et 2001, ainsi qu'une image de ERS-1 Radar 1993 ont été obtenues pour la région de Nouakchott en Mauritanie ; les images de Landsat TM 1987, 1989 et ETM + 1999 pour le site pilote du Ningxia Nord ; et les images de Landsat TM 1986 et ETM + 2000 pour le Shaanxi Nord.

CORRECTION ATMOSPHERIQUE

Puisqu'on connaît l'influence de l'absorption et de la dispersion atmosphérique sur les signaux perçus par les satellites, une procédure de correction atmosphérique est nécessaire pour en réduire

l'impact, en particulier pour la détection environnementale de changement. Cependant, étant donné que les paramètres atmosphériques durant les passages de satellites et que les programmes relatifs pour la correction ne sont pas disponibles, les modèles basés sur la mesure *in-situ* (HBC, 5S, etc.) ne seront pas applicables à notre étude. Une méthode fiable mais simple et complètement basée sur l'image elle-même — le modèle de COST (Chavez, 1996) peut, en revanche, être adoptée pour ces travaux.

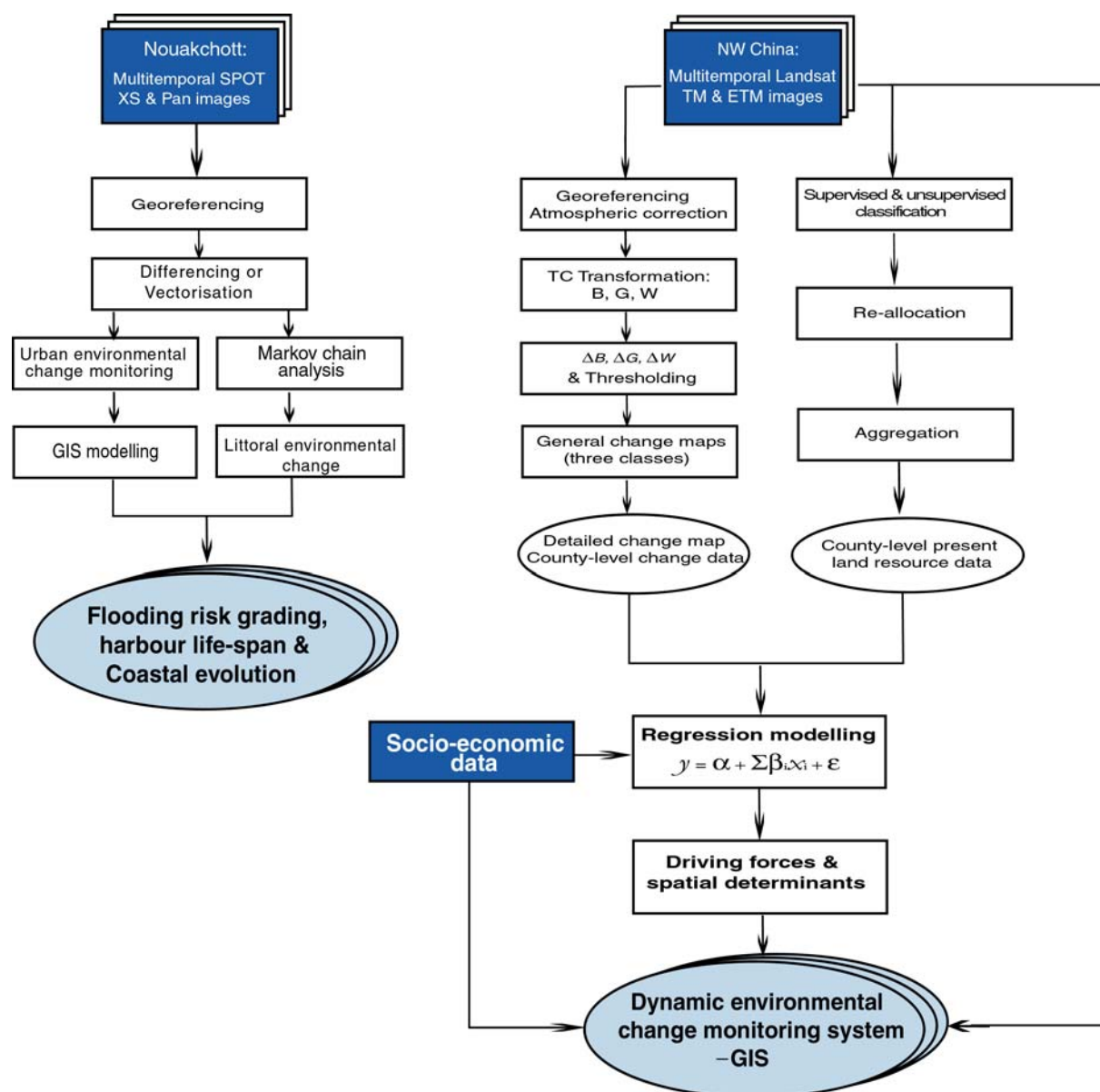


Figure II-12 : Méthodologie adoptée dans les recherches

TRANSFORMATION MULTISPECTRALE

Pour obtenir l'information pertinente et éviter la redondance, les indices de végétation tels que le SAVI (Huete, 1988), le MSAVI (Qi *et al.*, 1994), l'ARVI (Kaufman et Tanré, 1992 et 1996) sont les

techniques les mieux adaptées à la mise en évidence de la couverture de végétation de faible densité. Cependant, la transformation de chapeau à cône (Kauth et Thomas, 1976 ; Crist et Cicone, 1984a, b) peut mettre en évidence de multiples aspects de l'information d'occupation du sol, quant à la couverture de végétation mais également à la nudité et à l'humidité du sol. Par conséquent, notre étude a finalement opté pour cette transformation en ce qui concerne les données de Landsat TM et ETM+ afin d'obtenir trois indicateurs d'occupation des sols : Brillance (B), Verdeur (G) et Humidité (W).

TECHNIQUES DU DIFFERENCING ET DE SEUILLAGE POUR LA DISTINCTION DE CHANGEMENT

Comme nous l'avons montré dans la section précédente, bien que la régression d'images (Ingram *et al.*, 1981, Jensen, 1983 ; et Singh, 1989), le ratioing d'images (Todd, 1977 ; Nelson 1983) puissent obtenir un bon résultat dans la détection de changement, la technique de la différenciation (differencing) (Toll *et al.*, 1980 ; Ingram *et al.* 1981 ; et Jensen *et al.*, 1982) occasionne moins d'erreurs que d'autres approches. C'est pour cette raison que la différenciation (differencing) a été suivie pour ces études de cas. Après son application, une technique d'établissement de seuil (seuillage-thresholding) déterminant où placer le seuil de délimitation des changements et des non-changement, est également une procédure importante pour la discrimination des changements environnementaux.

DISTINCTION DES TYPES DE CHANGEMENT

Le produit de l'établissement de ce seuil est une carte de changement en trois classes comprenant le changement positif, le non-changement et le changement négatif. Comme pour l'indicateur de brillance (B), le changement positif, représentant biophysiquement une augmentation de brillance du sol, peut être provoqué par la dégradation de végétation, l'assèchement des plans d'eau et l'urbanisation. Et son changement négatif peut résulter de l'extension des terres cultivées (comprenant la conversion du sol nu en la prairie), de l'extension des plans d'eau etc. Ainsi il est nécessaire d'identifier le caractère concret du changement environnemental dans les sites d'étude.

Les résultats de changement devraient être exprimés à un niveau administratif, résultats pour un département, par exemple, afin de faciliter l'analyse des changements de l'environnement et du développement socio-économique.

CONSTRUCTION D'UN SYSTEME DE SUIVI DYNAMIQUE AVEC LES SIG

Tous les résultats de la détection de changement par la télédétection et les données géographiques numérisées peuvent être gérées par un logiciel de gestion de l'information géographique, par exemple, l'ArcGIS, pour établir un système de suivi dynamique de changement environnemental nous permettant de réaliser une meilleure gestion de données, de détection de changement et de modélisation spatiale.

MODELISATION DE L'INTERACTION HOMME-ENVIRONNEMENT

Quel est/sont le(s) force(s) d'entraînement des changements environnementaux ? Comment l'activité humaine influence-t-elle le changement environnemental ? Quand et où le futur changement sera-t-il susceptible d'avoir lieu ? Ces questions ne peuvent être résolues que par la modélisation de l'interaction homme-environnement menée grâce à des modèles de régression linéaire multivariée et/ou des modèles de régression logistique. Les modèles de régression linéaire combinent les changements environnementaux et les facteurs socio-économiques en utilisant l'analyse de panel et/ou l'analyse transversale et déterminent les forces d'entraînement du changement et/ou les déterminantes socio-économiques. Les modèles de régression logistique indiquent le rapport entre la structure environnementale et les changements spatiaux et prévoient où les changements potentiels peuvent survenir. Par conséquent, toutes les approches de modélisation sont complémentaires et utiles.

Chapitre III : Cas d'étude n°1

SUIVI DU CHANGEMENT DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN ET DU LITTORAL A NOUAKCHOTT^①

① Modifié de et résumé d'après (1) *Weicheng Wu*, Marie-Françoise Courel et Jeannine Le Rhun, **Application of Remote Sensing to the Urban Expansion Analysis for Nouakchott, Mauritania**, *Geocarto International*, Vol.18, No.1, p.17-24, 2003, et (2) *Weicheng Wu*, Marie-Françoise Courel et Jeannine Le Rhun, **Coastal geomorphological change monitoring by remote sensing in Nouakchott, Mauritania**, In: *Proceedings of the 9th International Symposium on Remote Sensing (Proceedings of SPIE: Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications and Geology II)*, Vol.4886, Paper No.106, édité par Manfred Ehlers, p.667-679, Crète, Grèce, Sept.22-27, 2002.

RESUME: Nouakchott, capitale de la Mauritanie, a connu une urbanisation rapide depuis les années 80, en particulier lors de la dernière décennie. La croissance démographique, dans un étroit espace exposé à un risque élevé de catastrophes naturelles, entre l'Océan Atlantique et le Sahara, a conduit à un alourdissement du handicap d'un terrain stérile, à une dégradation de l'environnement urbain et à une difficulté de la vie. En outre, depuis la construction du Port de l'Amitié — important accès à l'importation pour Nouakchott en 1987, l'équilibre dynamique du littoral a été rompu et un important changement de la géomorphologie du littoral s'est produit : accrétion de la plage au nord du port et érosion du cordon littoral au sud. Ces changements ont, à plusieurs reprises, causé l'inondation par l'eau de mer de la banlieue et de quelques secteurs urbains, provoquant une détérioration de l'environnement urbain et du littoral. Cette recherche se concentre sur l'évaluation des risques urbains, l'analyse de l'expansion et de l'inondation, la mesure de changement du littoral et l'évaluation du potentiel d'évolution, en utilisant les techniques de la télédétection et des SIG (images multitemporelles de SPOT et données démographiques). Les objectifs de cette étude sont de comprendre les facteurs influençant l'expansion urbaine et l'évolution du littoral, de mesurer les taux de changement géomorphologique, d'évaluer l'espérance de vie du port, et de produire des références utiles au gouvernement pour la planification urbaine, un aménagement futur de la côte et le contrôle de la dégradation environnementale. Les résultats prouvent que (1) Nouakchott s'est étendue de 36 km² à un taux de croissance de 5,3 % et à un taux moyen d'extension de 3,6 km²/an correspondant à une croissance de population d'environ 380 000 habitants entre 1989 et 1999. Cette croissance présente une dynamique principale qui a conduit à l'expansion urbaine ($R^2 = 0,987$) ; (2) la plage au nord du port s'est accrue de 0,92 km² (92 ha) entre 1989 et 2001 et cette augmentation atteindra probablement sa limite maximale en $13,4 \pm 0,5$ ans (estimation 2014-2015). La dérive littorale se déversera en grande partie dans le bassin et le port sera abandonné si aucune mesure n'est prise ; (3) le cordon littoral du sud a été érodé de 1,34 km² (134 ha) et la côte s'est retirée vers l'intérieur des terres de 362 m, et reculera encore de 277 m au cours des dix prochaines années, lorsque 0,91 km² de terre supplémentaire auront été érodés par l'eau de mer ; (4) la

dépression littorale, une protection contre l'inondation entre le cordon littoral et l'urbain (zone recommandée inconstructible), ont été analysées et trois degrés de risque ont été évalués par la modélisation spatiale (5). Ces trois importants points à prendre en compte pour la future planification urbaine sont exposés dans ce chapitre.

MOTS CLES : Télédétection, images multi-temporelles de SPOT, expansion urbaine, changement géomorphologique littoral, inondation, évaluation des risques, modélisation par SIG, tendance d'évolution littorale, espérance de vie du port, Nouakchott.

I. INTRODUCTION

Nouakchott, capitale de la Mauritanie, située en Afrique du Nord-Ouest (figure III-1), est une ville récemment construite dans le bassin Méso-Cénozoïque Sénégal-Mauritanien (Caruba *et al.*, 1991). La ville rencontre un problème lié à sa forte croissance démographique et aux multiples risques naturels auxquels elle est confrontée, par exemple, l'inondation par l'eau de mer, une aridité sérieuse, l'invasion de dunes actives et l'élévation du niveau d'eau salée souterraine (Courel *et al.*, 1993, 1996, 1998a, b, c). La croissance démographique et l'urbanisation rapides, dans une ceinture étroite s'étendant entre Océan Atlantique et désert du Sahara a produit un lourd fardeau pour cette terre stérile. En outre, l'exploitation des ressources naturelles (par exemple, des sables et des coquillages) pour la construction urbaine a entamé la résistance du cordon littoral et l'aménagement artificiel mal conçu, en particulier, la construction de Port de l'Amitié en 1987, ont détruit l'équilibre originel de la zone littorale, sur le plan de la géomorphologie et de l'écosystème. Le port a provoqué l'accrétion de la plage en amont (au nord) et une sérieuse érosion de la fragile barrière lagunaire en l'aval (au sud). Les eaux de mer peuvent donc attaquer des secteurs de la dune littorale qui sont érodés et fragilisés et, par voie de conséquence, inonder les quartiers suburbains et urbains. La capitale est directement exposée à une possible inondation. De fait, en 1991, la barrière lagunaire, au sud du port, s'est rompue à deux reprises et une inondation a atteint l'ouest et le sud-ouest de la ville. En 1995, la mer est passée au-dessus du cordon littoral autour de la jetée (wharf) et a entièrement inondé la sebkha et un bidonville (figure III-2 et III-4). En 1998, en plus des zones décrites ci-dessus, une brèche s'est ouverte dans plus

de six sections du cordon littoral — la seule défense naturelle contre l'invasion de l'océan pour Nouakchott, et une inondation sans précédent s'est produite dans les parties occidentales de la ville. Ce changement de la géomorphologie du littoral ainsi que d'autres inconvénients naturels, par exemple, la sérieuse aridité, l'élévation du niveau d'eau salée souterraine et l'invasion des dunes de sable (Courel *et al.*, 1993, 1996, 1998a, 1998b), sont de sérieux défis pour la capitale de la Mauritanie.

Quand, où et pourquoi l'extension urbaine s'est-elle si rapidement produite ? Comment évaluer l'impact du changement de la géomorphologie du littoral sur le risque d'inondation par l'eau de mer ? Combien de temps le port restera-t-il en service ? Quel est l'avenir de l'environnement urbain et littoral ? Il est nécessaire de réaliser une étude approfondie pour répondre à l'ensemble de ces questions.

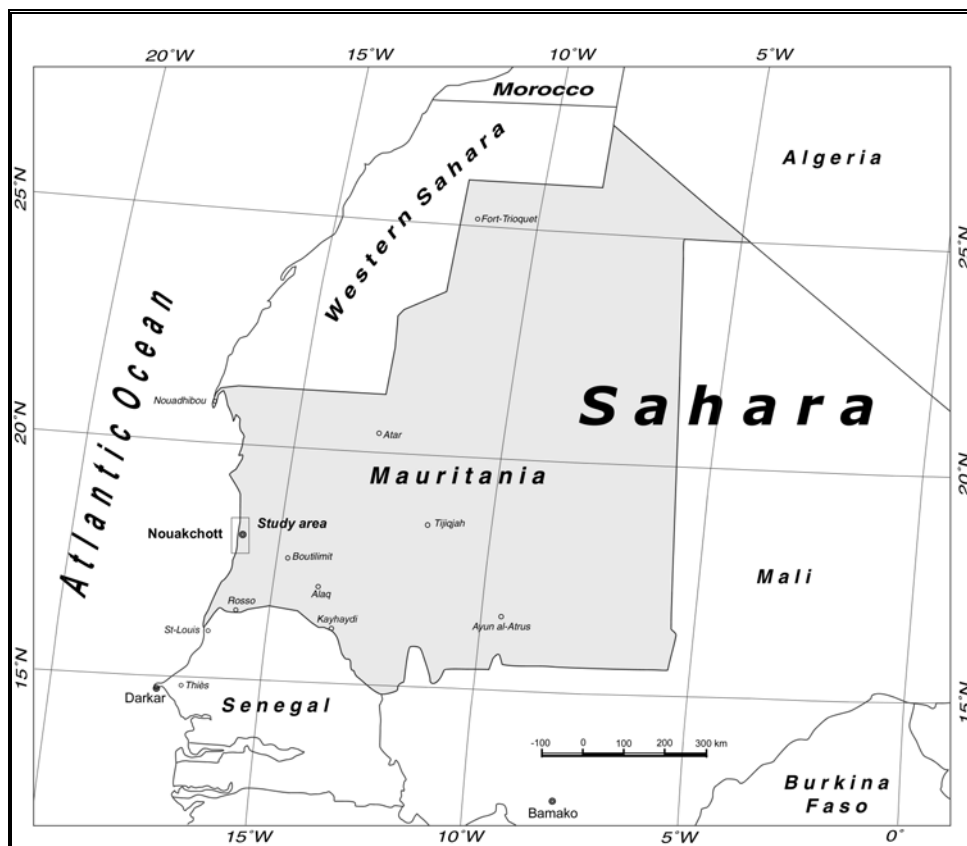


Figure III-1 : Localisation du site d'étude — Nouakchott, Mauritanie, nord-ouest de l'Afrique

Source: GEO, Le Grand Atlas du Monde, Edition Solar, Paris, 1987

En fait, le changement du littoral à Nouakchott a commencé avec la construction du Port de l'Amitié. Mais il n'a été remarqué qu'en 1991, lorsqu'une inondation a franchi la barrière érodée dans le sud du port, s'est étendue au sud-ouest de la région et a dégradé l'environnement urbain et le littoral. Depuis lors, quelques chercheurs ont commencé à relever ces problèmes à Nouakchott et ont effectué

des études appropriées. Un projet *l'Environnement urbain et le littoral à Nouakchott* a été mis en route à PRODIG depuis 1992. La dégradation de l'environnement régional et urbain, la fragilité du cordon littoral et son comportement face à l'attaque des vagues ont été évalués par Courel *et al.* (1993, 1996, 1998a, b et c, 2000) ; une étude de l'histoire du développement de la ville de Nouakchott a été accomplie par Frérot *et al.*(1998) ; l'*Atlas de Mauritanie* a été réalisé par l'Université de Rouen *et al.*(1999) dans un projet de coopération *CAMPUS*.

Cependant, les recherches n'ont pas été centrées sur la détection de l'expansion urbaine, la force d'entraînement de l'extension urbaine et l'influence du risque d'inondation pour l'urbanisation. Quelques éléments importants comme le taux de changement morphologique côtier, l'espérance de vie du port et sa situation future n'ont toujours pas été étudiés. Les objectifs de ces travaux sont d'entreprendre un suivi de l'expansion urbaine, une mesure des changements morphologiques du littoral pendant la dernière décennie, une analyse de risque d'inondation ainsi que de prévoir l'évolution environnementale urbaine et du littoral, dans un futur proche, en utilisant les images multitemporelles de SPOT HRV et les données démographiques. Il s'agit de produire des références utiles pour que les autorités puissent contrôler la dégradation de l'environnement et de donner des conseils pour la future planification urbaine ou un futur aménagement similaire du littoral.

II. SUIVI DES CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX DE L'URBAIN

1. METHODOLOGIE

Du fait de leur résolution spatiale et des multiples informations instantanées sur l'occupation du sol qu'elles produisent (tableau 3-1), les données multi-temporelles acquises par télédétection (SPOT XS et Panchromatique) ont été utilisées pour réaliser cette surveillance de l'extension urbaine. Les méthodes traditionnelles pour mesurer le changement urbain, par exemple, la comparaison de post-classification (Weismiller *et al.*, 1977 ; Gorden, 1980) et la différenciation (differencing) d'images multi-temporelles (Jensen *et al.*, 1982, Quarmby *et al.*, 1989 ; Singh, 1989), n'ont pas pu être appliquée en raison de la similarité de niveau de gris des zones urbanisées et de la dépression littorale. Nous avons finalement adopté une méthode simple, la vectorisation superposée sur les images à des dates différentes pour discriminer l'étendue de l'urbanisation. Des données socio-économiques, principalement démographiques, nous ont permis de connaître ce qui est la base du processus d'urbanisation.

Tableau 3-1 : Données spatiales et hauteurs de marée aux différentes heures d'acquisition

Date	Types d'image	Résolution (m)	Hauteur de marée *				Heure de passage de SPOT	Hauteur de marée en passage ** (m)
			Maximum (m)	Heure	Minimum (m)	Heure		
3 novembre 1989	SPOT 1 XS2	20	1.74	1h44	0,41	7h59	11h44	1.32
13 août 1993	ERS-1 SAR	15						
4 février 1995	SPOT 3 XS & Pan	10	1.71	2h40	0,35	8h43	11h46	1.10
6 juin 1998	SPOT 3 XS	20						
11 nov. 1999	SPOT 1 Pan	10	1.82	1h04	0,30	7h15	11h40	1.73
22 janvier 2001	SPOT 4 Pan	10	1.95	11h23	0,13	5h07	12h	1.90

Note : Données de la hauteur de marée marquée de (*) fournies par Ibrahima Dia (2002), et celles de (**) calculées à partir des variations de marnages semi-diurnes.

La dépression littorale menacée par les inondations a été analysée et des degrés de risques ont été proposés à partir de la modélisation spatiale basée sur une classification de l'image PAN 1999 et sur une définition des secteurs de rupture, d'érosion et de pénétration le long du cordon littoral.

2. DETECTION DE L'EXTENSION URBAINE

L'application des techniques de télédétection à la mesure et au suivi de l'extension de l'urbanisation a été traitée comme suit :

(1) CHOIX DES DONNEES ET PRE-TRAITEMENT

Du fait de la disponibilité et de l'exigence de la haute résolution spatiale, les images du satellite SPOT datées du 3 novembre 1989 (XS), 4 février 1995 (XS et Pan), 6 juin 1998 (XS) et du 11 novembre 1999 (Pan) ont été choisies pour poursuivre cette étude. L'image de 1999 a d'abord été rectifiée par rapport à une carte bathymétrique de Nouakchott publiée par l'IGN (France) en 1998 en datum WGS84 et projection UTM (28) avec un erreur de RMS de 1,5 pixel. Puis, cette image rectifiée a été utilisée comme référence pour géoréférencer les autres images de SPOT HRV (avec un erreur de RMS de 0,21 à 0,33 pixel).

Une fusion utilisant les images PAN 1995 et 1999 est respectivement effectuée pour les données XS 1995 et celles 1998. Cette fusion produit de nouvelles images Pan + XS 1995 et Pan + XS 1999 d'une résolution de 10 mètres.

Nous avons ensuite réalisé un fichier image à neuf canaux : les trois premiers sont les canaux XS de l'image 1989, les trois suivants sont les canaux Pan + XS de l'image 1995 et les trois derniers sont les canaux Pan + XS de l'image 1999. Nous obtenons ainsi une image multicouche qui nous

permet de distinguer clairement les districts urbains, les rues et leurs marqueurs relatifs. Cette image est utilisée pour le suivi de l'extension urbaine.

(2) VECTORISATION EN SUPERPOSITION

Nous avons réalisé une première vectorisation sur l'image XS 1989 pour faire apparaître :

- la limite de l'urbain et la surface déjà urbanisée en 1989,
- les rues qui existaient déjà en 1989.

Dans la même couche vectorielle obtenue par cette procédure (1), une autre vectorisation a été réalisée sur l'image Pan +XS de 1999. Elle met en évidence :

- la limite de l'urbain en 1999,
- l'étendue de l'urbain en 1999,
- les rues développées de 1989 à 1999,
- l'extension de 1989 à 1999.

Sur l'image Pan + XS de 1995, une troisième vectorisation a été effectuée en traçant la bordure d'urbanisation et le quartier abandonné à la suite d'inondation, ce dernier n'est pas visible sur l'image HRV 1989 ni sur celle 1999.

(3) CREATION DE LA CARTE DE SUIVI DE L'EXTENSION URBAINE

A partir de la vectorisation ci-dessus, une carte de l'extension urbaine de Nouakchott est produite pour l'analyse et le suivi de l'expansion (figure III-2).

(4) RESULTATS

Les traitements informatiques montrent que la surface urbaine de Nouakchott est passée respectivement de 54 km² en 1989 à 73 km² en 1995 puis 90 km² en 1999. Cette ville s'est étendue de 36km² au cours de la période 1989-1999 avec un taux de croissance de 3,6km²/a, soit 5,3%. Le tableau 1 synthétise l'extension urbaine pour chaque district de la ville :

Districts Toujounine et Arafat (à l'est), extension d'environ 16 km² ;

Districts Teyaret, Ksar et Dar Naim (au nord-est), augmentation de 6 km² ;

District Tevragh Zeyna (au nord-ouest) extension de 4,3 km² ;

Districts Sebkha et El Mina (à l'ouest), expansion de 4,1 km² ; et

District Riad, avec une surface de 5,7 km² (au sud), est un quartier complètement récent, urbanisé depuis 1989.

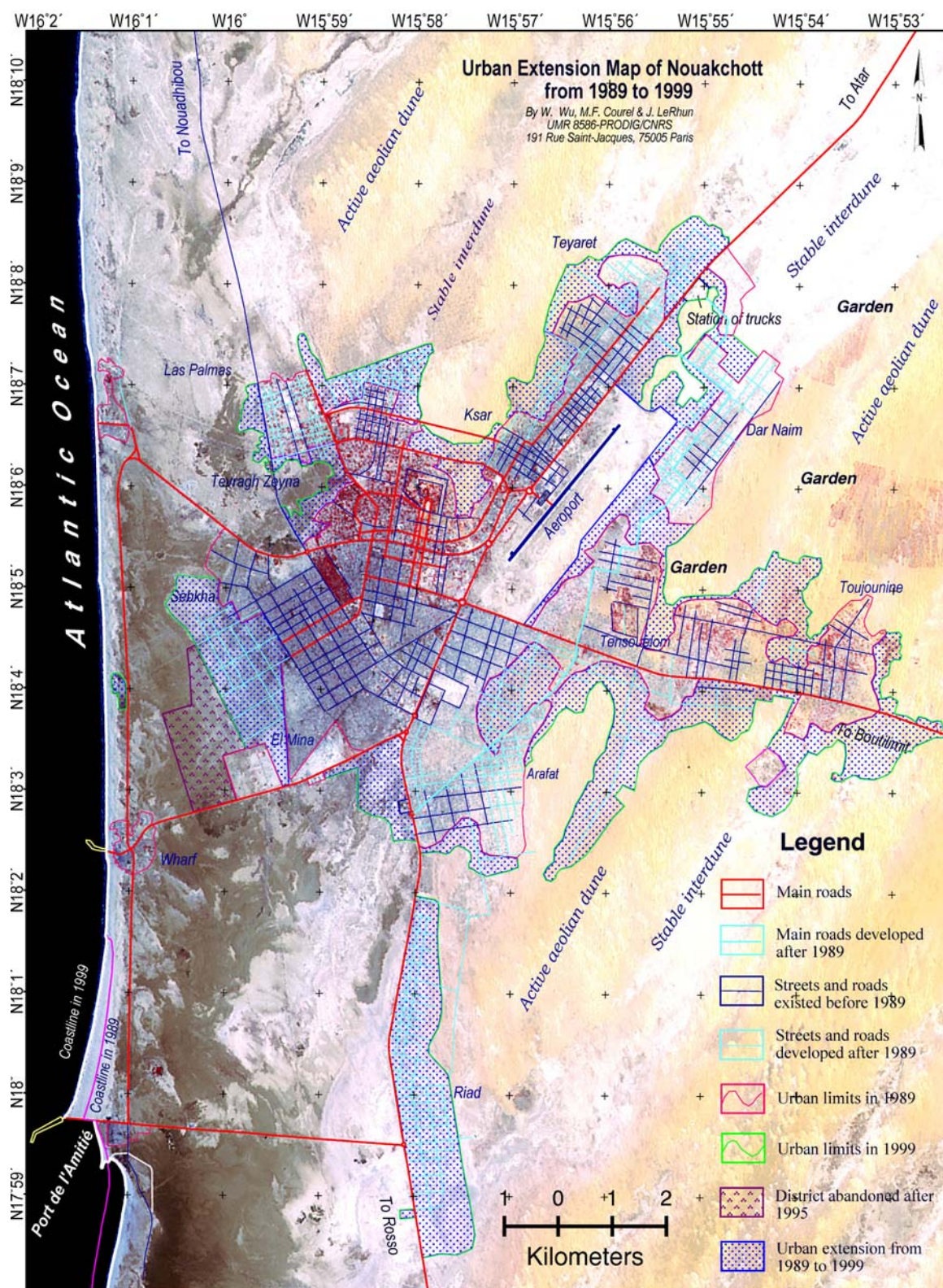


Figure III-2 : Carte de l'extension urbaine de Nouakchott de 1989 à 1999
 Données : Images SPOT acquises en 1989 (HRV), 1995 (HRV et Pan), 1998 (HRV) et 1999 (Pan).

Tableau 3-2 : Extension urbaine à Nouakchott de 1989 à 1999

Position dans la ville	Nom de district	N° de district	Extension (km ²)
Est	Toujounine	IV	13,8
	Arafat	VIII	2,1
Sud	Riad	IX	5,7
Nord-est	Dar Naim	VII	2,4
	Teyaret	I	2,4
	Ksar	II	1,1
Nord-ouest central	Tevragh Zeyna	III	4,3
Ouest	Sebkha El Mina	V VI	4,1
Extension totale			36

Il est clair que chaque district, et en particulier ceux qui sont situés à l'est de la ville, a connu une extension significative pendant la période étudiée.

3. ANALYSE DE L'EXPANSION URBAINE

DEVELOPPEMENT URBAIN

Nouakchott a tout d'abord été construite à Ksar (District II), en 1927, en tant que poste militaire. Elle n'est devenue une 'ville' qu'à partir du transfert de la capitale sénégalaise de Saint-Louis à Dakar, en 1957. Dès lors, avec la croissance démographique, l'espace urbain s'est rapidement étendu (tableau 3-2). Après la pose de la première pierre en mars 1958, plusieurs plans d'urbanisme ont été dressés en 1959, 1970 et 1982. Mais aucun de ceux-ci n'a pu estimer correctement la surprenante croissance démographique (Frérot *et al.*, 1998). Lors des dernières décennies, les immigrants établirent leurs tentes ou leurs maisons en carton autour de l'ancien espace urbain, dans le quartier des bidonvilles installés entre le cordon littoral et le district El Mina (VI) ou le long des routes principales à l'est (district IV : Toujounine), au sud (district IX : Riad) et au nord (district VII : Dar Naim et district I : Teyaret). La ville s'est donc étendue en dehors de ses limites (figure III-2). Cette progression s'est surtout accélérée pendant les années 1990. Comme le montre le tableau 3-3, la surface urbaine en 1999, est presque le double de celle de 1988.

Le développement de l'urbanisation semble être une fonction linéaire par rapport à l'année :

$$Y = 3,669 X - 7245,1 \dots\dots\dots(III-1)$$

où *Y* représente l'expansion de la surface de l'urbain et *X* l'année. A partir de l'équation (1), une estimation de la future étendue urbanisée peut être facilement réalisée : en 2005 et 2010, par exemple,

la ville de Nouakchott pourrait s'étendre respectivement sur 112 et 130 km². Ainsi la télédétection permet un suivi dynamique de l'extension urbaine.

DYNAMIQUE DE L'EXTENSION URBAINE

L'urbanisation est normalement le résultat des activités socio-économiques humaines, par exemple de la croissance de la population urbaine, du développement industriel, agricole et économique. Bien que plus grande ville du Sahara, Nouakchott ne dispose ni d'une solide industrie, ni d'une agriculture très poussée (Université de Rouen *et al.*, 1999). Ses activités économiques portent principalement sur la pêche, la fabrication de produits à base de poisson et les activités portuaires (importation et exportation à partir du Port de l'Amitié). Ainsi elles ne sont probablement pas les raisons majeures de la rapide extension urbaine.

Croissance de la population urbaine

Si l'on compare Nouakchott aux autres capitales, il apparaît que son développement est très récent pourtant sa population connaît une forte croissance. De 500 habitants au tout début de son développement en 1958, elle est passée à 800.000 en 1999 (Tableau 3-3), soit une croissance de 1600 fois celle de 1958. La figure 3b illustre les trois étapes de la croissance depuis 1958 :

Tableau 3-3 : Expansion urbaine correspondant à la croissance démographique à Nouakchott

Année	1958	1962	1977	1988	1989	1994	1995	1999
Population (habitants)	500	5 800	138 000	391 000	413 100	500 800	579 100	800 000
Surface urbaine (km ²)				50	54		73	90

Note: (1) Données démographiques de 1999 fournies par l'ambassade de Mauritanie à Paris. Les autres données sont issues de l'Atlas de Mauritanie, Université de Rouen et Université de Nouakchott, 1999. Le taux de croissance de 1994 à 1999 est de 98,6 %. (2) Les surfaces urbanisées de Nouakchott en 1989, 1995 et 1999 sont tirées de la vectorisation de la présente étude, et celles de 1988 sont extrapolées à partir du taux de l'extension urbaine.

La première étape apparaît autour des années 1970. Historiquement, on constate qu'il y a eu des sécheresses sahariennes pendant cette période et que Nouakchott est donc devenue le lieu de refuge principal du pays (Université de Rouen *et al.*, 1999 ; Encyclopedia, 2000). Un grand nombre de nomades a convergé vers la capitale. C'est cette forte migration qui a constitué le noyau central de la population de Nouakchott.

La deuxième grande étape de croissance a eu lieu dans les années 1980 et au début des années 1990. Non seulement les nomades continuaient à migrer vers la capitale mais ils ont également été rejoints par les citoyens de l'ensemble du pays venant s'installer à Nouakchott à la recherche d'un meilleur emploi (Frérot, 1998).

La troisième étape s'est déroulée à la fin des années 1990. Elle résulte de la poursuite de la migration ainsi que du fort taux de croissance de la population elle-même. Dans le pays, ce taux est de 31,7 ‰ en 1997 et 29,4 ‰ en 2000 (The World Factbook, 2000) alors qu'il s'élève à 98.6 ‰ à Nouakchott à la fin des années de 1990.

Les migrations des années 1970, 1980 et même 1990, ainsi que le taux élevé de la croissance démographique sont les deux facteurs dynamiques majeurs de l'expansion de la population à Nouakchott qui ont impliqué une redistribution de la population dans tout le pays. Un tiers des habitants de la Mauritanie est actuellement concentré dans la capitale. Ce développement excessif constitue un défi à relever pour un territoire infertile qui doit en même temps faire face à de multiples risques naturels.

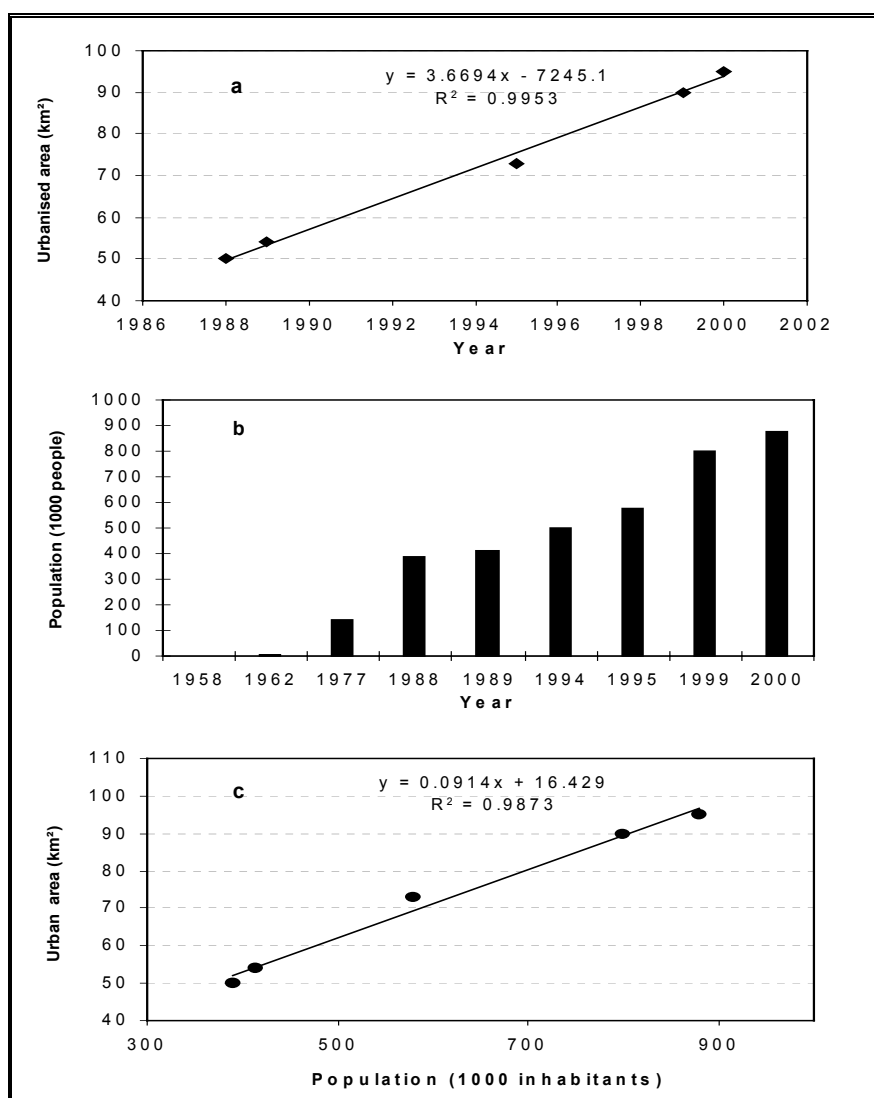


Figure III-3 : Relation entre expansion urbaine et croissance de la population à Nouakchott

a : Extension urbaine de 1988 à 1999 (Tableau 3-3) ; b : Croissance de la population de 1958 à 2000 ; et
 c : Relation entre surface urbaine et population urbaine au cours de la dernière décennie.

Résultats de l'analyse de liaison

A partir des données du tableau 3-3, nous avons effectué une analyse de régression linéaire entre le développement de l'urbain et la croissance de la population de 1988 à 1999. Le résultat suggère que l'extension urbaine est une conséquence de l'accroissement de la population urbaine (figure III-3c, $R^2 = 0,987$).

4. EVALUATION DU RISQUE D'INONDATION

La dépression littorale, incluant la lagune située entre le cordon sableux et la ville de Nouakchott, est naturellement peu élevée. L'eau de mer peut facilement pénétrer dans cette terre basse par la barrière de sable (Courel *et al.*, 1993, 1998c, 2000). La nappe phréatique souterraine monte pendant les événements de précipitations. Cette dépression (en particulier la lagune), est parfois envahie par de l'eau saline. Dès lors la construction du port a contribué à l'érosion de l'ancienne barrière de sable au sud et au recul du trait de côte de 340m de 1989 à 1999. Il en résulte une disparition de la majeure partie de la lagune et plusieurs inondations de cette dépression. Un quartier, construit au début des années 1990 dans la sebkha, a été inondé par l'eau de mer en 1995 (Figure III-2 et III-4, le quartier abandonné). Il est donc nécessaire d'effectuer une évaluation du risque d'inondation de cette dépression littorale. L'expérience de l'auteur en matière d'analyse des risques naturels (Wu *et al.*, 1995) permet d'évaluer et d'estimer cette catastrophe.

DETERMINATION DES FACTEURS DE RISQUES**Humidité du sol**

Pour une occupation du sol homogène, la différence d'humidité révèle une altitude différente pour un bassin ou une dépression. Le taux d'humidité élevé fait apparaître la dépression en plus sombre sur l'image satellitaire. En revanche les zones plus claires traduisent des altitudes plus élevées, et par conséquent moins exposées au risque d'inondation. Donc, les différentes zones sombres dans l'image, indiquant des différences d'humidité, peuvent, dans une certaine mesure, être traduites par la probabilité d'inondation. Cela pourrait être considéré comme un facteur d'appréciation. La dépression littorale de Nouakchott est un cas de figure exceptionnel : sa surface est composée de sable quaternaire auquel s'ajoutent parfois des coquillages ou des sédiments évaporés (Caruba *et al.*, 1991, Courel *et al.*, 1993, 1996). Les taux d'humidité et les niveaux de gris correspondant à cette dépression sont obtenus à partir d'une classification non-supervisée de l'image SPOT Pan datée 1999. Les résultats sont présentés dans le tableau 3-4.

Rupture, érosion et pénétration du cordon sableux dunaire

La rupture, l'érosion et la pénétration de l'eau peuvent provoquer l'ouverture d'une brèche dans le cordon littoral. Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, les parties érodées dans le sud du port sont directement concernées par une menace d'inondation. La pénétration d'eau de mer ne peut pas être observée sur les images SPOT XS et Pan ; elle est cependant parfaitement visible sur les images de radar (Courel *et al.*, 2000). Les sections pénétrées, observables sur l'image de l'ERS-1 SAR du 13 août 1993 (Figure III-4, P.R.), sont donc considérées comme des facteurs favorisant l'entrée d'eau de mer dans Nouakchott. Ces facteurs constituent un nouvel élément à étudier.

Tableau 3-4 : Humidité relative de la dépression littorale à Nouakchott obtenue par classification non-supervisée

Zone d'humidité	WI	WII	MI	MII	MIII	MIV
Niveau gris dans l'image SPOT Pan 1999	45-65	66-90	91-141	142-162	163-180	181-254
Type d'occupation du sol	Océan	Eaux côtières	Lagune ou dépression immergée	Eau saline et terre sableuse	Sable moins humide	Plage ou cordon littoral ancien

Note: M signifie : humide et W : eau.

HIERARCHISATION DU RISQUE

La hiérarchisation du risque est établie par une modélisation spatiale.

La pénétration et les sections de rupture (Figure 4, P.R.) ont tout d'abord été divisées en 3 zones selon la distance (par exemple, 800m) pour être ensuite incorporées à la carte des taux d'humidité relative, sous ArcView GIS. En pondérant leur importance dans le cas d'une possible inondation et en attribuant un coefficient de risque à chaque niveau de facteur (par exemple, les valeurs 3, 2 et 1 ont été respectivement attribuée à MI, MII et MIII dans le tableau 3-4), une modélisation a été réalisée, puis une vérification de résultat menée sur l'image SPOT. Ce processus a été répété à plusieurs reprises en modifiant la pondération des facteurs, par exemple, de 50 % à 80 % pour l'humidité et de 50 % à 20 % pour la pénétration et la rupture (P.R.), jusqu'à ce qu'un résultat semblant pertinent soit obtenu ; résultat où le quartier inondé en 1995 est bien localisé dans les zones de risque d'inondation. La pondération de ce résultat est de 70 % et 30 % respectivement pour les deux facteurs ci-dessus.

Trois zones à haut risque ont ainsi été obtenues et superposées à l'image Pan 1999. Une nouvelle carte indiquant les degrés de risque d'inondation a ainsi été produite (Figure 4). Comme nous le verrons ci-dessous, RI, RII et RIII sont respectivement employés pour exprimer les catégories potentielles de risque :

RI signifie la zone la plus dangereuse (en rouge foncé), composée de la lagune résiduelle la plus humide et la plus proche de la zone érodée ou du cordon perméable, habituellement imprégnée d'eau saline, et principalement localisée près des sections de pénétrations ;

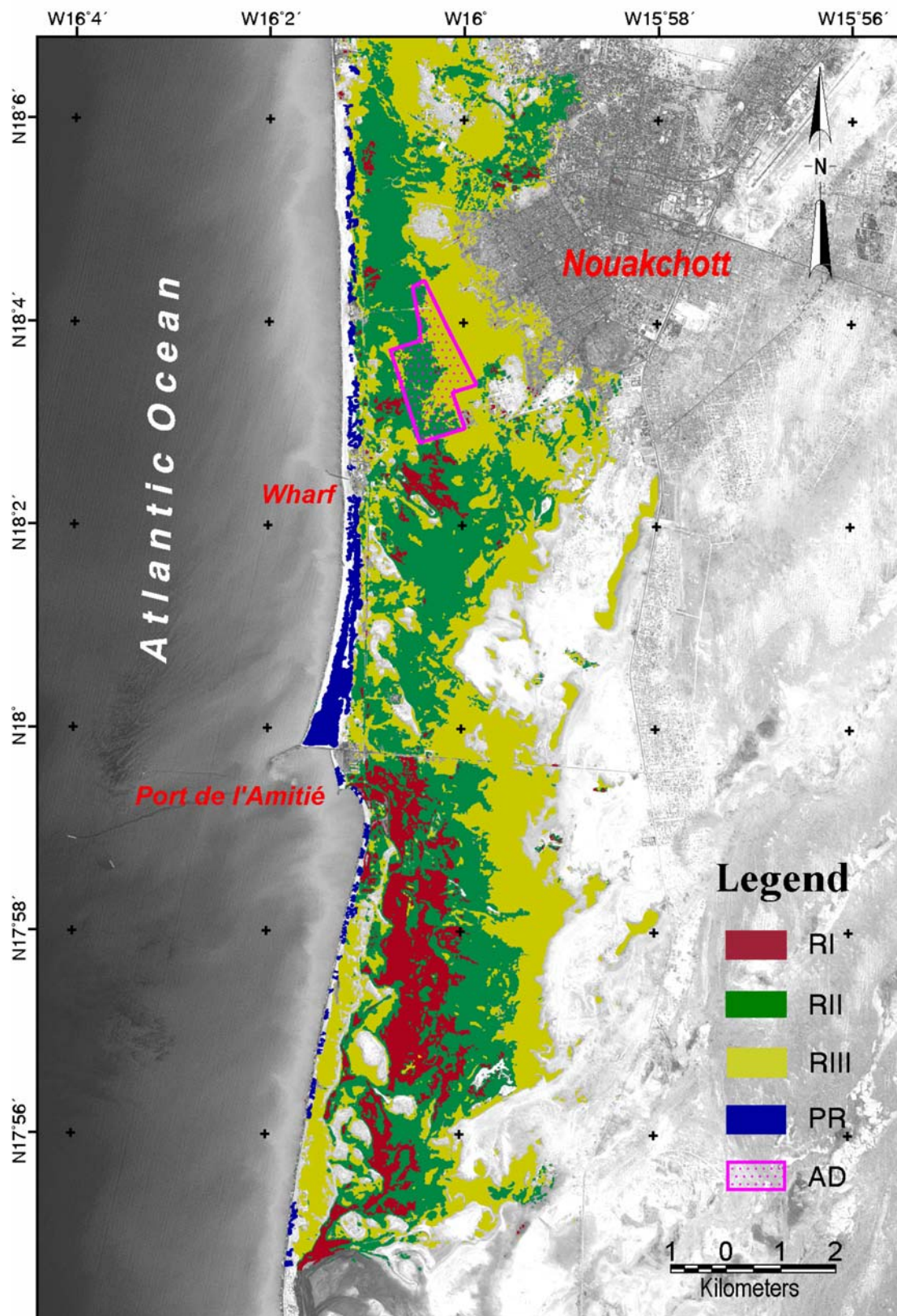


Figure III-4 : Zones exposées au risque d'inondation entre le cordon littoral et Nouakchott.

RI : première zone à risque, RII : deuxième zone à risque et RIII : troisième zone à risque.

PR: Sections de pénétration et de rupture ; AD : District abandonné

RII représente la deuxième zone dangereuse (en vert-foncé), comprenant la deuxième zone saline moite autour de RI, imprégnée de temps en temps par de l'eau saline, lors des inondations. Cette zone est localisée dans toute la dépression ;

RIII troisième zone dangereuse (en vert jaunâtre), composée de la troisième zone humide, autour du RI et du RII, imprégnée avec de l'eau saline lors des fortes pluies ou des inondations, localisée le long de la marge de la dépression.

Ces trois zones sont susceptibles d'être inondées.

Il est clair qu'en plus du district abandonné (AD sur la figure 4) situé dans les zones RII et RIII, certaines parties des quartiers Sebkhas et El Mina sont également localisées dans la troisième zone de risque (RIII). Et que, si une importante inondation causée par une tempête ou des tsunamis se produit, ces secteurs seront très certainement en danger. L'urbanisation future devrait absolument éviter ces trois zones à risque.

5. EXPOSE SUR L'ENVIRONNEMENT URBAIN

Quel peut être le futur de Nouakchott, ville confrontée aux risques naturels multiples et ayant une population sursaturée ? Un des auteurs a déjà proposé quelques suggestions (Courel, 1998a) : réalisation de plus de travaux de plantation pour bloquer l'invasion des dunes actives ; installation d'un conduit ou d'un tunnel sous le brise-lames du port pour conduire le sable de la dérive vers le sud afin de protéger la barre de côte contre davantage d'érosion et de réduire le risque d'inondation d'eau de mer. Ce sont de bonnes propositions pour améliorer l'environnement urbain et réduire l'occurrence des catastrophes. Mais ce n'est pas suffisant pour la future urbanisation. Quelques autres facteurs importants devraient être pris en compte :

- Où trouver de l'eau douce ? Facteur primordial pour les développements industriels, agricoles et la vie générale. Les ressources en eau devraient être la première chose à considérer dans la future planification urbaine. Acculé entre le désert du Sahara et la barre côtière fragile, Nouakchott n'a pas beaucoup de ressources d'eau douce. Elle profite de la nappe aquifère souterraine d'Ijudu située dans le sud-est de la région depuis le début de son développement. Mais, en raison d'un climat constamment sec (avec des précipitations annuelles de 100 à 200 mm, Toupet *et al.*, 1977 et 152,4 mm, Country Watch, 2000), cette nappe aquifère est mal rechargée et ses réserves sont limitées. Ainsi elle sera probablement entièrement épuisée dans un proche avenir.

- Comment maîtriser l'expansion de la population ? Avec une densité démographique actuelle de 8,889 habitants/km², les infrastructures civiles ont déjà beaucoup de difficulté pour répondre aux exigences du fonctionnement urbain : transport sous-développé, mauvais état sanitaire, manque d'eau douce etc. Une expansion anarchique entraînera une nouvelle dégradation des conditions de vie déjà

difficiles et de l'environnement urbain. Par conséquent, des mesures devraient être prises pour maîtriser la croissance de la population.

- Quelle stratégie d'urbanisation et à quel endroit ? Nouakchott et ses environs étant exposés à de multiples risques naturels, le choix des endroits, en matière de sécurité, pour la programmation des futurs chantiers urbains est capital. La méconnaissance du risque d'inondation a été fatale, au quartier de bidonvilles entassés dans la dépression située entre le cordon dunaire côtier et El Mina (district VI). En 1995, ce quartier a été inondé par l'eau de mer et finalement rattaché à la partie sud de Toujounine (district IV) (figure 2 et 4, le quartier abandonné après 1995). Il va de soi que tout projet d'urbanisation doit être développé en dehors des zones à haut risque.

L'observation des images satellitaires montre que très peu d'endroits échappent à cette contrainte majeure qu'est le risque d'inondation. Au nord et à l'est, la ville ne ferait que se rapprocher du désert. L'extension urbaine au nord-ouest et au sud semblerait donc plus judicieuse car plus proche de la couche aquifère et moins exposée aux risques d'inondation.

III. ANALYSE DE L'EVOLUTION DU LITTORAL

L'accrétion de sable à l'amont d'un brise-lames et l'érosion à l'aval sont des phénomènes communs dans la gestion littorale. Des changements de la géomorphologie du littoral, semblables à ceux rencontrés par Nouakchott, ont également affecté d'autres endroits : Santa Barbara, Etats-Unis (Komar, 1998) ; Lanshan, Chine (Chang, 1997) ; Hualien, Taiwan (Hsu *et al.*, 2000) ; Fortaleza, Brésil (Maia *et al.*, 1998) ; la plage de Jacarepagua, environs de Rio de Janeiro, Brésil (Paskoff, 1998) ; le delta du nord-est du Nil, Egypte (Frihy *et al.*, 1998). Ainsi, la détection, le suivi et la cartographie du changement sont importants pour comprendre l'évolution du littoral due à un aménagement artificiel ainsi que l'évaluation de ses impacts sur le littoral et l'environnement humain.

L'application des méthodes de télédétection pour le suivi du changement côtier date d'une quarantaine d'années. Dès 1963, Verstappen avait commencé à employer les photographies aériennes pour mesurer les changements du delta Solo en Mer de Java. En 1971, Stafford et Langfelder ont utilisé de telles photos pour examiner l'érosion côtière. Dès lors, une variété de techniques et de capteurs aéroportés et spatiaux tels que Landsat MSS (Jensen *et al.*, 1987), la photogrammétrie aérienne (Ramsey, 1997 et Gorman *et al.*, 1998), Landsat TM (Ramsey, 1997), le radar (Jol *et al.*, 1996, 1999 et Ramsey *et al.*, 1998) et le LIDAR (Daniel *et al.*, 1998), ont été exploités dans différents projets de recherche sur les milieux littoraux. Les techniques de mesure, récemment développées,

telles que la photogrammétrie aéroportée et le LIDAR fournissent des mesures de haute résolution avec moins d'erreur. En raison de la disponibilité des données et de leur haute résolution, les images multi-temporelles de SPOT XS (tableau 3-1) ont été choisies pour accomplir cette analyse de changement ainsi que la surveillance de l'évolution du littoral.

1. METHODOLOGIE

Pour appréhender des changements à partir de données de télédétection à différentes dates, plusieurs méthodes de traitement sont actuellement disponibles : la comparaison de post-classification (Weismiller *et al.*, 1977 ; Gorden, 1980) et la soustraction (*differencing*) d'images (Jensen *et al.*, 1982 ; Quarmby *et al.*, 1989 ; Singh, 1989 et Wu *et al.*, 2002a). Quelques auteurs (Wu *et al.*, 2003a) ont suggéré une approche par 'vectorisation en superposition' pour mesurer les changements lorsque l'utilisation de ces méthodes traditionnelles n'est pas possible. Puisqu'il y a, dans le canal rouge, une différence évidente, entre la réflectance de l'eau et celle de la terre, la procédure de différenciation (*differencing*) des niveaux de gris a été appliquée aux images SPOT XS et panchromatique (Pan) multi-dates pour mettre en évidence les changements géomorphologiques côtiers. On a procédé selon les démarches suivantes :

PREPARATION

Pour améliorer la comparaison entre les images et la distinction de la réflectance entre terre et eau, trois images de SPOT Pan (résolution 10m) datées respectivement du 22 janvier 2001, 11 novembre 1999, du 4 février 1995 et une image multispectrale XS2 (le canal rouge à résolution de 20 m) du 3 novembre 1989 ont été observées. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 3-1.

La Pan 1999 fut la première corrigée géométriquement au moyen d'une carte bathymétrique de Nouakchott dans le datum WGS84 et la projection UTM (Zone 28) avec une erreur de RMS de 1,5 pixel. Ensuite cette image corrigée a été utilisée pour rectifier les autres images Pan et XS. Cette rectification image par image s'est terminée en utilisant la méthode polynomiale (modèle d'ordre 3 et ré-échantillonnage bilinéaire) avec l'erreur de RMS de 0,21 à 0,33 pixel.

Les brisants qui pouvaient être confondus avec la plage sur les images Pan et XS ont été reconnus visuellement et masqués.

SOUSTRACTION (DIFFERENCING)

Au moyen des données ci-dessus, nous avons créé un fichier contenant les quatre images (longueur d'onde : 0,630 et 0,645 μm), effectué ensuite une soustraction entre deux de ces bandes pour effectuer une différenciation (*differencing*) d'images. Une nouvelle image avec trois bandes a donc été

constituée où la bande 1, représente le résultat de la soustraction en niveau de gris entre les images Pan 2001 et 1999, la bande 2 entre Pan 1999 et 1995 et la bande 3 entre Pan 1995 et XS2 1989.

Bande 1 = $\Delta_{2001-1999}$ = Niveau de gris de Pan 2001 – Niveau de gris de Pan 1999 ;

Bande 2 = $\Delta_{1999-1995}$ = Niveau de gris de Pan 1999 – Niveau de gris de Pan 1995 ;

Bande 3 = $\Delta_{1995-1989}$ = Niveau de gris de Pan 1995 – Niveau de gris de XS2 1989.

Après soustraction, les valeurs de comptes numériques sont comprises entre –255 et +255. Les valeurs positives montrent les zones d'accroissement alors que les valeurs négatives indiquent les zones érodées.

EXTRACTION DU CHANGEMENT ET COMPOSITION COLOREE

Une composition colorée de la nouvelle image a été réalisée à partir des trois bandes obtenues par la méthode de soustraction. Pour souligner l'accrétion de la plage au nord du port ($\Delta > 0$), nous avons "seuillé" l'histogramme en supprimant toutes les valeurs négatives (figure III-5a). Nous avons fait de même pour mettre en évidence les zones d'érosion ($\Delta < 0$) en excluant les valeurs positives (figure III-5b).

QUANTIFICATION DU CHANGEMENT

Une vectorisation a été pratiquée pour quantifier l'accrétion et l'érosion de la plage à différentes dates autour du port et de l'épi. Les changements de 1989 à 1995, de 1995 à 1999 et de 1999 à 2001 ont été mesurés ; ils sont présentés dans le tableau 3-5.

2. RESULTATS

La détection des changements indique que la plage du nord s'est étendue de $0,92 \pm 0,02 \text{ km}^2$ avec un taux moyen d'accrétion de $0,08 \text{ km}^2/\text{a}$. Par contre, la barrière lagunaire du sud a diminué $1,34 \pm 0,04 \text{ km}^2$ avec un taux d'érosion de $0,12 \text{ km}^2/\text{an}$, au cours de la période 1989-2001. La modification la plus significative concerne ce dernier secteur érodé.

L'analyse du tableau 3-5 prouve également que le taux de changement des deux types est différent d'une période à l'autre. De 1989 à 2001, l'accrétion semble plus rapide que l'érosion.

Une accumulation de sable d'environ $0,04 \text{ km}^2$ a été détectée sur la petite plage à l'amont de l'épi (Figure III-5a).

Plus de 15 kilomètres de la plage du sud sont exposés à l'érosion, ce qui a causé la disparition de la barrière de la lagune en 1995, puis de la lagune entière en 1999.

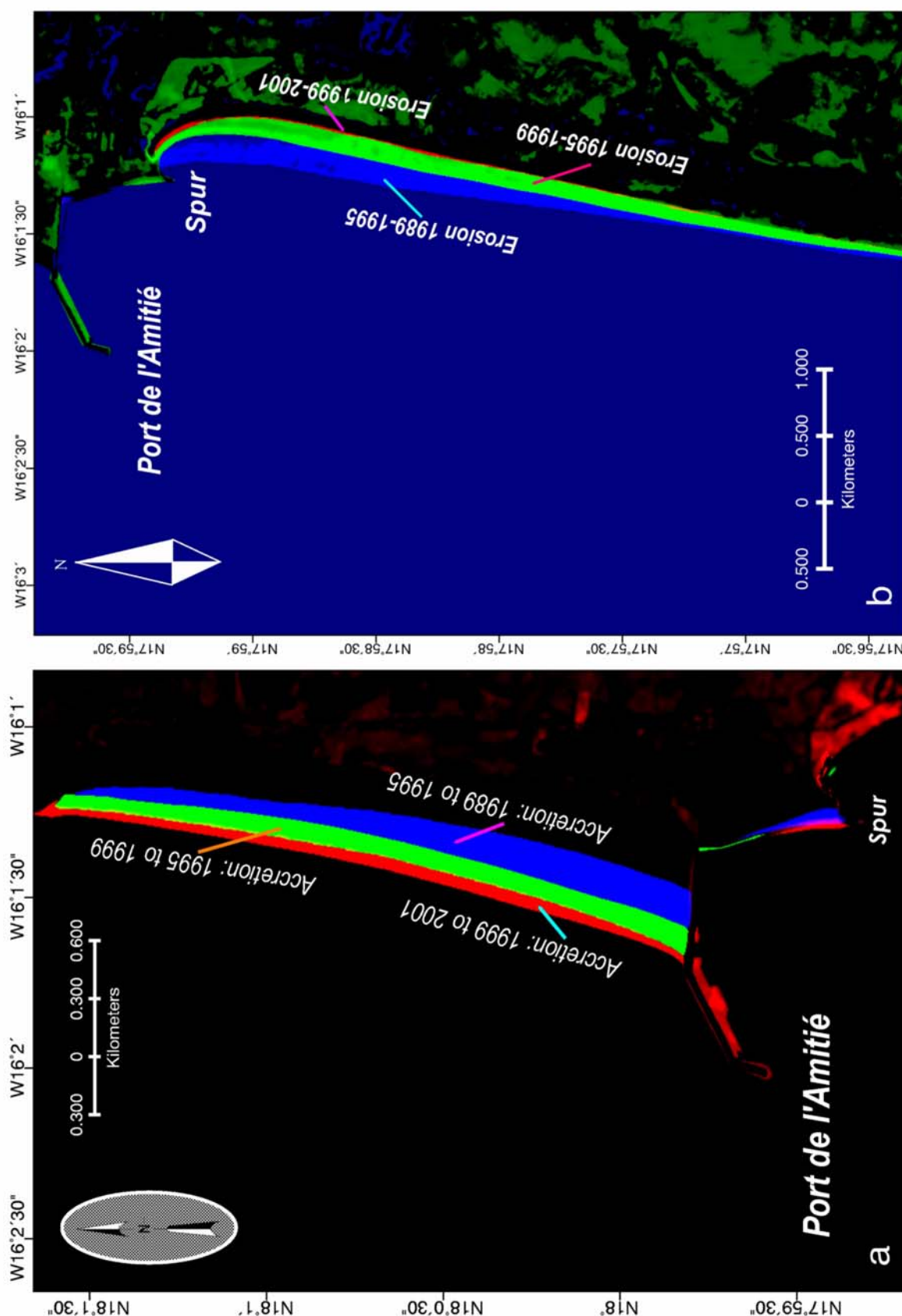


Figure III-5 : Changements du littoral aux abords du Port de l'Amitié à Nouakchott entre 1989 et 2001

a : accrétion à l'amont et b : érosion à l'aval de 1989 à 1995, de 1995 à 1999 et de 1999 à 2001.

Tableau 3-5 : Surfaces et taux de changement littoral autour du Port de l'Amitié

Position	Changement	1989-1995	1995-1999	1999-2001	Total	Erreur
A l'amont du port	Accrétion (km ²)	0,41	0,33	0,17	0,92	0,023
	Taux d'accrétion moyenne (km ² /an)	0,08	0,07	0,14	0,08	0,002
A l'amont de l'épi	Accrétion (km ²)	0,02	0,01	0,01	0,04	0,007
A l'aval du port	Erosion (km ²)	0,63	0,64	0,07	1,34	0,041
	Taux d'érosion moyenne (km ² /an)	0,12	0,13	0,05	0,12	0,011

3. ANALYSE DE L'EVOLUTION POTENTIELLE DE LA COTE

Les côtes évoluent par érosion et sédimentation. Ces phénomènes s'expliquent d'abord par le jeu des vagues et des marées ainsi que par celui des courants qu'elles engendrent. Mais l'homme est devenu, volontairement mais aussi involontairement, un agent essentiel de l'évolution de beaucoup de rivages marins (Paskoff 1998).

Les changements morphologiques du littoral à Nouakchott découlent d'une modification de l'hydrodynamique côtière, telle que la direction et la vitesse du courant côtier qui résulte de la construction du port. La connaissance du courant et des changements morphologiques dans le passé est utile pour comprendre l'évolution potentielle à venir.

VAGUES ET DERIVE LITTORALE

Les vagues apparaissent quand la vitesse du vent excède 3 à 4 m/s. Leurs caractéristiques dépendent de la vitesse du vent, de la durée pendant laquelle il souffle, de l'étendue d'eau. Au large, les relations suivantes permettent de caractériser les vagues (Paskoff, 1998) :

$$v = gT/2\pi \text{ et } \lambda = gT^2/2\pi \dots\dots\dots(III-2)$$

λ étant la longueur d'onde exprimée en mètres, T la période exprimée en secondes, v la vitesse exprimée en m/s et g l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s²). Si la longueur d'onde des vagues peut être mesurée, nous pouvons calculer leur vitesse de propagation.

Les vagues et la direction de leur propagation peuvent être identifiées sur les images de télédétection grâce à leur réflectance dans les bandes visibles. De plus, la mesure de direction peut révéler l'interaction entre vagues et courants (Cuq, 1984, 1991). Ces informations sont utiles pour mieux comprendre les caractéristiques de la dérive littorale à Nouakchott.

Sur les images XS de SPOT, datées du 3 novembre 1989, la direction des plans de houle dans le secteur côtier est de 30°O avec une longueur d'onde d'environ 880m (figure III-6). Une orientation de 60°O avec une longueur d'onde de 125m environ a été reconnue sur l'image SPOT Pan du 4 février 1995 (figure III-7a). Selon la formule (1), nous obtenons les résultats suivants à Nouakchott :

La période de propagation $T \approx 24s$ et la vitesse des houles $v \approx 37$ m/s pour la mer du 3 novembre 1989 ; $T \approx 9$ s et $v \approx 14$ m/s pour la mer du 4 février 1995.

La photographie prise en juillet 2000 montre également une direction semblable des vagues (figure III-7b). Bien qu'il y ait quelques différences d'orientation et de longueur d'onde, les vagues observées sur les images et les photos sont principalement orientées nord-ouest. En fait, une telle direction concerne 48,6 % des vagues (Courel, 1998) ; donc cette direction est dominante.

D'après la propagation des vagues, on peut supposer qu'un courant côtier coule du nord au sud à Nouakchott (figure III-7a et 7b). C'est, en fait, la composante côtière du courant des Canaries qui se déplace du nord-est au sud-ouest vers la mer mauritanienne (Lanjamet, 1988). Cette composante apporte la dérive littorale et joue un rôle important dans les changements de la géomorphologie du littoral car elle met en mouvement des sédiments et les transporte quand sa vitesse est supérieure à une certaine valeur. Elle les dépose lors du ralentissement jusqu'à une certaine limite.

La vitesse de la dérive littorale dépend de plusieurs facteurs : périodes et angle d'incidence des vagues, hauteur de celles-ci au moment du déferlement, pente et rugosité de l'espace infralittoral (Paskoff, 1998). Elle n'est pas facile à calculer. Il existe cependant des formules qui permettent de faire des estimations. Parmi elles, celle de Putnam *et al.* (1949) retouchée par Inman-Quinn, est souvent employée car ses résultats sont confirmés par des mesures de terrain (Chang, 1997) :

$$V = [((1/4X^2) + Y)^{1/2} - (1/2X)]^{1/2} \dots\dots\dots(III-3)$$

$$X = 646 H p \cos \alpha / T$$

$$Y = (2.28 g H)^{1/2} \sin \alpha$$

Où V est la vitesse de la dérive littorale en m/s ; p , la pente de l'espace infralittoral ; H , la hauteur des vagues en mètres au moment du déferlement ; α , l'angle d'incidence avec le rivage des vagues qui se brisent ; T , la période de houle en secondes.

La pente du fond infralittoral à Nouakchott est très faible. A partir de la carte bathymétrique, p (la pente) obtient une valeur de 0,18 % à 0,3 % avec une moyenne de 0,24 %. La hauteur H mesurée est de 1-2 m avec une moyenne de 1,5 m (Lanjamet, 1988). L' α est d'environ 45°, en moyenne, pour les houles du 3 novembre 1989 et 20° pour celles du 4 février 1995 mesurées sur les images SPOT. En utilisant les résultats obtenus ci-dessus, les vitesses de la dérive littorale sont calculées selon la formule (III-3) :

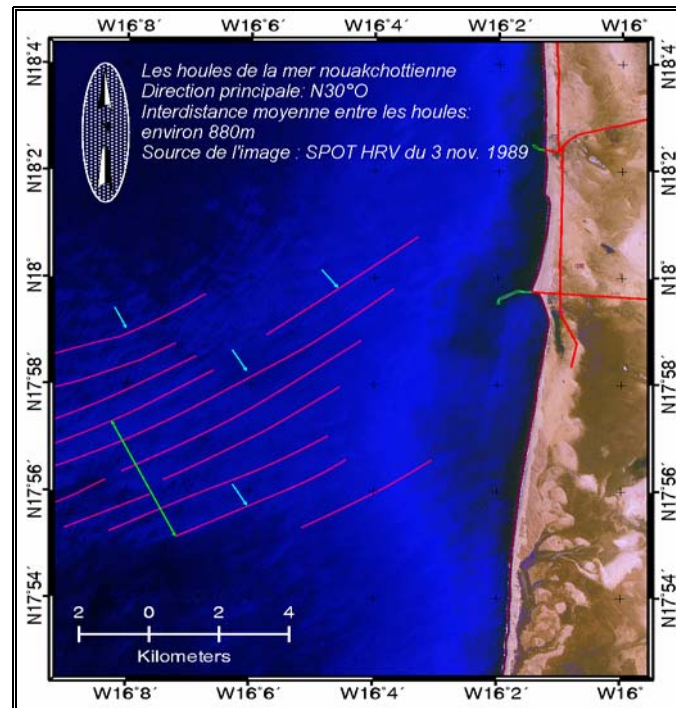


Figure III-6 : Propagation des vagues (30°O) dans l'image SPOT XS datée du 3 novembre 1989

$X = 0,0685$, $Y = 4,0960$, et $V = 0,52$ m/s pour la journée du 3 novembre 1989 ;

$X = 0,2428$, $Y = 1,9810$, et $V = 0,66$ m/s pour la journée du 4 février 1995.

Les résultats sont très proches des 0,5 m/s, rapportés par Lanjamet (1988).

Selon Dou *et al.* (1995) et Chang (1997), une telle vitesse peut mettre en mouvement des sables ayant une granulométrie de 0,01 à 4mm. Si les courants rencontrent des obstacles, par exemple des brise-lames, leurs apports peuvent être déchargés. Les vagues et leur dérive littorale ainsi que leurs déferlements modifient les rivages soit par érosion soit par accrétion.

Les marées et les courants de marée (flot et jusant), jouent aussi un rôle non-négligeable dans une telle modification des rivages. Du fait du marnage microtidal (hauteur moyenne de la haute mer inférieure à 2 m, Lanjamet, 1988 et tableau 3-1) et de la faible pente infralittorale de la côte nouakchottienne, l'énergie de marée peut facilement se dissiper à l'avant-côte. Les actions des marées seraient ainsi moins importantes que celles des vagues.

La construction du Port de l'Amitié a sensiblement modifié le sens local des vagues et des courants (figure III-7b et III-7c). C'est pourquoi l'accrétion à l'amont et l'érosion à l'aval du port se sont produites. Un épi a été construit pour protéger la plage contre la progression de l'érosion. Cependant, il a causé un retrait important de la terre en changeant la direction des vagues de NWW à NEE comme l'a fait le port (figure III-7b et III-7c).

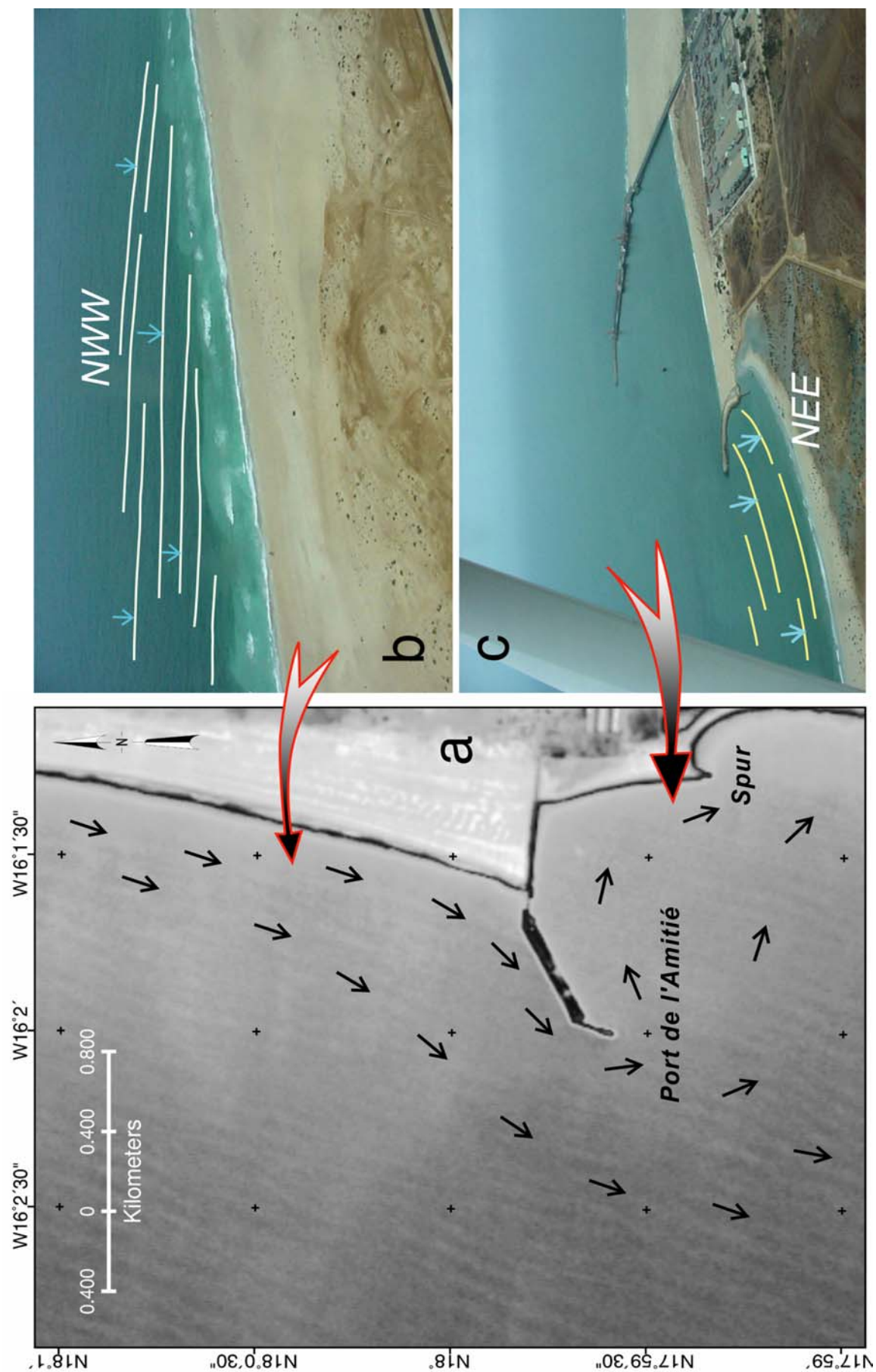


Figure III-7: Direction des vagues sur l'image SPOT (a) et les photos aériennes (b, c)

La direction de vagues observée sur l'image Pan (février 1995) est d'environ 60°O et celle en arrière de l'épi sur la photo (c) est orientée NEE. Les flèches sur l'image (a) représentent la direction du courant.

ANALYSE DE L'ÉROSION A L'AVANT

L'érosion côtière est contrôlée par les facteurs hydrodynamiques liés aux vagues et aux courants. En raison de la difficulté d'évaluation quantitative de ces paramètres, une analyse mathématique simple est donc appliquée, pour cerner l'évolution côtière potentielle, en supposant que l'érosion de plage est en progression géométrique.

A partir des traitements de télédétection, mentionnés ci-dessus, les distances et les taux d'érosion terrestre, le long des directions normales à la côte au cours des périodes 1989-1995 et 1995-2001, ont été mesurés pour chaque point d'observation (tableau 3-6, figure III-8). On trouve que les taux d'érosion annuelle de 1995-2001 sont globalement un peu moins que ceux de 1989-1995. L'abrasion semble à se ralentir. Dans un avenir proche, la vitesse d'érosion sera estimée si l'on peut déterminer la tendance de ralentissement. La conception de progression géométrique est introduite pour estimer les taux d'érosion future. Par exemple, $a : b = b : c$, on dit a , b et c sont une série de progression géométrique.

Comme indiqué dans le tableau 3-6, les totaux des taux d'érosion annuelle (Σ Taux annuel de 1989-1995 et Σ Taux de 1995-2001) sont calculés. Le ratio des taux de différentes périodes est donc :

$$\begin{aligned} \text{Ratio} &= \frac{\Sigma \text{ Taux d'érosion annuelle de 1989-1995}}{\Sigma \text{ Taux d'érosion annuelle de 1995-2001}} \\ &= \frac{720,54}{696,34} \\ &= 0,97 \end{aligned}$$

Comme supposé par la définition de progression géométrique, le ratio des taux de 2001-2010 et de 1995-2001 reste le même que celui de 1995-2001 et 1989-1995. Donc les taux d'érosion annuelle, le long des directions normales de la côte pour la période de 2001-2010, peuvent être estimés comme suit :

$$\text{Taux d'érosion annuelle potentielle de 2001-2011} = \text{Taux d'érosion annuelle 1995-2001} * 0,97$$

Les distances éventuelles d'érosion de la côte, pour la période 2001-2011, sont ainsi calculées et configurées dans le tableau 3-6 et la figure III-8.

Cette analyse indique qu'environ 0,91 km² de terre disparaîtront du fait de l'abrasion maritime pendant la période de 2001 à 2011. La régression maximale atteindra probablement 277 m (à l'échantillon N°9) et le littoral, derrière l'épi, présentera un retrait significatif vers le nord et le nord-est (points d'échantillonnage N° 1, 2, 3 et 4) en raison de la diffraction des vagues.

Tableau 3-6: Erosion de plage à l'aval du port

Numéro d'observation	Distance du Port (km)	Erosion du 1989 à 1995 (m)	Taux d'érosion annuelle de 1989 à 1995 (m/a)	Erosion de 1995 à 2001(m)	Taux d'érosion annuelle de 1995 à 2001(m/a)	Taux d'érosion potentielle de 2001 à 2010 (m/a)	Distance potentiellement érodée de 2001 à 2011 (m)
0	0,75	22,74	4,33	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,78	97,65	18,60	45,31	7,55	7,33	73,25
2	0,83	134,10	25,54	66,99	11,17	10,83	108,30
3	0,88	161,66	30,79	75,13	12,52	12,15	121,46
4	0,94	184,86	35,21	83,36	13,89	13,48	134,77
5	1,00	194,99	37,14	92,41	15,40	14,94	149,40
6	1,15	206,36	39,31	118,03	19,67	19,08	190,82
7	1,36	216,85	41,30	136,62	22,77	22,09	220,87
8	1,58	199,23	37,95	162,45	27,08	26,26	262,63
9	1,80	186,34	35,49	171,66	28,61	27,75	277,52
10	2,08	182,81	34,82	157,72	26,29	25,50	254,98
11	2,30	173,88	33,12	158,09	26,35	25,56	255,58
12	2,55	165,80	31,58	148,86	24,81	24,07	240,66
13	2,72	147,55	28,10	149,27	24,88	24,13	241,32
14	2,86	135,14	25,74	146,22	24,37	23,64	236,39
15	3,00	128,87	24,55	135,96	22,66	21,98	219,80
16	3,18	116,24	22,14	140,79	23,47	22,76	227,61
17	3,38	105,06	20,01	131,34	21,89	21,23	212,33
18	3,51	103,78	19,77	128,50	21,42	20,77	207,74
19	3,72	86,00	16,38	129,30	21,55	20,90	209,04
20	3,96	71,49	13,62	120,00	20,00	19,40	194,00
21	4,03	59,89	11,41	117,98	19,66	19,07	190,73
22	4,19	53,59	10,21	111,26	18,54	17,99	179,87
23	4,26	50,14	9,55	105,43	17,57	17,04	170,45
24	4,33	42,30	8,06	107,92	17,99	17,45	174,47
25	4,45	36,67	6,98	101,75	16,96	16,45	164,50
26	4,59	36,92	7,03	92,92	15,49	15,02	150,22
27	4,72	32,12	6,12	89,61	14,94	14,49	144,87
28	4,82	31,71	6,04	82,83	13,81	13,39	133,91
29	4,90	29,13	5,55	83,05	13,84	13,43	134,26
30	5,01	25,82	4,92	82,76	13,79	13,38	133,80
31	5,13	23,88	4,55	78,48	13,08	12,69	126,88
32	5,23	25,20	4,80	73,99	12,33	11,96	119,62
33	5,33	27,88	5,31	72,62	12,10	11,74	117,40
34	5,43	30,78	5,86	68,45	11,41	11,07	110,66
35	5,55	29,43	5,61	65,00	10,83	10,51	105,08
36	5,66	32,11	6,12	60,92	10,15	9,85	98,49
37	5,74	36,64	6,98	58,40	9,73	9,44	94,41
38	5,85	34,59	6,59	53,97	9,00	8,73	87,25
39	5,92	34,94	6,66	46,63	7,77	7,54	75,39
40	6,02	30,69	5,85	44,16	7,36	7,14	71,39
41	6,09	29,05	5,53	41,57	6,93	6,72	67,20
42	6,18	27,96	5,33	40,33	6,72	6,52	65,20
Total			720,54		696,34		

ESPERANCE DE VIE DU PORT DE L'AMITIE

La durée de vie du port dépend principalement de la profondeur de son bassin. La dérive littorale déposera la majeure partie de ses sédiments dans le port en raison de la diffraction et de l'affaiblissement du courant quand l'accrétion sur la plage à l'amont parviendra à son point maximal. Cela mènera graduellement à une fin de service du port si une ingénierie de dragage n'est pas menée. Le point important à analyser est la méthode pour évaluer cette limite d'accrétion maximale.

L'extension de la plage du nord vers la mer et ses taux d'accrétion selon la direction normale au trait de côte ont été mesurés (tableau 3-7).

Tableau 3-7 : Données d'accrétion à l'amont du port

N° échantillon nage	Distance du point échantillonné au port (km)	Accrétion (m)			Accrétion totale (m)	Taux d'accrétion de 1989 à 2001 (m/a)	Distance de la côte 2001 à celle de maximum engraissement (m)	Temps nécessaire (a)
		89-95	95-99	99-01				
1	0,04	185,20	121,90	33,79	340,89	30,44	422	13,86
2	0,13	182,43	123,65	35,90	341,98	30,53	429	14,05
3	0,23	175,83	119,16	40,35	335,34	29,94	423	14,13
4	0,34	185,01	110,51	44,71	340,23	30,38	423	13,92
5	0,44	188,08	104,38	52,29	344,75	30,78	421	13,68
6	0,55	188,99	98,99	59,48	347,46	31,02	406	13,09
7	0,67	188,79	90,24	63,36	342,39	30,57	405	13,25
8	0,80	180,07	93,33	67,18	340,58	30,41	398	13,09
9	0,93	168,90	101,26	68,19	338,35	30,21	385	12,74
10	1,06	162,77	100,49	60,57	323,83	28,91	378	13,07
11	1,20	155,87	101,57	61,02	318,46	28,43	373	13,12
12	1,30	145,03	99,77	62,36	307,16	27,43	361	13,16
13	1,41	139,82	96,43	60,59	296,84	26,50	354	13,36
14	1,53	133,33	94,57	62,71	290,61	25,95	353	13,60
15	1,63	121,61	94,79	66,09	282,49	25,22	344	13,64
16	1,73	113,20	99,29	59,20	271,69	24,26	325	13,39
17	1,84	100,50	100,08	54,87	255,45	22,81	315	13,81
18	1,94	93,88	111,13	49,16	254,17	22,69	302	13,31
19	2,04	88,85	102,23	52,94	244,02	21,79	288	13,22
20	2,13	76,68	100,64	51,22	228,54	20,40	273	13,38
21	2,22	72,10	100,51	52,01	224,62	20,06	266	13,26
22	2,32	70,20	94,15	49,94	214,29	19,13	266	13,90
23	2,42	75,02	95,85	45,63	216,50	19,33	257	13,29
24	2,5	77,85	95,31	43,15	216,31	19,31	245	12,68
25	2,61	75,12	87,33	44,37	206,82	18,47	240	13,00
26	2,71	79,20	83,85	46,12	209,17	18,68	226	12,10
27	2,83	71,39	79,72	39,22	190,33	16,99	219	12,89
28	2,93	60,74	79,38	38,38	178,50	15,94	206	12,93
29	3,05	49,81	75,03	39,35	164,19	14,66	204	13,91
30	3,16	29,57	73,37	34,92	137,86	12,31	177	14,38

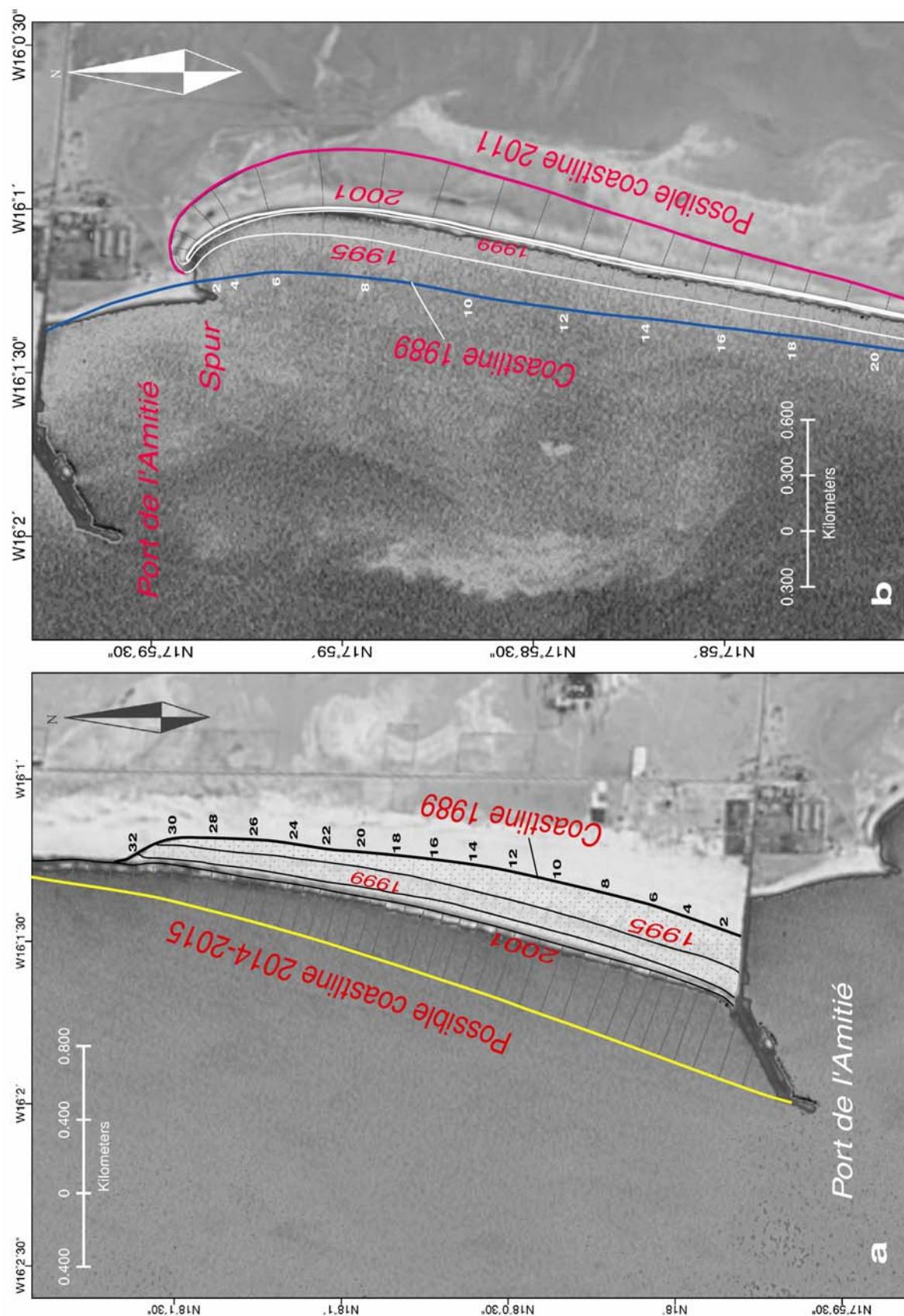


Figure III-8 . Position potentielle du trait de côte autour du Port de l'Amitié dans un avenir proche
a : l'accrétion sur la plage au nord du port devrait arriver à sa limite maximale dans $13,4 \pm 0,5$ ans (2014-2015).
b : la position du trait de côte estimée au sud du port en 2011.

D'après nos connaissances sur l'extension passée et les courants côtiers, une limite probable d'augmentation maximale est présentée dans la figure III-8a. Le temps prévu pour que l'extension atteigne cette limite est, en fait, celui pendant lequel le port pourrait rester en service, ou plutôt, l'espérance de vie du port. Cette durée a été calculée en employant les taux d'accrétion moyens antérieurs (tableau 3-7) ; elle est comprise entre 12,10 et 14,38 années avec une moyenne de 13,4 et un écart type de 0,5.

C'est-à-dire que la plage du Nord connaîtrait sa limite d'accumulation dans environ $13,4 \pm 0,5$ ans (2014-2015), avec 1,3 km² de nouvelle plage construite. Le port atteindrait alors la fin de son service. En effet, la dérive littorale se déchargerait alors, en grande partie, dans le bassin et, en l'absence de nouvelles mesures, le port serait abandonné.

4. EVALUATION DU SUIVI DE CHANGEMENT COTIER

Les données multi-temporelles de SPOT Pan et XS (1989, 1995, 1999 et 2001) ont été utilisées pour détecter les changements géomorphologiques du littoral par la méthode de la soustraction d'images, pour évaluer la durée de vie du port et prédire la tendance d'érosion, autour du Port de l'Amitié à Nouakchott. Les résultats acquis semblent cohérents et les approches et les techniques adaptées à ce type de recherche. Quelques points dignes d'intérêt sont exposés comme suit :

(1) Au cours de la détection des changements, trois facteurs peuvent produire des résultats inexacts :

Premièrement la rectification image par image dont l'erreur de RMS doit être déterminée par une petite valeur ($< 0,5$ pixel), lesquelles dans notre recherche sont de 0,21 à 0,33 pixel.

Le deuxième facteur concerne l'effet de marée dans les zones côtières. Comme cela a été démontré dans le tableau I, la différence significative de niveau de marée se distingue entre l'image de 1999 et celle de 1995. Donc l'erreur de soustraction pourrait s'y produire. Cependant, une différence de 0,61m en marnage provoquerait, sur la pente du cordon allant de 10° à 20° (Philippon, 1999), une erreur de 0,008-0,015 km² pour la plage nord et de 0,015-0,030 km² pour la plage sud. Cela est compris dans l'intervalle d'erreur tolérée (tableau 3-5).

Le troisième facteur est la zone du déferlement qui apparaît comme brillante sur les images Pan et XS et se confond facilement avec la plage. Il est donc nécessaire de l'exclure avant la mise en œuvre du processus de soustraction d'images.

De cette façon, les résultats de la détection de changement et de leur suivi sont convaincants et pertinents.

(2) L'analyse de chaîne de Markov a été également appliquée pour évaluer la tendance d'évolution du littoral dans notre étude. Cependant, il reste encore à améliorer, aux niveaux théoriques et pratiques, le modèle lui-même.

(3) Les courants côtiers et, en particulier, la dérive littorale, engendrés par les vagues du nord-ouest, prédominant du nord au sud, le long la côte, avec une vitesse de 0,52 – 0,66 m/s. Ils jouent un rôle primordial dans l'évolution de la morphologie du littoral à Nouakchott. De tels courants peuvent mettre en mouvement des sables d'une granulométrie de 0,01-4 mm et les déposer quand ils ralentissent ou changent de direction près d'un obstacle. C'est la raison de l'érosion et de l'accrétion littorales dans le site d'étude.

La compréhension des particularités des vagues et des courants dans le secteur du port est un impératif pour évaluer l'évolution du littoral.

IV. CONCLUSIONS

La télédétection et les techniques des GIS combinées avec des données démographiques sont appliquées à la surveillance du changement de l'environnement urbain et à l'analyse d'évolution côtière. Cette étude prouve que les résultats acquis semblent conformes à la réalité ; la méthodologie et les techniques paraissent adaptées et efficaces pour ce type de recherche. Les résultats obtenus ainsi que quelques propositions sont maintenant présentées :

(1) Comme une étoile à cinq branches se prolongeant à l'est, au sud, au nord et à l'ouest (Figure III-2), la ville a augmenté sa superficie de 36 km² avec un taux de croissance annuel de 5,3 % et un taux d'extension de 3,6 km²/a entre 1989 et 1999, correspondant à une croissance de la population de 380,000 habitants. La densité démographique était de 7,650 habitants/km² en 1989 alors qu'elle atteint le chiffre de 8,890 habitants/km² en 1999 (calculé à partir des tableaux 3-2 et 3-3). Une telle extension ne serait pas anormale pour une ville se développant dans une plaine fertile, mais elle est trop rapide et trop dense pour une ville prise en tenaille entre le désert et l'océan. ***C'est un fardeau lourd à porter pour une terre stérile déjà surexploitée.***

La croissance démographique est la dynamique principale conduisant à cette expansion urbaine rapide de Nouakchott.

(2) Trois degrés de risque d'inondation par la mer ont été identifiés. Le futur plan d'urbanisation devra éviter ces zones. Une véritable politique urbaine, maîtrisant les ressources en eau, le contrôle de

la population urbaine et le choix des secteurs susceptibles d'être urbanisés, est vivement recommandée pour améliorer notablement la situation actuelle et pour juguler l'expansion future de la ville.

(3) Du fait de la construction du Port de l'Amitié en 1987, la plage du nord s'est étendue de 0,92 km² avec un taux d'extension de 0,08 km²/a et connaîtra une autre augmentation de quelque 1,32 km² lorsque cette accrétion aura atteint sa limite dans $13,4 \pm 0,5$ années (2014-2015). A ce stade, les apports de la dérive littorale aboutiront principalement dans le bassin. En l'absence de mesures, le port arrivera alors en fin de service.

(4) La dune de sable au sud a été érodée de 1,34 km² avec un taux d'érosion de 0,12 km²/a. La construction de l'épi en 1991 n'a pas stoppé l'érosion de la plage mais accéléré le recul du trait de côte vers l'intérieur des terres en raison de la modification de l'orientation des vagues et des courants. Le retrait maximum mesuré de 1989 à 2001 est de 362m et son potentiel estimé à 277 m pour la période 2001-2011. Ainsi 0,91 km² de terre serait encore érodés par la mer lors des dix prochaines années.

(5) Les courants côtiers et, en particulier, la dérive littorale, engendrés par les vagues du nord-ouest, prédominent au nord au sud le long la côte avec une vitesse de 0,52 – 0,66 m/s. Ils jouent un rôle primordial dans l'évolution de la morphologie du littoral à Nouakchott. De tels courants peuvent mettre en mouvement des sables d'une granulométrie de 0,01-4 mm et les déposer quand ils ralentissent ou changent de direction lors d'un obstacle. C'est la raison de l'érosion et de l'accrétion littorales dans le site d'étude.

La compréhension des particularités des vagues et des courants dans le secteur du port est un impératif pour évaluer l'évolution du littoral.

Ces changements côtiers ont provoqué une modification sérieuse de l'environnement littoral et urbain à Nouakchott. Tout futur aménagement côtier devrait tirer une leçon de cet avertissement.

REMERCIEMENTS

L'auteur veut remercier Monsieur le professeur G. Béné pour sa suggestion quant à la composition de ces articles.

Chapitre IV : Etude de cas n°2

SUIVI ET MODELISATION DU CHANGEMENT ENVIRONNEMENTAL AU NINGXIA NORD^①

① Modifié et résumé d'après (1) *Weicheng Wu*, Eric F. Lambin and Marie-Françoise Courel, **Land use and cover change detection and modelling for north Ningxia, China**, *Proceedings of Map Asia*, Bangkok, Thailand, Aug. 6-9, 2002, <http://www.gisdevelopment.net/application/environment/overview/envo0008.htm> et (2) *Weicheng Wu* and Wenfeng Zhang, Present land use and cover patterns and their development potential in north Ningxia, *Journal of Geographical Sciences*, Vol.13, No.1, p.54-62, 2003.

RESUME: Ce chapitre rassemble une recherche synthétique sur la recherche en ressource actuelle du sol, la détection du changement environnemental, la surveillance et la modélisation au Ningxia Nord par une méthodologie de géomatique composée de la télédétection, des GIS et du modèle de régression multivariée. Les données de télédétection multi-temporelles (Landsat TM 1987, 1989 et ETM 1999) et les données socio-économiques, au niveau du département (*county*), pour la période correspondante ont été utilisées. Les objectifs de l'étude sont de produire les données fondamentales de changement d'utilisation du sol, de comprendre les forces d'entraînement et le mécanisme du changement environnemental, et de développer un système de surveillance dynamique visant à fournir les références utiles aux gouvernements locaux pour leur prise de décision dans le domaine de la planification de l'exploitation durable du sol. Les résultats prouvent que 11,7 % de la terre a changé dans le Ningxia nord pendant les 12 dernières années. L'extension des surfaces vivrières (à un taux de changement de 39,3 km²/an ou de 1,5 %) est la modification prédominante de l'environnement rural (471 km² en superficie, 49,3 % du changement total), la croissance relative associée de PIB occupe seulement 11,6 % ; l'extension urbaine (35,8 km²) avec un taux d'augmentation de 3,0 km²/a ou de 2,2 %), ne représente que 3,6 % de tout le changement, alors que l'augmentation relative de production représente 88,4 % de croissance du PIB. On n'a pas observé de désertification du sol mais une dégradation environnementale (sur une surface de 55,5 km²) a évidemment eu lieu à un taux de changement de 4,6 km²/a, elle est due au développement industriel et à l'urbanisation. Le cours du Fleuve Jaune avait diminué depuis 1987 avec un taux de réduction de 6,1 % et il devrait probablement être complètement asséché en 2010. La modélisation de régression indique que chaque type de composantes environnementales a ses déterminants spatiaux et chaque type de changement est associé à certaines forces d'entraînement socio-économiques. Les analyses d'interaction homme-environnement nous permettent de mieux comprendre le mécanisme de l'évolution environnementale.

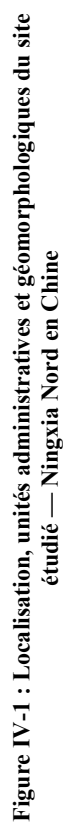
MOTS CLES : Détection de changement environnemental, suivi, modélisation, ressources actuelles du sol, données de Landsat TM et ETM+, données socio-économiques, analyse de panel et analyse transversale, forces

d'entraînement, déterminant spatial, relation homme-environnement, Ningxia Nord, Chine.

I. INTRODUCTION

Le Ningxia Nord, s'étend de la longitude 105°45'E à la longitude 107°00'E et de la latitude 38°20'N à la latitude 39°30'N et incluant 50% des Montagnes de Helan et 80% de la Plaine de Yinchuan. Entourée par la Mongolie intérieure à l'est, au nord et à l'ouest (figure IV-1), c'est une région aride de Chine du Nord-Ouest. Les précipitations annuelles ont varié de 78 à 295mm (le maximum, 430 mm, se produit dans les Montagnes de Helan), l'évaporation annuelle de 1473 à 2318 mm et la température moyenne annuelle de 8,2°C à 9,6°C, lors des dernières décennies (Ningxia Statistical Yearbook, 1988, 1990, 1992, 1997 et 2000). L'analyse des données météorologiques de la deuxième moitié du siècle dernier indique que la température moyenne annuelle a augmenté et que les précipitations ont diminué dans la région de Yinchuan. Le climat semble de plus en plus sec et chaud et les conditions naturelles de plus en plus rudes.

L'utilisation du sol, en particulier, en agriculture, a une longue histoire dans cette région. Dès 35 000 à 25 000 avant JC, l'homme pratiquait déjà ces activités (Geng *et al.*, 1992). Dans la dynastie de Qin (221 à 207 avant JC), le premier canal d'irrigation a été mis en place. Ceci indique les débuts d'une ère agricole dans la plaine de Yinchuan. Lors des dynasties successives, Han (206 avant JC à 220 après JC) et Tang (618 à 907), le système d'irrigation s'est développé et amélioré. Mais, en raison des fréquentes guerres et des émigrations à grande échelle tout au long de l'Histoire (Geng *et al.*, 1992), il n'a connu un développement stable que lors des dernières décennies. Avec l'application de la politique "*réformer-et-ouvrir*" dans les années 80 en Chine, les changements d'utilisation du sol et de la couverture ont eu lieu très rapidement du fait des développements industriels, des croissances agricoles et de population. Récemment, avec la multiplication des programmes de développement du gouvernement central chinois Ningxia Nord devient un site pilote, pour la région du Nord-Ouest. Il est donc primordial d'entreprendre une recherche synthétique sur l'utilisation et l'occupation du sol, l'identification et la mesure des changements, l'analyse de force d'entraînement et le développement d'un système de surveillance dynamique afin de produire des données fondamentales et des références utiles aux gouvernements locaux pour leur planification d'une utilisation durable du sol. C'est l'objectif de la recherche et l'une des tâches programmées dans le projet de coopération Sino-Belge sur la Chine du Nord-Ouest.



Conformément à l'exécution de la nouvelle politique d'utilisation des sols dans les années 80 en Chine, la période de 1979 à 1999 a été choisie pour effectuer une détection de changement d'utilisation du sol, surveiller et modéliser le processus en utilisant les données de télédétection multi-temporelles (Landsat TM datées de 1987 et 1989, ETM 1999), les données socio-économiques et météorologiques au niveau de département (*county*) et les logiciels tel que le PCI, l'ER Mapper, le SYSTAT/SAS et l'ArcView GIS.

II. METHODOLOGIE

Ainsi que cela est décrit dans le chapitre II, l'approche synthétique multidimensionnelle depuis l'espace jusqu'au sol et des activités humaines jusqu'aux changements environnementaux (figure II-2 en chapitre II), a été légèrement modifiée pour s'adapter aux particularités du secteur étudié. Cette approche est présentée dans la figure IV-2.

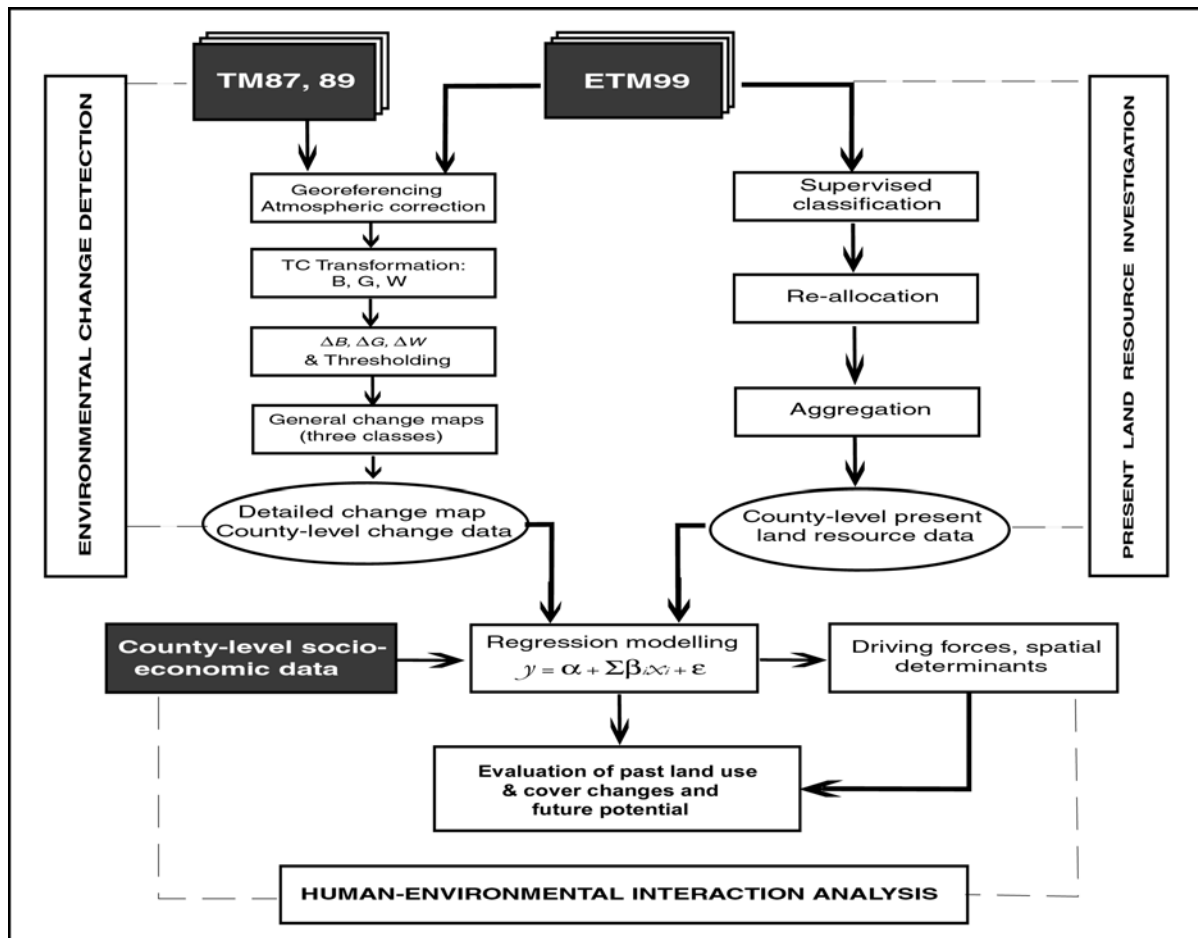


Figure IV-2 : Méthodologie adoptée dans cette étude

III. DISCRIMINATION DES CHANGEMENTS

Grâce à leurs avantages quant à l'observation macroscopique et multi-temporelle, les données de télédétection sont certainement idéales pour obtenir l'information du changement physique de l'environnement. Comme nous l'avons vu dans le chapitre II, il existe plusieurs approches pour y parvenir. Les plus fréquemment utilisées sont la comparaison de post-classification — visant à découvrir la différence entre les images classifiées de deux dates différentes (Weismiller *et al.* 1977, Singh, 1989) et le differencing ou différenciation d'image (Ingram *et al.*, 1981 ; Toll *et al.*, 1980 ; Jensen *et al.*, 1982 ; Quarmby *et al.*, 1989 ; Singh 1989 ; et Lambin *et al.*, 1994). Cette dernière a été adoptée, dans notre étude, pour produire les cartes générales de changement.

1. PROCEDURES

Les procédures pour discerner le changement environnemental sont présentées ci-dessous :

(1) Enregistrement image par image

Les données de télédétection (TM1987, 1989 et ETM1999) ont été géométriquement corrigées par les cartes topographiques d'une échelle de 1/200 000 à 1/300 000 en datum WGS84 et projection UTM (48) en utilisant le modèle polynomial (3^{ème} ordre) et le ré-échantillonnage bilinéaire. Les erreurs de RMS de la rectification d'image par image sont comprises entre 0,53 et 0,58 pixels.

(2) Correction atmosphérique

Certains, modèles basés sur la mesure *in-situ*, capables de produire une correction atmosphérique idéale ne peuvent être appliqués à notre étude de cas du fait de l'indisponibilité des paramètres atmosphériques pendant le passage des satellites et des programmes de traitement associés. Une approche intégralement centrée sur l'image a donc été utilisée pour cette recherche en s'appuyant sur les travaux de Crist *et al.* (1984a, 1984b et 1986a) et de Chavez (1988 et 1996).

Ainsi que nous l'avons présenté dans le Chapitre II, Chavez a proposé un modèle de DOS (dark-object subtraction) (1975, 1988) et sa version améliorée — le modèle de COST (1996). Une spécificité de sa méthode est de quantifier la valeur de brume à éliminer. Le moyen traditionnel pour obtenir cette valeur est de mesurer la radiance sur les zones d'eau claire profonde ou ombragées, dans les images où la valeur de la radiance dans le proche infrarouge est de zéro ou proche de zéro. Toute valeur au-dessus de zéro est considérée comme un résultat de la dispersion et de la radiation de parcours. Un tel enlèvement de brume produit souvent une surcorrection et n'est pas applicable à une image, en l'absence d'objets foncés (Chavez, 1996). Une approche possible pour obtenir cette valeur est la

transformation de chapeau à cône. Selon Crist *et al.* (1986a), la 4^{ème} composante de cette transformation est un indicateur de brume, qui peut être exprimé par l'équation :

$$H = 0.8832 \times B1 - 0.0819 \times B2 - 0.4580 \times B3 - 0.0032 \times B4 - 0.0563 \times B5 + 0.0130 \times B7 \dots (IV-1)$$

où H est la valeur de brume de pixel.

L'équation (IV-1) produit une valeur totale de brume pour chaque pixel. En supposant que l'ensemble du lieu observé doit avoir le même contexte de brume, la moyenne des valeurs totales de brume dérivées de cette équation a donc été utilisée pour enlever l'effet de la dispersion, en s'appuyant sur le tableau 2-2 et en supposant que la scène était très claire lors de l'acquisition des images.

Sachant que les images récentes et anciennes ont été acquises respectivement le 12 août 1999 et le 20 septembre 1987/le 17 septembre 1989, il y a environ 32-35 jours de différence. L'effet dérivé de la différence de la distance Soleil-Terre et de l'angle d'altitude du soleil devrait donc également être corrigé. Le modèle de COST est ainsi employé pour corriger un tel effet et en même temps pour transformer la radiance sur-satellite en réflectance du sol. Les formules correspondantes ont été énumérées au chapitre II et les paramètres détaillés de correction et de transformation sont exposés dans l'Annexe I.

(3) Transformation de chapeau à cône

Une transformation de chapeau à cône (Crist *et al.* 1984a, b et 1986a) a été effectuée sur les images d'ETM et de TM, atmosphériquement corrigées pour réduire le volume de données et convertir les informations d'occupation des sols incluses dans les 6 bandes en 3 indicateurs: la Brillance (B), la Verdeur (G) et l'Humidité (W), qui signifient respectivement la nudité du sol, la vigueur de végétation et l'humidité du sol.

Les composantes de la transformation de chapeau à cône basée sur la réflectance (B, G et W) varient de -0.5 à 1.4. Pour faciliter le calcul, elles sont normalisées sur une échelle de 0 à 255. Les histogrammes de B et G sont présentés dans la figure IV-3.

(4) Differencing des indicateurs et seuillage (thresholding)

Le fait que la technique du differencing induise moins d'erreur au cours de la détection de changement que les autres approches (Toll *et al.*, 1980 ; Ingram *et al.* 1981 ; et Jensen *et al.*, 1982), lui permet d'être utilisée pour la distinction de la différence entre même indicateurs d'occupation du sol, par exemple G, à différentes dates. Les valeurs de soustraction (Δ) varient de -255 à 255. Elles sont normalisées sur une échelle de 0 à 255 et leurs histogrammes sont exposés en figure IV-4a (ΔB , $M = 147.794$, $\alpha = 14.41$) et IV-4d (ΔG , $M = 123.947$, $\alpha = 13.559$). Un établissement de seuil (seuillage-

thresholding) a été effectué selon le test des seuils tel qu'il est présenté dans le Chapitre II. Les seuils déterminants sont listés ci-dessous

ΔB : $M + 2,5\alpha = 183,82$ pour le changement positif, et $M - 2,75\alpha = 108,17$ pour le changement négatif ;

ΔG : $M + 2,5\alpha = 157,845$ pour le changement positif, et $M - 3\alpha = 83,27$ pour le changement négatif.

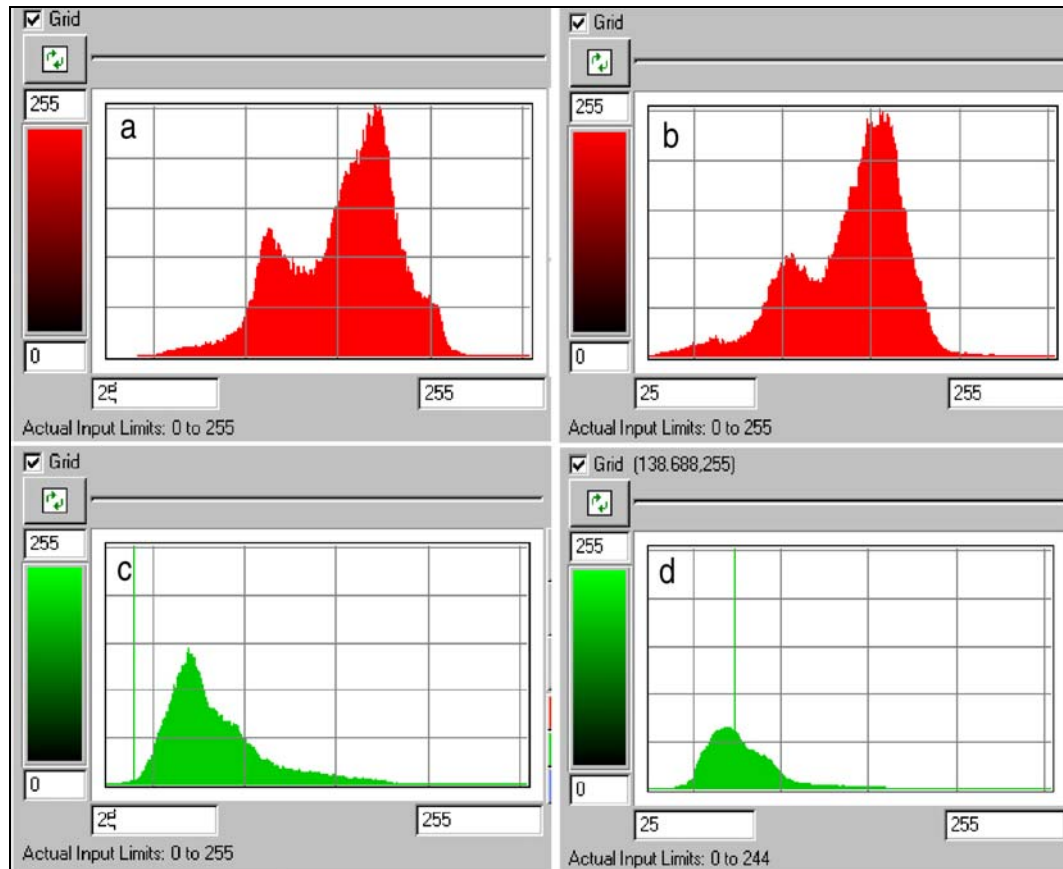


Figure IV-3 : Histogrammes des composantes de la transformation de chapeau à cône après corrections atmosphériques normalisées sur une échelle de 0-255

a : B — 1999, b : B — 1987, c : G — 1999 et d : G — 1987

Les changements positifs et négatifs sont présentés dans les figures IV-4b, 4c, 4e et 4f.

(5) Cartes de changement général

La méthode des seuils (thresholding) produit des cartes de changement général possédant trois classes : changement négatif, absence de changement et changement positif. L'indicateur ΔG , 'le changement négatif' représente une dégradation de végétation et 'le changement positif' signifie une augmentation de la vigueur végétale ou une conversion du sol nu en terrain cultivé. De la même manière, le changement positif de la carte générale de changement issue de l'indicateur ΔB implique

une augmentation de la nudité du sol (par exemple une dégradation de végétation) et le changement négatif signifie une diminution de la nudité du sol (par exemple terre convertie en dépression d'eau, ou conversion du sol nu en végétation) (figure IV-5). Pour évaluer la fiabilité des résultats, un relevé de terrain a été effectué en août 2000. Les changements vérifiés dans les agrandissements spécifiques, indiqués dans la figure IV-5, sont décrits ci-dessous :

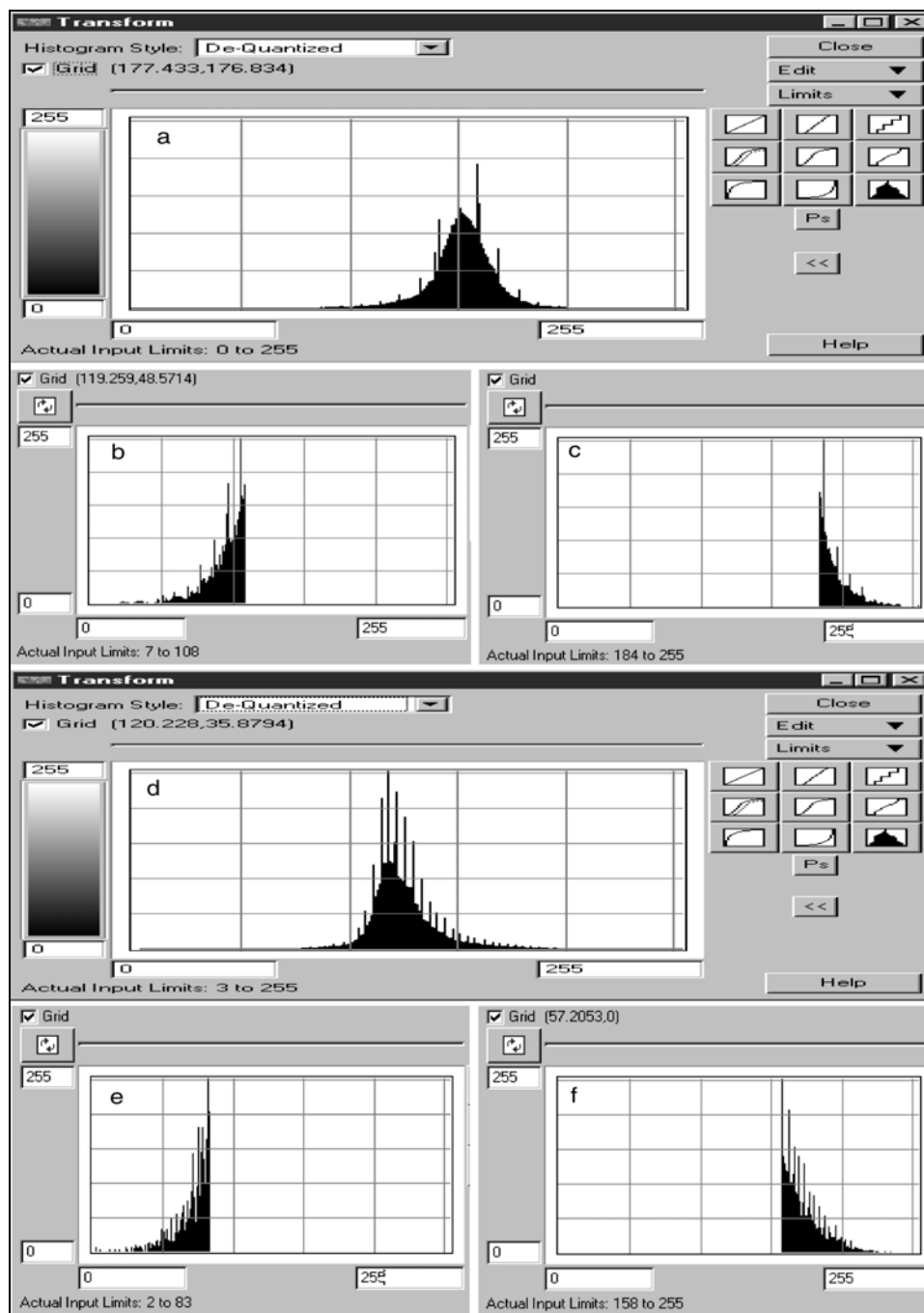


Figure IV-4 : Seuils pour déterminer le changement et non-changement

a : Différenciation de la brillance — ΔB , b : changement négatif et c : changement positif de ΔB
 d : Différenciation de la verdure — ΔG , e : changement négatif et f : changement positif de ΔG

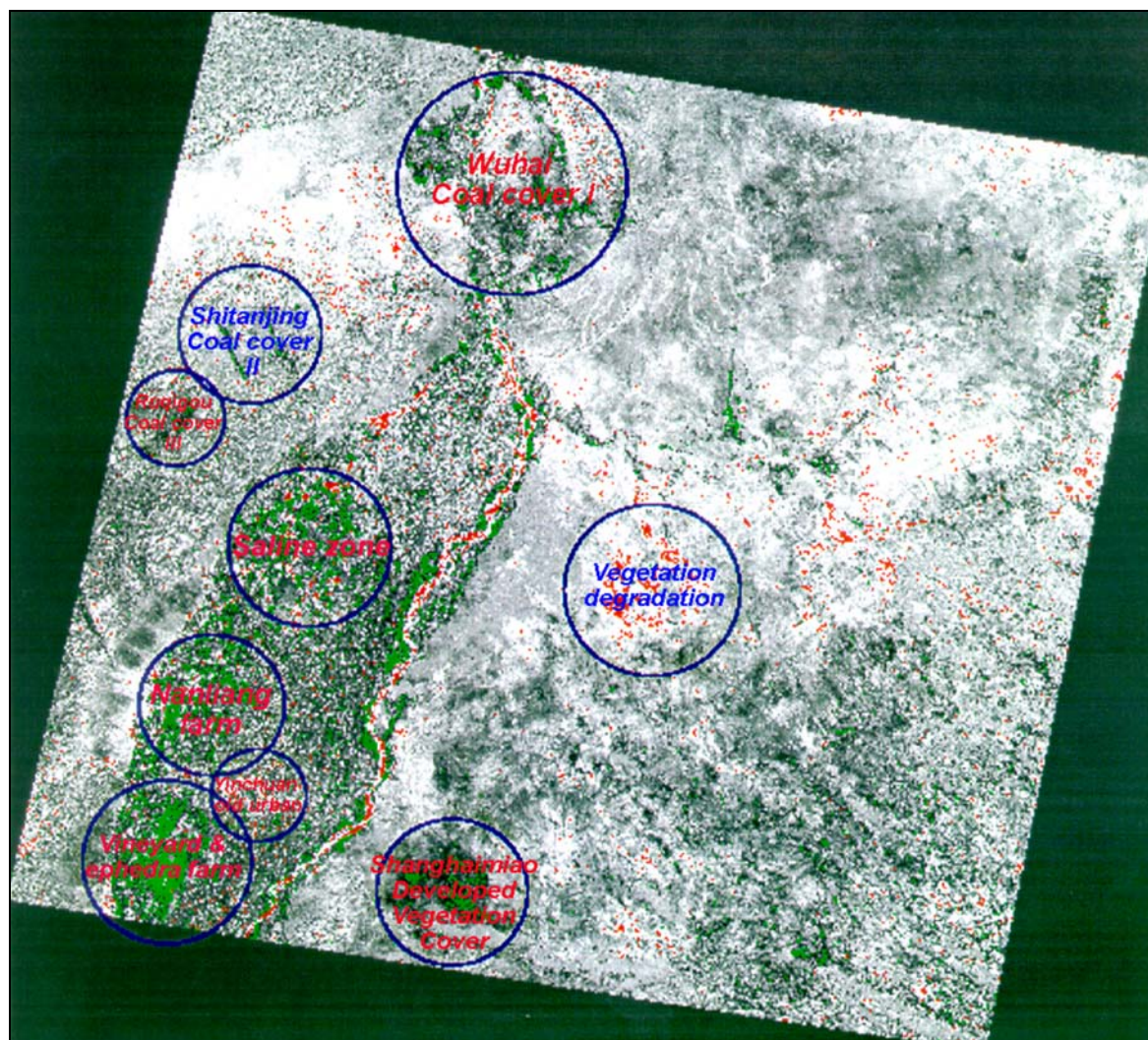


Figure IV-5 : Carte de changement général issue de la procédure des seuils sur le ΔB

Rouge: Dégradation de végétation ou conversion du sol végétal en urbain, Vert : Augmentation de la couverture végétale (extension de terrains agricoles ou augmentation de prairie artificielle).

Les cercles bleus présentent les zooms spécifiques sélectionnés pour la vérification de terrain et l'analyse détaillée.

2. CHANGEMENTS PERCEPTIBLES DANS LES ZOOMS TYPIQUES

(1) *Plantation d'éphédre et vignoble*

De grands changements ont eu lieu dans les zones de dunes de sable à 12 km au sud de la ville de Yinchuan durant la dernière décennie. La végétation a augmenté de 107,9 km² par suite du développement du vignoble, du jardin botanique et de la plantation d'éphédre (figure IV-6), une herbe médicinale chinoise. Cependant, dans le même temps, un territoire de 7,8 km² a été privé de végétation par des constructions en milieu rural et l'assèchement des lacs.

Le développement de la vigne (environ 89 km²) et des plantations d'éphédre (23 km²) dans les dunes a permis de contrôler le mouvement du sable et d'améliorer la qualité de l'environnement écologique de la ville de Yinchuan, cela a également autorisé un développement économique. Cette

expérience a été reconduite dans les autres départements du Ningxia et dans d'autres provinces du Nord-Ouest de la Chine.

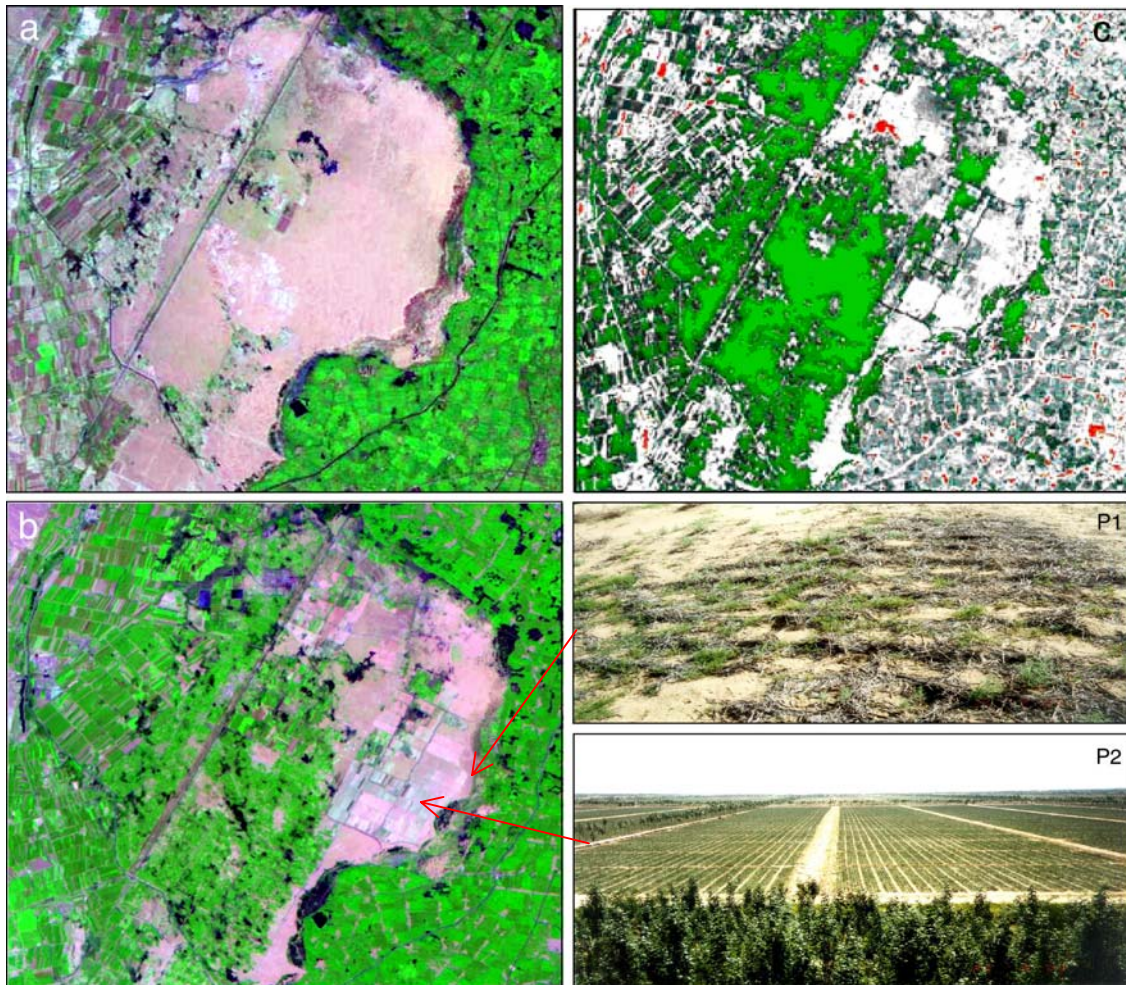


Figure IV-6 : Changement d'occupation des sols aux environs de la plantation d'éphédre et des vignobles

a : 741 composition de TM 87, b : 741 composition ETM 99, c : carte générale de changement, où Vert signifie qu'une couverture de végétation a été développée (vigne et plantation d'éphédre) ; Rouge représente une dégradation de végétation (principalement remplacée par les constructions ou l'assèchement des lacs) ; Gris représente l'absence de changement. P1 : photo de la méthode pour fixer les dunes de sables — paille de blé enterrée en carré pour contrôler le mouvement du sable (38°20.164'N, 106°11.030'E), P2 : photo de la plantation d'éphédre intercalée de peupliers (38°20.617'N, 106°09.858'E).

D'après le rapport de la compagnie de la plantation d'éphédre (Guangxia Produits Naturels Co. Ltd, août, 1999), les dunes mobiles en forme de croissant, d'une superficie de 53,3 km², étaient la principale cause de la poussière gênant la ville de Yinchuan avant cet aménagement. Leur déplacement principalement vers l'est à la vitesse de 0,8 m/an avait détruit 226,7 ha de terre agricole et des milliers de champs fertiles étaient menacés. La fixation de ces dunes a permis une transformation de zones désertiques en plantations. Les limites des plantations ont été aménagées avec de la paille de blé disposée en carrés (photo 1 dans la figure IV-5) pour fixer les dunes de sable. Dans la ferme, 2300 ha

ont été plantés en éphédre, une herbe utilisée par la médecine traditionnelle chinoise, qui, de par sa résistance à l'aridité, pousse naturellement en terre sableuse.

(2) *Extension agricole autour de la Ferme de Nanliang*

La Ferme de Nanliang se situe dans le nord-ouest des faubourgs de Yinchuan. D'un point de vue géomorphologique, c'est une zone de contact entre les cônes d'épandage d'origine pluviale des Montagnes de Helan et la plaine alluviale de Yinchuan. La terre cultivée s'est largement étendue pendant la dernière décennie. Une grande surface de sol sableux aux abords de l'ancien lit de la rivière a été récupérée et convertie en champs du maïs et de riz (à l'est du zoom). A l'ouest, la plaine sablonneuse pluviale a été transformée en terre plantée en riz, maïs et tournesol (figure IV-7).



Figure IV-7 : Changement d'occupation des sols autour de la Ferme Nanliang, nord-ouest des faubourgs de Yinchuan

Rouge : Assèchement des dépressions imprégnées d'eau ; Vert : transformation de terre nue, sableuse ou non-exploitée en terres agricoles ; Gris : aucun changement.

a : TM composition (1987), b : ETM+ composition (1999).

Les cercles rouges représentent les endroits où les photos (P1 et P2) ont été prises.

D'après l'analyse du changement, une superficie d'environ 52,3 km² a été convertie en terre cultivée (en vert sur la figure IV-7c). Plusieurs lacs ou dépressions, d'une surface totale de 2,5 km², ont été asséchés (en rouge) depuis 1987, probablement par suite d'une consommation excessive d'eau par l'irrigation.



P1: Sol nu converti en champs de tournesol
(GPS: 38°42.001' N et 106°06.793' E)

P2: Conversion du sol non-cultivé en champs de riz
(GPS: 38°40.759' N et 106°10.779' E)



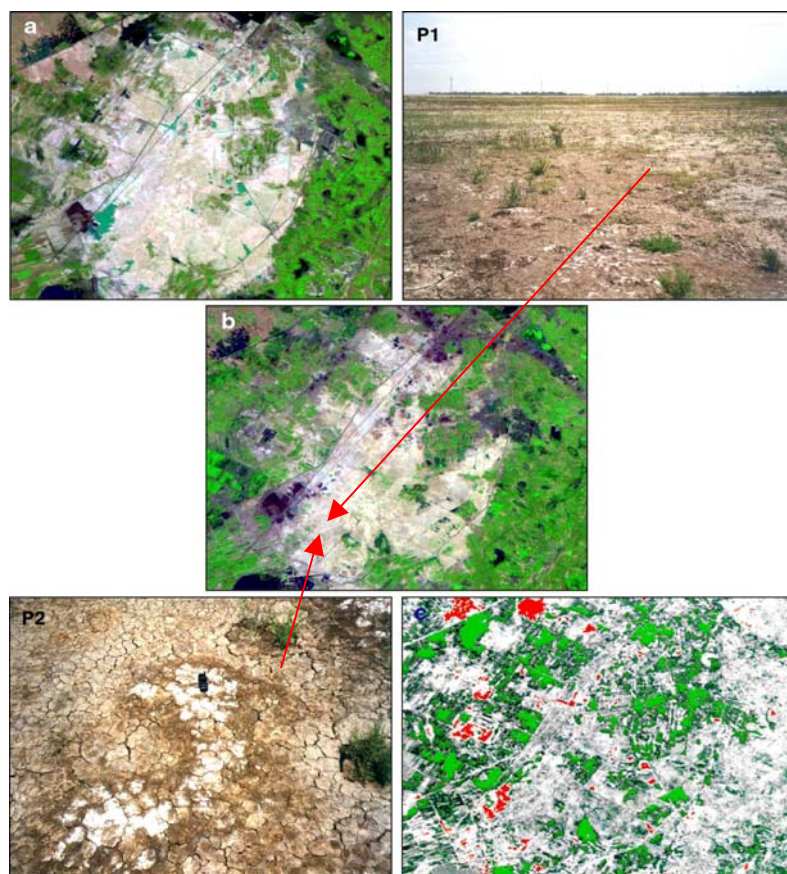
(3) La salinisation du sol dans la plaine de Yinchuan

La salinisation du sol la plus importante s'est produite dans le département de Pingluo, dans la Plaine de Yinchuan. D'après *l'Atlas Economique du Ningxia* (1990), la terre salinisée atteint, en 1987, une superficie de 495 km² dans ce département. Le zoom utilisé (figure IV-8) expose un cas typique de la salinisation dans cette région. Nous avons utilisé la méthode de comparaison entre les images classifiées pour évaluer le changement de la zone de salinisation.

L'analyse du changement révèle que, depuis 1987, quelques dépressions humides d'une surface totale de 8,7 km² ont été asséchées et qu'un espace salinisé de 33,5 km² a été converti en cultures et dépression d'eau.

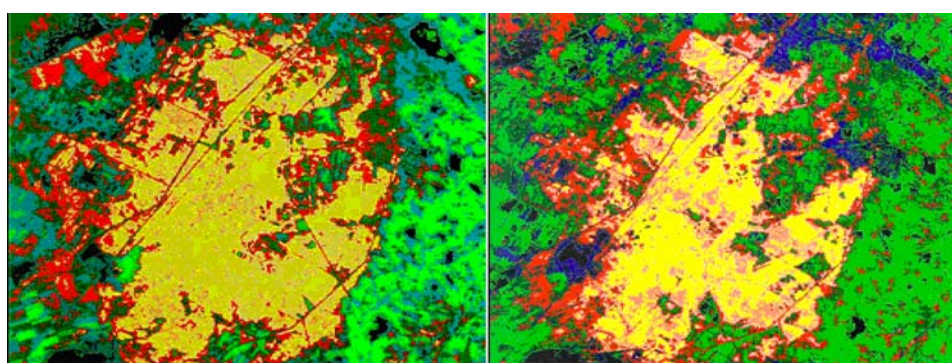
Les classifications nous permettent de distinguer les principaux types d'occupation des sols en 1987 et 1999 (figure IV-9 et tableau 4-1). Les zones salinisées paraissent avoir diminué de 15 km², alors que 17,9 km² de terres cultivables ont été urbanisées, couvertes de résidu de charbon ou transformées en marécages.

La surface de végétation totale (principalement des cultures) n'a pas beaucoup changé entre les deux dates. La réduction de la superficie de la zone salinisée pourrait être attribuée au contrôle de la salinisation au moyen de la plantation d'armoise saline, une plante adaptée à l'alimentation des moutons ainsi qu'au raffinage d'une huile végétale.



**Figure IV-8 : Evolution des zones salinisées dans la Plaine de Yinchuan issue des images
TM 1987 et 1999**

a : TM 741 composition 1987, b : ETM+ 741 composition 1999 et c : carte de changement où le Rouge montre la transformation des marais en terres et le Vert : du sol nu vers de la végétation ou des marécages. Gris : aucun changement. P1 et P2 : photos présentant la salinisation du sol, prises environ 12 heures après une averse de pluie dans le département de Pingluo. Les zones salinisées montraient une haute réflectance, diminuée après les pluies. Aucune culture ne peut être poursuivie sauf celle de plantes salinophiles, telle que *l'armoise* saline, excellent fourrage pour les ovins (GPS : 38°51.125'N et 106°21.718'E)



**Figure IV-9 : Classifications des zones salinisées en utilisant les bandes 1, 4, 7 d'images TM et ETM+ datées
1987 (gauche) et 1999 (droite)**

Surface aquatique	Végétation 1987	Végétation active
Faible végétation	Zone salinisée	Zone fortement salinisée
Sol nu et construction	Urbanisation et résidus de charbon	

Tableau 4-1 : Résultat de la classification pour les zones salinisées dans le département de Pingluo

Année	Eau	Végétation	Construction urbaine et résidu de charbon	Sol nu et construction	Zone salinisée	Total
1987 (km ²)	17,4	148,8		46,0	91,3	303,5
1999 (km ²)	17,2	148,1	17,9	44,0	76,2	303,5
Changements			+17,9		-15,0	

(4) Exploitation du sol dans l'écosystème aride (Shanghaimiao, ouest de Mu Us)

Des changements d'occupation du sol se sont également produits en milieu aride, aux environs de Shanghaimiao (figure IV-10) à l'ouest des terres arénacées du Maowusu. Des sols, nus en 1987, apparaissent couverts de végétation en 1999. D'après notre analyse, la surface se caractérisant par une augmentation de la végétation représente plus de 68,9 km² (en vert).

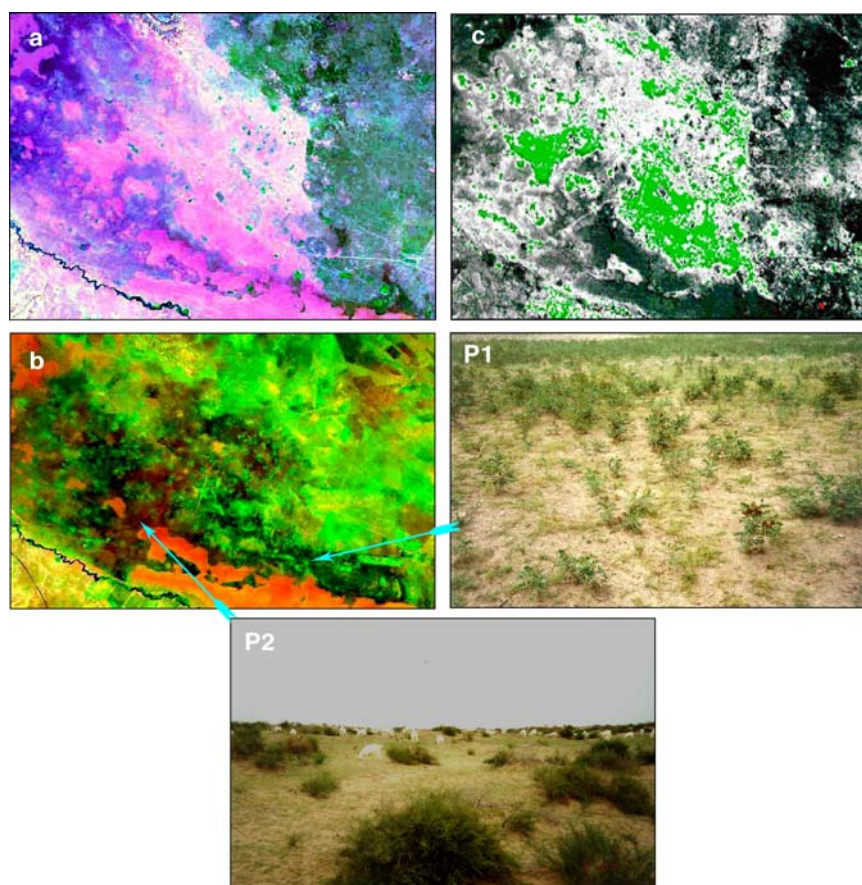


Figure IV-10 : Changement d'occupation du sol près de Shanghaimiao (une partie des terres arénacées de Mu Us)

a : TM 741 composition 1987, b : ETM + 741 composition 1999, c : carte de changement où le Vert : indique un développement de la végétation, des fermes cultivées pendant la période de 1987 à 1999 ; le Rouge: une dégradation et le Gris : aucun changement. P1: réglisse, une herbe médicinale chinoise qui pousse dans de la terre sableuse (prise en 2000)

(GPS : 38°15.111'N et 106°45.603'E) P2: pâturage de mouton au Mu Us (prise en 2000) (GPS : 38°16.169'N et 106°37.075'E)

D'après les relevés de terrain, ce changement est dû au récent développement de fermes agricoles.

(5) Exploitation du charbon dans les Montagnes Helan (Shitanjing, Hulusitai et Zongbieli)

Ce zoom illustre les changements apparus le long des sites d'exploitation du charbon dans la section nord des Montagnes de Helan (figure IV-11). Shitanjing est la plus grande mine de charbon du nord-ouest de la Chine. Avec le développement des mines et des industries du charbon, une dégradation de l'environnement s'est produite sous la forme d'une pollution de l'air et/ou de la couverture, due aux résidus de charbon aux abords des carrières et des routes. Notre étude révèle qu'une surface de terre de 6,4 km² (2,0 % de la totalité de l'agrandissement) a été recouverte d'accumulations de charbon, de gangue et de poussières dans les vallées minières (Shitanjing, Hulusitai, en vert dans la figure IV-11c, photo 1).

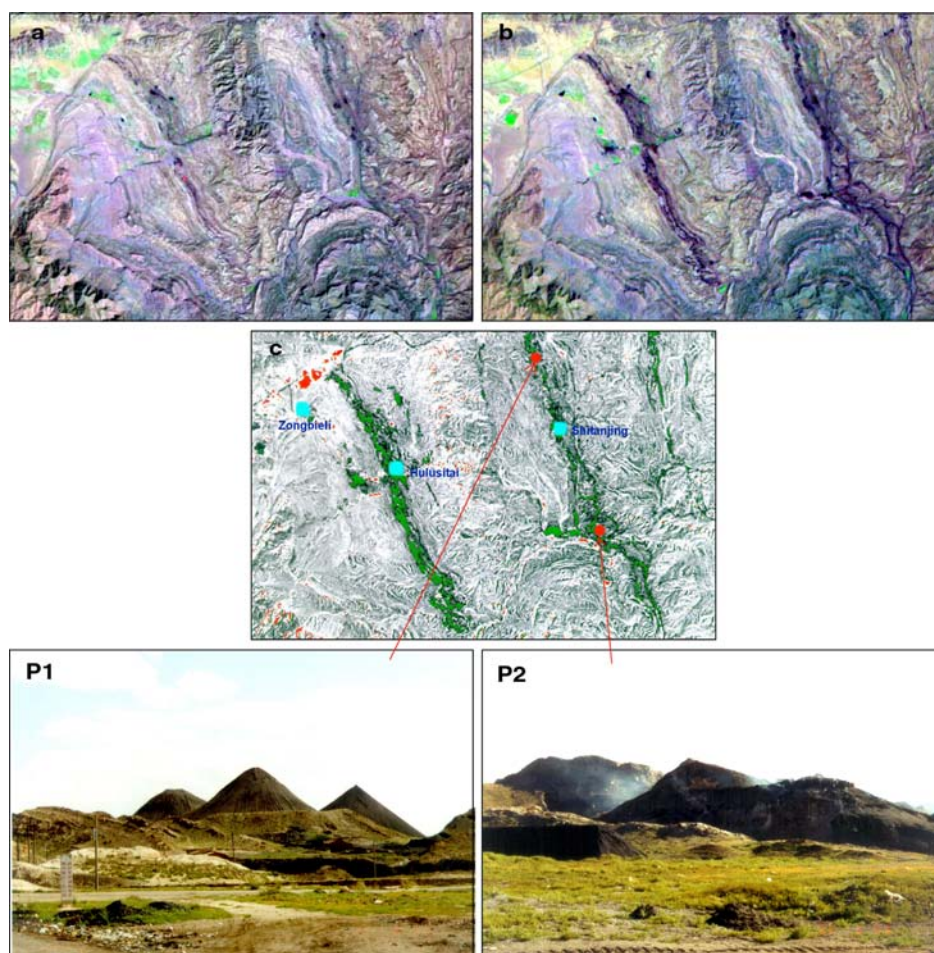


Figure IV-11 : Changement le long des vallées d'exploitation du charbon dans les Montagnes Helan

a : TM 741 composition 1987, b : ETM + 741 composition 1999, et c: carte de changement où les couleurs :
Rouge: indique la dégradation de végétation et **Vert** : la couverture par le charbon, le gangue et la poussière.

Gris : aucun changement. P1 : colline de gangue aux abords des mines au nord de Shitanjing (GPS : 39°15.986'N et 106°19.247'E), P2 : feu de charbon souterrain au sud de Shitanjing (prise en 2000) (GPS : 39°11.721'N et 106°20.968'N)

Une zone, à proximité de Zongbieli, d'une superficie de 1,8 km² (0,6 % du zoom total) encore couverte de végétation en 1987, est maintenant transformée en sol nu (en rouge, figure IV-11c).

(6) *Urbanisation autour de l'ancien district urbain de Yinchuan*

L'ancien district urbain de Yinchuan s'est beaucoup étendu de 1987 à 1999. Environ 14 km² de faubourg suburbain antérieurement couverts de végétation, d'eaux ou de sable ont été intégrés à la ville et 4,4 km² de terre nue ont été convertis en végétation, comme on peut le voir sur cet agrandissement (figure IV-12).

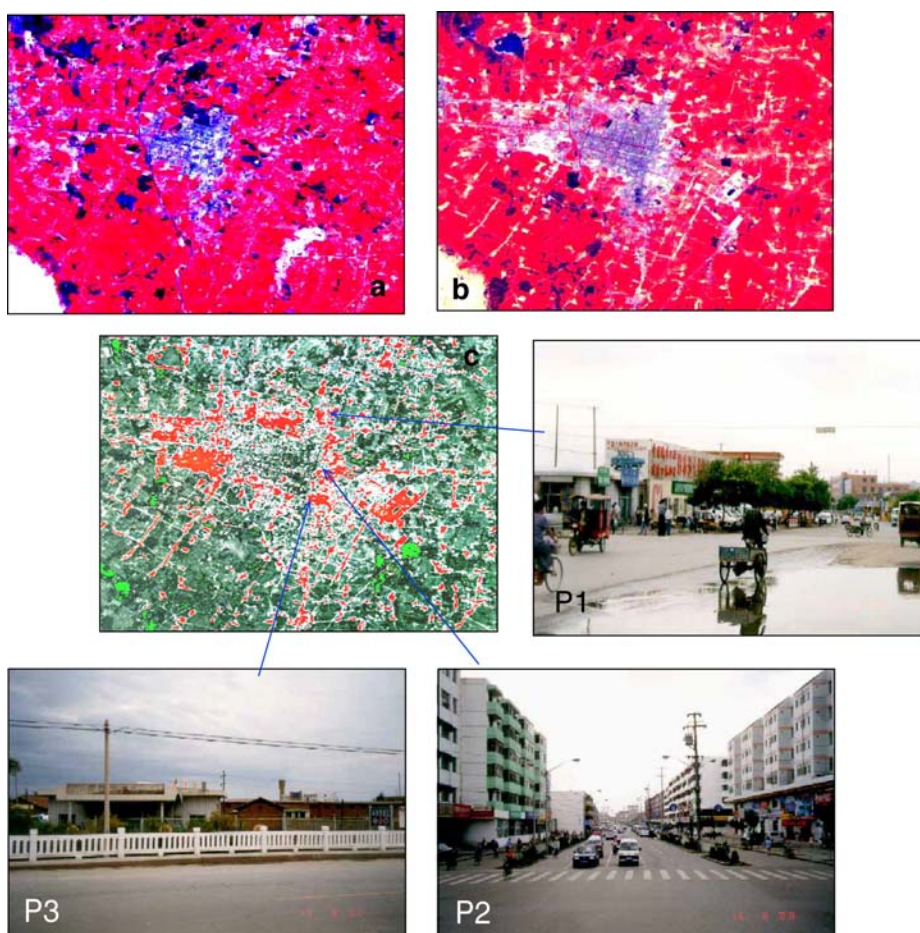


Figure IV-12 : Extension de l'urbanisation autour de l'ancien district urbain de Yinchuan

a : TM 321 composition en couleur 1987, b : ETM 321 composition en couleur 1999, c : extension urbaine, où le **Rouge** : indique urbanisation et construction ; le **Vert** : la conversion du sol nu en végétation ou de la végétation en retenues d'eau ;

Gris : non changement. P1: zone suburbaine en 1987 - devenue urbaine en 1999 (prise en 2000 vers le sud-est)

(GPS : 38°29.238'N et 106°17.477'E) ; P2 : zone urbanisée après 1987 – Bd de Yingtong (prise en 2000 vers l'est)

(GPS : 38°27.760'N et 106°17.147'E) ; P3 : zone urbanisée récemment, sud-est de Yinchuan (prise en 2000 vers le sud-est)
(GPS : 38°26.407'N et 106°16.868'E).

Afin de vérifier les résultats de la détection de changement produits par la différenciation (differencing) et la technique des seuils (seuillage, thresholding) une classification supervisée, réalisée à partir du zoom visible sur la figure IV-12, a été opérée en mode de minimum-distance. Les figures IV-13 et tableau 4-2 en présentent les résultats :

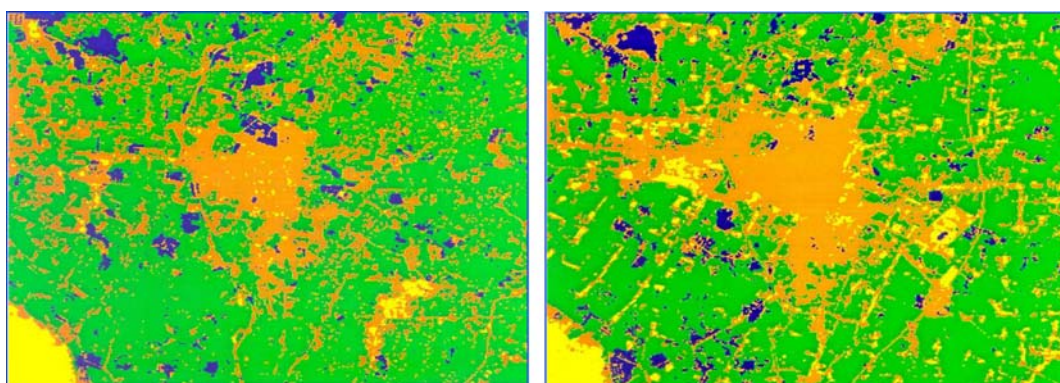


Figure IV-13 : Classification supervisée pour l'ancien district urbain et sa banlieue de Yinchuan
Bandes utilisées : 1, 4 et 7 ; mode : distance minimum (gauche : 1987 ; droite : 1999)



Tableau 4-2 : Résultats de la classification supervisée pour l'extension urbaine

Clusters	Urbain	Eau	Végétation	Sol nu et construction d'infrastructures	Total
TM1987	58,6	12,1	148,5	6,5	225,8
ETM1999	67,8	10,6	135,5	11,8	225,8
Δ Surface	+ 9,2	- 1,5	-13,0	+ 5,3	

Note : chiffre présenté en km²

Nous savons que les plans d'eau et la végétation ont diminué respectivement 1,5 km² et 13,0 km², ils ont été convertis en bâtiments et infrastructures (5,3 km²) (immeubles, routes, bâtiments agricoles, etc.). L'urbanisation récente autour de l'ancien centre urbain est, en effet, de 14,5 km² pour la période de 1987 à 1999.

3. CARTOGRAPHIE DU CHANGEMENT AU NIVEAU DEPARTEMENTAL

L'analyse des agrandissements représentatifs et des relevés de terrain montre que les changements de l'utilisation des sols dans notre site d'étude sont beaucoup plus compliqués que ceux

mis en évidence par les cartes de changement général. Les niveaux de changements ‘négatif’ et ‘positif’ ne peuvent traduire la réalité des changements et ne peuvent donc être suffisants pour opérer le suivi et la modélisation intensive du site pilote. Une identification et une quantification des types des changements concrets sont nécessaires.

Ainsi une comparaison visuelle — méthode simple mais efficace pour distinguer les changements entre des images prises à deux dates différentes, combinée avec les données acquises pendant les travaux de terrain, a été appliquée pour l’identification du changement sur les cartes de changement général produites par le differencing de deux indicateurs ‘Verdeur’ et ‘Brillance’. Les types de changements tels que l’extension des surfaces agricoles, l’extension de l’urbain, l’extension des bâtiments ruraux, la dégradation du sol, les transformations de terres en dépressions d’eau et de plans d’eau en terre, le rétrécissement du cours du Fleuve Jaune, etc., sont identifiés et localisés.

Une quantification au niveau du département a donc été effectuée.

4. RESULTATS

La détection de changements de la couverture et de l’utilisation du sol au niveau départemental a été achevée et exprimée thématiquement dans les figures IV-14, 15, 16. Les données de changement sont listées dans le tableau 4-3.

Il est admis que 11,7 % du territoire total a été modifié dans le Ningxia Nord. Le changement principal, pour la période de 1987 à 1999, est l’extension de la terre cultivée (environ 471 km², 49,4 % du changement total) avec un taux d’augmentation de 39,3 km²/a ou 1,5 %, en particulier dans les départements de Pingluo, Yinchuan et de Yongning (figure IV-14). Ce changement a eu principalement lieu premièrement dans la zone de transition située entre les cônes d’épandage pluvial et la plaine alluviale le long de la bordure ouest de la Plaine de Yinchuan, deuxièmement dans les terres sablonneuses des départements de Yongning, Helan et Yinchuan, et troisièmement le long du terrain alluvial formé par le rétrécissement du cours du fleuve. Ces terres agricoles ont récemment été mises en cultures par la population rurale.

L’extension urbaine est très visible dans cette région (3,6 % du changement total), en particulier autour des villes de Yinchuan et de Shizuishan. Elles se sont étendues respectivement de 19,1 km² et 9,4 km² dans la période précitée. Le département de Pingluo a également connu une urbanisation considérable autour de la gare (5,2 km²). La construction en milieu rural a augmenté, de 68,3 km² (7,3 % de changement total), au Ningxia Nord. Ces deux augmentations se sont faites au prix de la disparition de la couverture de végétation, en particulier de la terre cultivée. Plus de 104 km² de couvert végétal ont été convertis en construction depuis 1987.

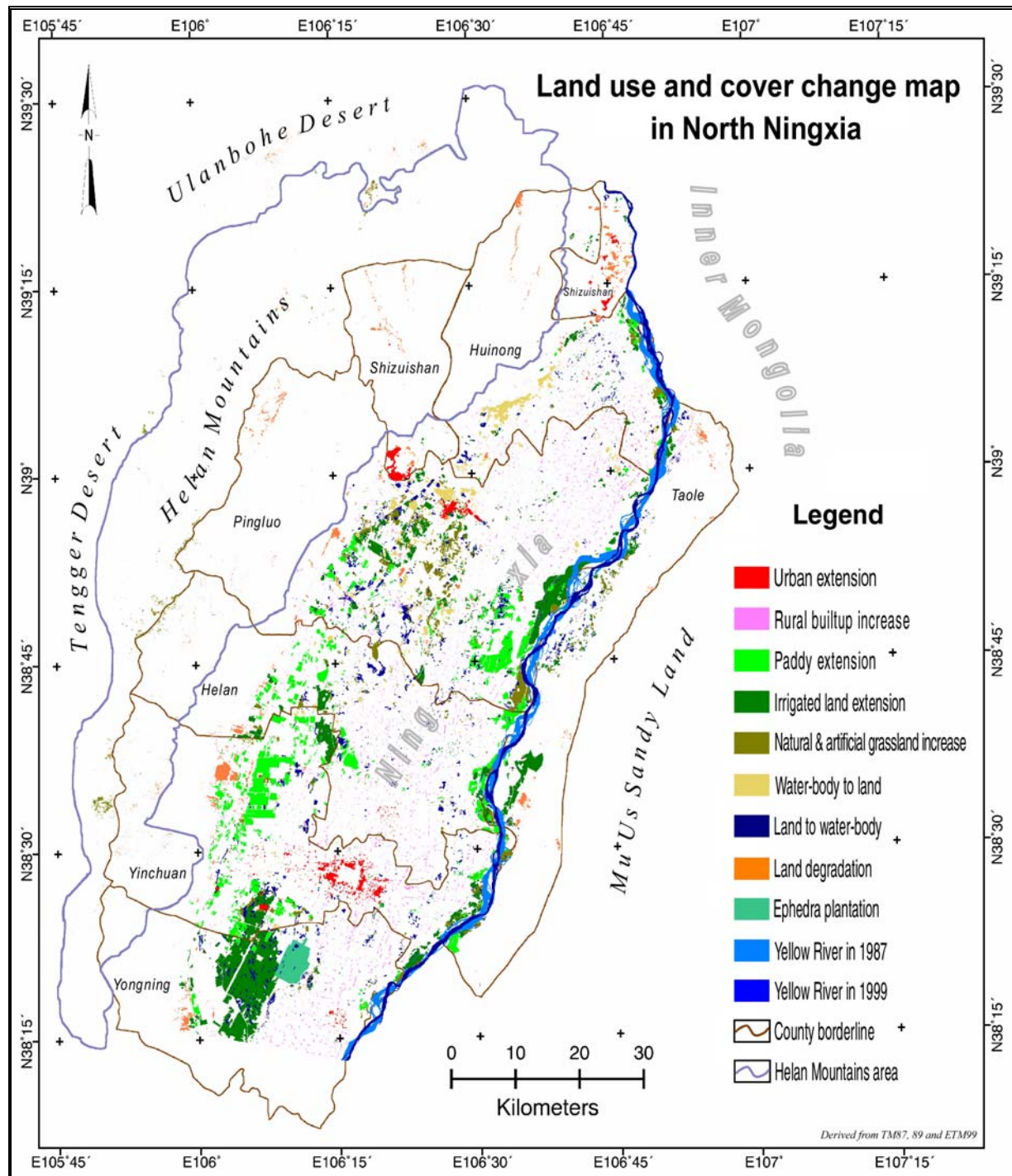
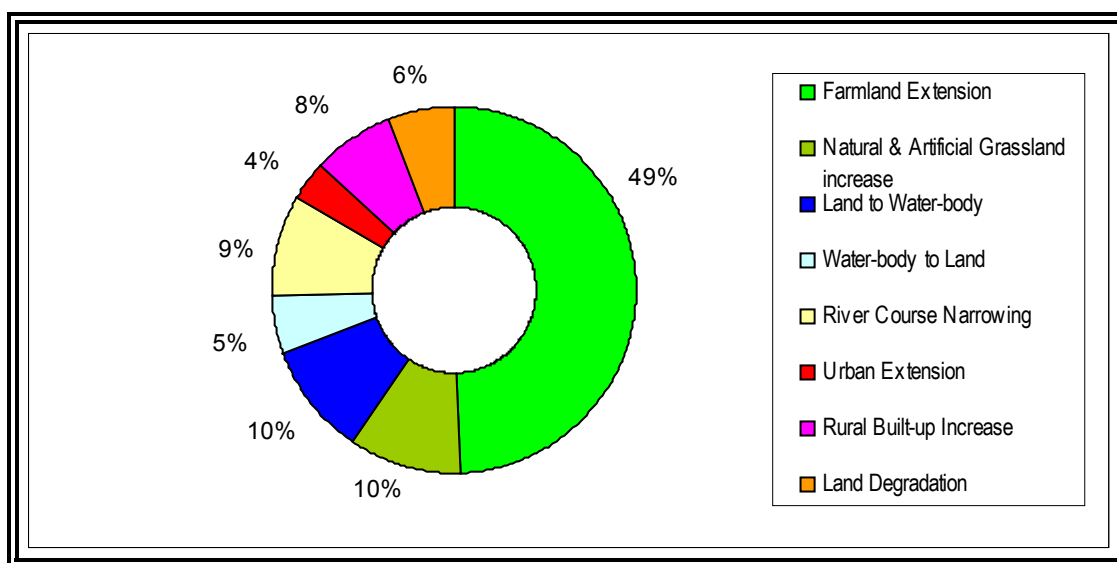


Figure IV-14 : Carte de changements d'occupation des sols au Ningxia Nord de 1987 à 1999

La dégradation des sols, marquée par l'augmentation des résidus de charbon — aux abords des mines et des routes, l'extension de la salinisation et des carrières et la dégradation de la végétation, a atteint une superficie de 55,5 km² (5,8 % du changement total) au Ningxia Nord, au cours des 12 dernières années. D'après l'observation spatiale, ces dégradations se sont produites dans les endroits d'exploitation minière du charbon et dans les départements où l'urbanisation a été rapide, comme ceux de Pingluo, Shizuishan et Yinchuan (figure IV-16c).

Tableau 4-3 : Données départementales des changements de couverture du sol au Ningxia Nord de 1987 à 1999

Département	Surface	ΔTerres agricoles	ΔPrairies artificielles et naturelles	ΔUrbain	ΔBâti en milieu rural	Dégradation des sols	Terres converties en plans d'eau	Plans d'eau convertis en terres	ΔPlans d'eau	Cours du fleuve convertis en terres
Huinong	942,0	14,8	5,1	0,4	7,1	5,3	7,3	17,0	-9,6	10,8
Pingluo	2115,8	124,9	48,7	5,2	21,9	9,7	32,3	23,6	8,6	22,6
Taole	907,0	33,4	9,8	0,1	2,7	7,1	7,8	0,0	7,8	28,7
Shizuishan	575,7	1,0	0,1	9,4	0,00	12,3	0,9	1,1	-0,2	0,0
Helan	1229,5	55,7	12,0	0,6	15,4	3,5	14,9	3,4	11,5	5,5
Yinchuan	1321,5	117,9	14,8	19,1	11,6	13,5	16,7	2,2	14,5	11,0
Ongning	1028,8	123,8	4,3	1,1	9,6	4,0	16,6	0,4	16,2	5,3
Ningxia Nord	8120,2	471,5	94,7	35,8	68,3	55,5	96,4	47,6	48,8	83,8
Proportion du territoire total (%)		5,8	1,2	0,4	0,8	0,7	1,2	0,5		1,0
Taux de changement annuel	Km²/an	39,3	7,9	3,0	5,7	4,6	8,0	4,0	4,1	7,0
	%	1,5		2,2	4,2				1,0	6,1

**Figure IV-15 : Pourcentage de chaque modification par rapport au changement total**

Une certaine part de la couverture de végétation non cultivée, une partie de la forêt dans les Montagnes Helan et des roselières dans la Plaine Yinchuan, mais principalement des prairies artificielles, connaît, depuis 1987, une augmentation visible (94,7 km², 9,9 % du changement total).

Les transformations des plans d'eau se montrent complexes, d'un point de vue spatial. En certains endroits, les dépressions d'eau se sont étendues, en gagnant même sur les terres sèches mais dans d'autres endroits elles ont disparu ou se sont asséchées.

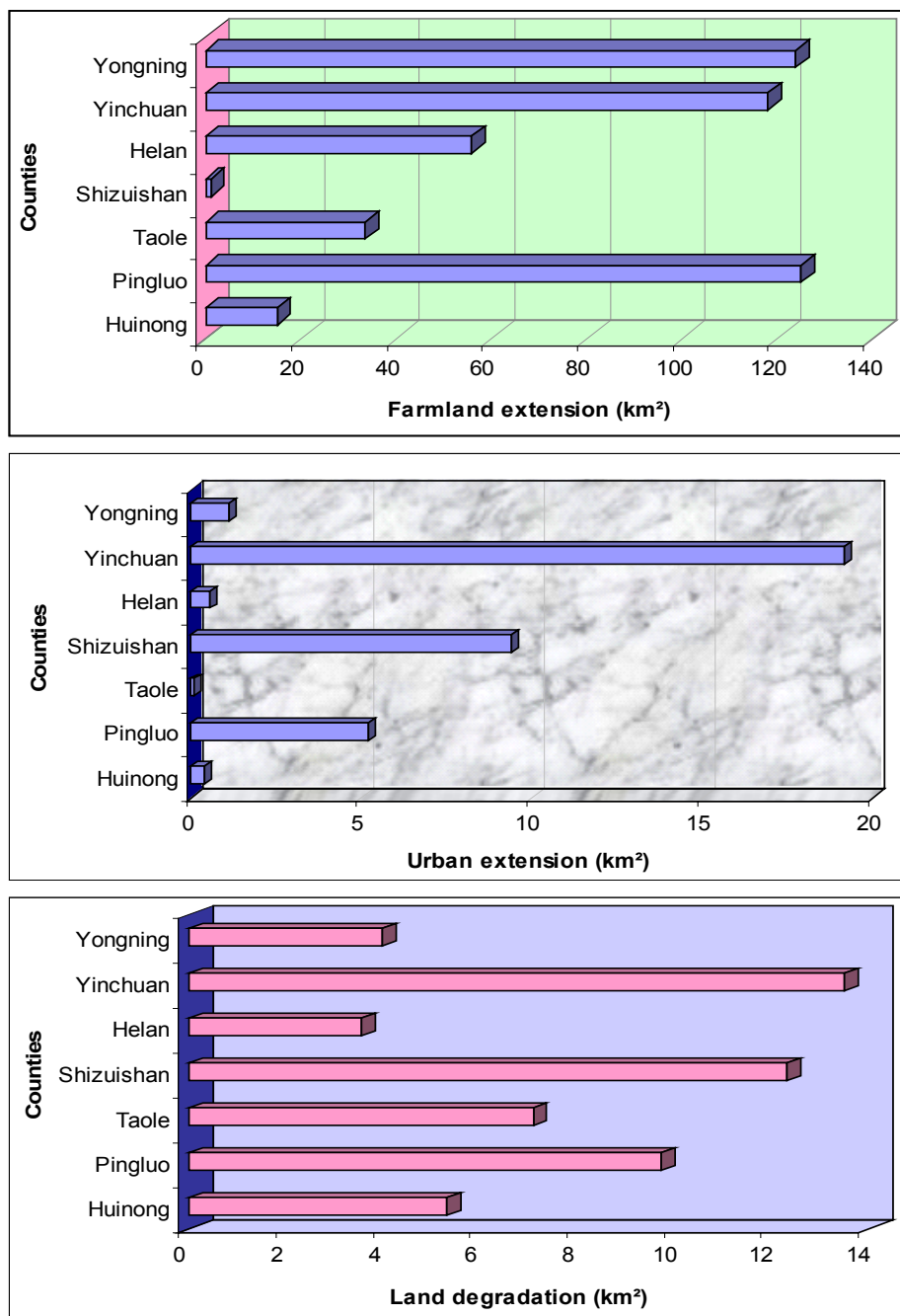


Figure IV-16 : Changements pour chaque département

Cependant, la surface en eau de ces départements connaît une certaine augmentation (de 49 km² au total) à l'exception du département Huinong où il y a approximativement 17,0 km² de dépressions d'eaux asséchées pour seulement 7,3 km² de terres transformées en dépressions d'eau.

La surface du Fleuve jaune dans le Ningxia Nord semble à être réduite de 83,8 km² (8,8% du changement total) depuis 1987 (tableau 4-3). Une grande partie du fleuve a été rétréci et son courant a diminué. Un autre changement du cours de cette rivière est son mouvement vers l'est. En comparant la situation du cours du fleuve en 1987 à celle de 1999, on note une migration à l'est dans son écoulement

sud-nord. L'amplitude maximale de ce déplacement vers l'est a atteint 2,7 km (près de Qukou, département de Pingluo) (figure IV-17).

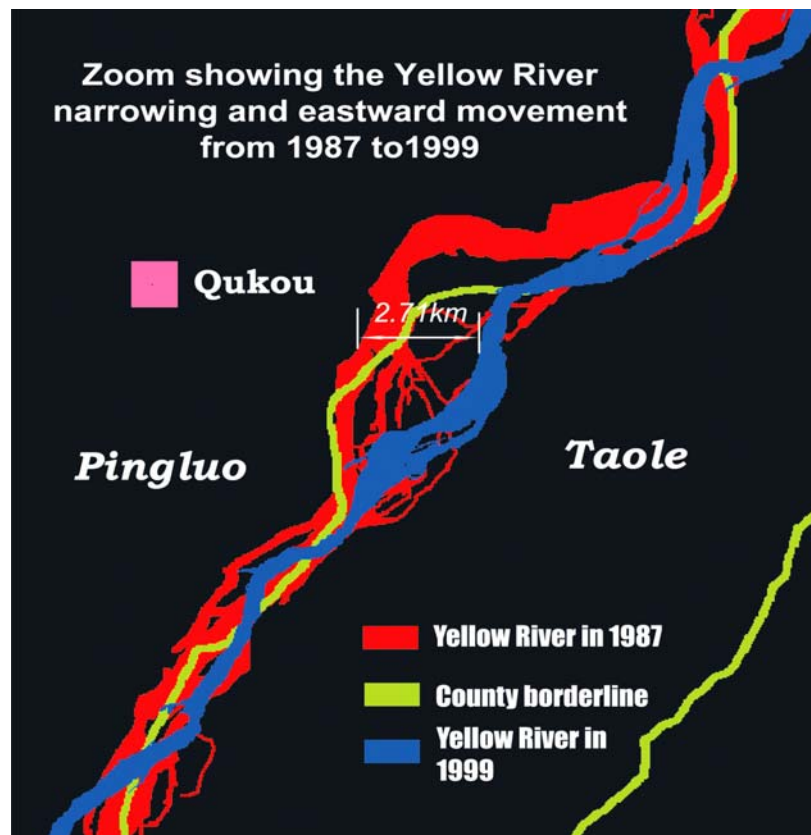


Figure IV-17 : Changements subis par Fleuve Jaune durant la période 1987-1999.

IV. ANALYSE DES RESSOURCES ACTUELLES DES SOLS

L'étude des ressources territoriales actuelles est habituellement effectuée par la classification complète de l'occupation du sol à partir de l'imagerie spatiale. C'est une des applications les plus courantes de la télédétection. La procédure a été présentée dans la figure IV-2. Une description plus détaillée est montrée dans la section la suivante.

1. APPROCHES

L'inventaire des ressources des sols par la classification est une pratique courante en télédétection. Cependant, des difficultés apparaissent lors de la mise en place de ces techniques,

notamment, quand elles sont appliquées aux régions dont les composantes sont complexes et les types d'occupation du sol continus. Les algorithmes traditionnels nécessitent encore des améliorations pour mieux distinguer les différents types d'occupation du sol.

De nombreux travaux ont été menés pour améliorer la technique de la classification et son résultat à partir de différentes méthodes et algorithmes d'extraction de l'information 'occupation du sol', de cartographie et de suivi du changement (Haralick *et al.*, 1973 ; Weismiller *et al.*, 1977 ; Gordon, 1980 ; Thomas *et al.*, 1987 ; Gong *et al.*, 1989, 1990, 1992 ; Franklin *et al.*, 1990 ; Chen *et al.*, 1999, etc.). La classification conventionnelle à partir des données de télédétection est basée sur une technique de reconnaissance du modèle qui inclue les deux approches supervisées et non-supervisées, en supposant que la région étudiée se compose de plusieurs classes homogènes uniques mutuellement exclusives (Townshend, 1984). Cependant, cette supposition ne s'applique pas aux régions où les types d'occupation du sol existent en continu plutôt que comme une mosaïque de classes distinctes. Par conséquent, les classes s'enchevêtrent les unes avec les autres et ne peuvent être séparées par des limites nettes (Kent *et al.*, 1997). Notre région d'étude, le Ningxia Nord, est un site qui présente une géomorphologie complexe et des types d'occupation du sol variés mais non discernables sur les classifications. Par exemple, les résidus de charbon et les marais ne peuvent pas être discriminés sur les images de façon automatique du fait de la similarité spectrale globale entre eux.

Afin d'éviter les limites des classifications traditionnelles et pour augmenter la capacité de distinction et la logique des classes dans l'espace, nous avons ajouté certains traitements de pré- et post classification. Ainsi les caractères de textures (Haralick *et al.*, 1973 ; Chen *et al.*, 1989 ; Franklin *et al.*, 1990 ; Gong *et al.*, 1992 ; Sali *et al.*, 1992) ont été préalablement identifiés puis incorporés dans la sélection des zones d'apprentissage de pré-classification. D'après Woodcook *et al.* (1987), la texture est une caractéristique fondamentale de l'image de télédétection, souvent essentielle pour distinguer les éléments de l'image. Les particularités de chaque classe sont dues à l'hétérogénéité des éléments de l'occupation du sol (Shaban *et al.*, 2001). La majorité des classes a ses propres particularités spectrales et texturales, dans notre cas, on distingue les roches nues, les cônes d'épandage pluviaux, les étangs de pisciculture, les champs de riz, les prairies sablonneuses etc. Ces caractéristiques peuvent être combinées avec les zones d'apprentissage comme critères de regroupement. Après l'analyse du maximum de vraisemblance, un traitement de post-classification a été réalisé pour ré-allouer les classes spectralement mal-classées et spatialement mal-réparties. Nous avons ensuite appliqué une agrégation pour homogénéiser des classes similaires ou proches. Les résultats issus de ce traitement fournissent une classification très précise des différents modes d'occupation du sol et de leur répartition spatiale.

2. PROCEDURE ET RESULTATS

Une classification non-supervisée nous a donné une base nécessaire à la reconnaissance du terrain. Les anomalies constatées sur le site nous ont conduit aux traitements suivants afin de nous permettre de quantifier et valider les ressources du sol.

PRE-TRAITEMENT DE CLASSIFICATION

Rectification

Les données du satellite Landsat ETM datées du 12 août 1999, ont été rectifiées par rapport aux cartes topographiques du 1/200 000 au 1/300 000 (datum WGS84 et projection UTM 48) en utilisant une fonction polynomiale (3^{ème} ordre et ré-échantillonnage bilinéaire) avec 92 GCP (incluant 28 points de GPS). L'erreur de RMS a été calculée à 0,65 pixel (un pixel couvre 30×30m²).

Bandes utilisées

Les bandes 1, 4 et 7 ont été utilisées pour la classification. Dans la figure II-4 (Chapitre II), les bandes 1, 2 et 3 sont bien corrélées ou interdépendantes. Cela signifie que nombre d'informations sur l'occupation du sol sont répétitives. Les bandes 5 et 7 sont aussi corrélées ($R^2 = 0,850$). La bande 4 est indépendante de toutes les autres ($R^2 < 0,430$). La classification a donc été effectuée sur les bandes 7, 4 et 1.

La composition colorée concernant les bandes 7, 4 et 1 montre une couleur naturelle de l'occupation des sols. Le résultat de classification sera plus facile à vérifier et valider.

Sélection des zones d'apprentissage de texture

Toutes les zones d'apprentissage sont sélectionnées avec soin à partir des points suivants :

Données in-situ

Une mission de terrain s'est déroulée dans la région étudiée en août 2000. 7 trajets et 71 points ont été observés pour valider les changements de l'occupation des sols et constater l'utilisation du sol actuelle. Les trajets de terrain sont indiqués dans la figure IV-1.

La majorité des types de classe a été référencée par GPS et photographies. Clef de l'interprétation, les levés de terrain sont largement utilisées pour la sélection des zones d'apprentissage.

Textures

Il est à noter que, sur le site pilote, de nombreux types d'occupation du sol ont leurs propres caractéristiques texturales en fonction de la composition minérale, de l'altitude et de l'espèce végétale. Par exemple : les cônes d'épandage composés de sédiments pluviaux provenant de l'inondation des Montagnes Helan ont des lignes d'écoulement claires en forme de cônes ouverts au sud-est et à l'est. Ces cônes d'épandage constituent une bande continue de couleur magenta foncé du sud-ouest au nord-

est entre les Montagnes de Helan et la Plaine de Yinchuan, visibles sur la composition colorée 7, 4 et 1. Pour chaque classe, plusieurs zones d'apprentissage ont été définies.

Système de classification

En appliquant nos résultats de recherche à l'organisation de l'environnement local, un système de classification de l'occupation du sol en Chine (EFS groupe expert, 2000) a été intégré à ce projet de coopération sino-belge. Ce système a été spécialement conçu pour l'étude des ressources territoriales par les données satellitaires aux échelles du 1/500 000 au 1/1 000 000. Bien qu'il n'ait pas encore été approuvé officiellement par le département professionnel chinois, il est largement utilisé dans les programmes nationaux de recherche relatifs à l'environnement écologique en Chine.

CLASSIFICATION ET RE-CLASSIFICATION

Après la sélection des zones d'apprentissage basées sur les textures, nous avons réalisé une classification (maximum de vraisemblance). Les résultats ont été vérifiés par rapport à la composition colorée de bandes 7, 4 et 1 combinés avec les relevés de terrains. Les groupes bien classés, comme les champs de riz, la forêt, le désert, le désert de pierre (Gobi), la prairie et les cônes d'épandage, etc., ont été retenus. Une ou plusieurs nouvelles zones d'apprentissage ont été ajoutés aux groupes mal classés tels que : l'urbain, les retenues d'eau, les résidus de charbon et les marais, et une re-classification est relancée pour améliorer les résultats. Ce processus a été réitéré afin d'obtenir le meilleur résultat possible.

TRAITEMENTS DE POST-CLASSIFICATION

Filtrage

Après l'obtention du "meilleur" résultat, nous avons appliqué un filtrage (matrice 3×3) à l'image classifiée pour attribuer une classe aux pixels séparés ou solitaires. L'objectif de ce traitement est d'exclure les petits groupes de pixels considérés comme un 'bruit' et d'améliorer ainsi la lisibilité de la carte. Notre sélection d'une matrice 3×3 est liée à la résolution spatiale de TM (30m) et au choix de l'échelle cartographique (1/100 000).

Réallocation et agrégation

Après le filtrage, nous avons constaté une mauvaise répartition spatiale de certains groupes de pixels. Après identification visuelle sur la composite colorée des bandes 7, 4 et 1, les pixels mal-répartis de ces groupes ont été réalloués à leur propre classe. Il y a au moins 4 zones géographiques reconnues dans le site d'étude :

- Zone 1 : les montagnes Helan à l'ouest ;
- Zone 2 : les cônes d'épandage d'origine pluviale au pied des montagnes ;

- Zone 3 : la Plaine alluviale du Yinchuan ;
- Zone 4 : la terre pastorale sableuse de Mu Su à l'est.

Quatre masques correspondant à ces quatre zones ont été appliqués. Une réallocation des pixels mal répartis a été effectuée. Certains pixels de groupe “urbain” se trouvent inclus dans les Montagnes Helan à l'ouest de la ville de Yinchuan, en fait, ils sont confondus avec le groupe “roche nue” (roche de sable ordovicienne). Ces pixels ont donc été supprimés de la classe “urbain” et réalloués à celle de “roche nue”.

Centaines de pixels, du groupe “étang de pisciculture”, localisés dans les montagnes de Helan, appartiennent à la classe “roche nue” (roches de sable et de gravier carbonifères et permienes). Ils ont pu être séparés à l'aide des masques de zone et réalloués à la classe “roche nue”.

La réallocation est un travail qui nécessite une vérification minutieuse de chacune des classes mal-distribuées par rapport à la composite colorée des bandes 7, 4 et 1.

Une agrégation est réalisée afin de regrouper les classes aux caractères semblables. Par exemple, trois classes “dépression imprégnée en eau”, “lac” et “étang de pisciculture” ont été regroupées au sein d'une nouvelle classe : “retenues d'eau”. Les classes “désert”, “désert de pierre” et “dunes de sable” appartiennent à la classe “désert”. Les classes “terre humide”, “marais” ou “marécage” forment une nouvelle classe “marais”. Nous obtenons une classification finale de l'occupation du sol, constituée de 19 classes au lieu de 31 précédemment (figures IV-18 et tableau 4-4).

Par souci de simplification, les 19 classes ont à nouveau été regroupées selon leur ressemblance. Par exemple, les classes “désert”, “gobi”, “cônes d'épandage pluviaux”, “roche nue” et “terre de sable” ont été regroupées en une classe unique “terre nue et sableuse” ; “rizière” et “terre irriguée” en “terre cultivée”, etc.... Finalement, la classification est constituée de 12 types d'occupation du sol utilisés pour l'analyse statistique (tableau 4-5 et figure IV-19).

RESULTATS

Le mode actuel d'occupation des sols peut être résumé de la façon suivante :

36 % du territoire total est la terre cultivée. La Plaine de Yinchuan est recouverte de rizières et de terres irriguées (champs de maïs et tournesol). Cela montre l'importance de l'agriculture dans cette région. Cependant, le PIB produit dans cet environnement rural représente seulement 11,6 % du PIB total (tableau 4-11).

Le sol sablonneux et nu (incluant la roche nue dans les montagnes de Helan, le désert, le sol de sable et les cônes d'épandage pluvial) occupe 33 % du territoire total du Ningxia nord.

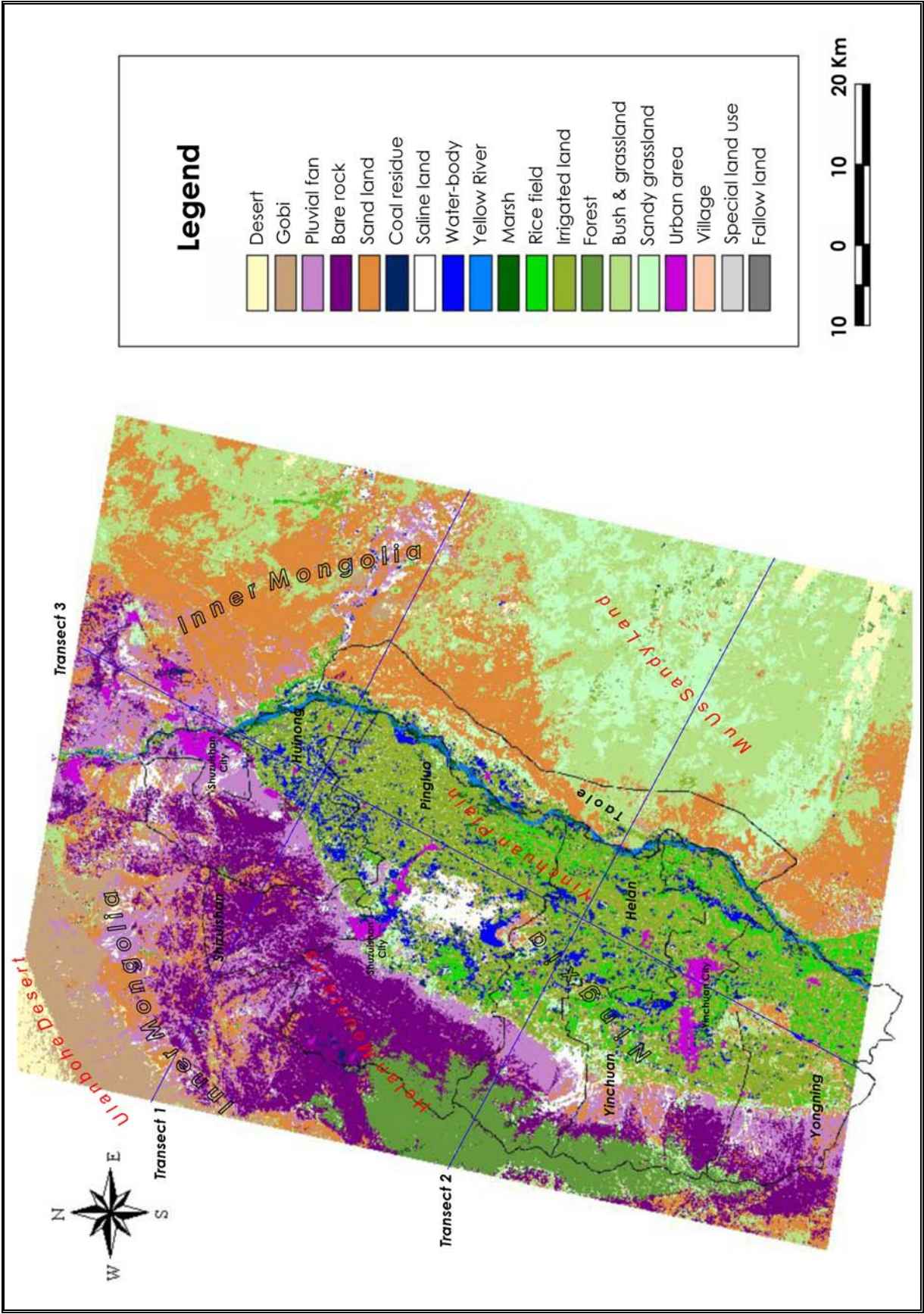


Figure IV-18: Mode d'occupation des sols au Ningxia Nord

Ligne 1, 2 et 3 sont trois transects sur lesquelles l'exactitude de la classification a été vérifiée.

Tableau 4-4 : Résultat de la classification finale pour le Ningxia Nord

No	Mode d'occupation du sol	Huinong	Pingluo	Shizuishan	Taole	Helan	Yinchuan	Yongning	Total	Total Site
C1	Désert de sable	0,8	0	0,1	6,5	0	0,1	0,2	7,8	323,9
C2	Désert de pierre (Gobi)	2,6	0	0,1	8,3	0	0,1	1,4	12,4	692,2
C3	Cônes d'épandage pluviaux (cailloux et graviers provenant des montagnes)	168,8	141,1	177,8	3,3	104,6	94,9	119,4	810,0	1763,7
C4	Roche nue (roche de sable et d'argile carbonifère, permienne et tertiaire)	241,0	465,2	243,3	1,8	72,7	128,8	81,4	1234,4	2113,2
C5	Sol sableux	46,3	24,9	29,8	374,5	23,0	63,3	62,9	624,7	3429,6
C6	Résidus de charbon	3,9	14,6	9,3	0	0,9	0,1	0,1	29,0	47,8
C7	Sol salinisé	39,0	85,9	20,0	4,9	38,1	26,7	14,8	229,5	400,8
C8	Retenues d'eau	72,0	156,2	3,2	36,8	78,2	65,5	24,3	436,3	448,6
C9	Rivière	10,9	15,1	3,7	29,3	5,0	11,9	5,4	81,3	95,1
C10	Marais	25,2	69,0	2,7	27,9	39,5	33,3	12,9	210,4	223,8
C11	Rizières	5,9	61,5	1,2	4,1	89,1	99,1	96,0	356,9	398,7
C12	Terres irriguées	236,5	733,1	18,9	109,5	533,3	454,5	392,4	2478,0	2579,1
C13	Forêt naturelle des montagnes et vergers de la plaine	9,8	122,8	0,9	4,1	149,0	123,2	19,9	429,6	884,2
C14	Buissons et prairies	2,3	4,3	0,8	135,3	6,4	24,4	41,7	215,1	3139,6
C15	Prairies sableuses	37,0	112,9	10,0	144,3	53,8	79,3	39,1	476,5	1763,3
C16	Urbain et ses infrastructures	7,3	21,5	51,5	1,7	5,0	65,1	5,4	157,7	192,9
C17	Village	18,8	57,6	0,7	14,3	22,1	37,8	23,3	174,5	193,9
C18	Usage spécial	0	0	0	0	0	1,0	0	1,0	3,6
C19	Jachère et terres cultivées abandonnées	13,7	30,1	2,6	0,4	8,7	12,4	4,5	72,4	72,4
	Total	942,0	2115,7	576,5	907,0	1229,5	1321,5	945,4	8037,6	18766,4

Note : La superficie totale classifiée pour le site d'étude s'étend sur 18 766 km² dont 8 038 km² réparti au Ningxia Nord.

La prairie sablonneuse, incluant les buissons, est composée de l'armoïse, de la réglisse, de légumineuse, d'éphédre, etc., se place en troisième position, soit 9 % du sol total, dans la Plaine de Yinchuan et à l'ouest des terres arénacées de Mu Us.

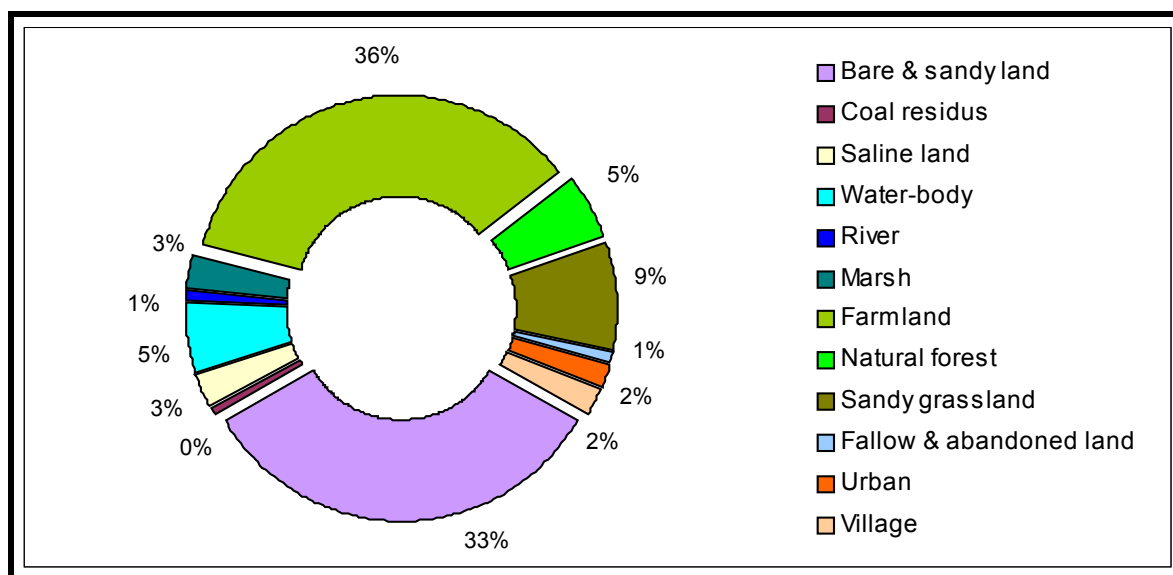
La forêt des montagnes de Helan, composée principalement de sapin et de pin, englobe les vergers (pomme et poire) de la plaine. Elle constitue 5 % de la superficie totale.

Les retenues d'eau (lac, étang de pisciculture et dépression) de la plaine représentent 5 % du territoire total.

Tableau 4-5 : Principales types d'occupation des sols au Ningxia Nord

No	Mode d'occupation	Huinong	Pingluo	Shizuishan	Taole	Helan	Yinchuan	Yongning	Total Ningxia Nord	Pourcentage	Total site
1	Roche nue et sol sableux	459,5	631,2	451,1	394,5	200,3	287,3	265,4	2689,3	33%	8322,6
2	Résidus du charbon	3,9	14,6	9,3	0	0,9	0,1	0,1	29,0	0%	47,8
3	Sol salinisé	39,0	85,9	20,0	4,9	38,1	26,7	14,8	229,5	3%	400,8
4	Retenues d'eau	72,0	156,2	3,2	36,8	78,3	65,5	24,3	436,3	5%	448,6
5	Rivière	10,9	15,1	3,7	29,3	5,0	11,9	5,4	81,3	1%	95,1
6	Marais	25,2	69,0	2,7	27,9	39,5	33,3	12,9	210,5	3%	223,8
7	Terres cultivées	242,4	794,6	20,0	113,6	622,4	553,6	488,4	2834,9	36%	2977,8
8	Forêt	9,8	122,8	0,9	4,0	149,0	123,3	19,9	429,6	5%	884,2
9	Prairies sableuses	39,3	117,2	10,8	279,7	60,2	103,7	80,8	691,6	9%	4902,9
10	Urbain	7,3	21,5	51,5	1,7	5,0	66,1	5,4	158,7	2%	196,6
11	Village	18,8	57,6	0,7	14,3	22,1	37,8	23,3	174,5	2%	193,9
12	Jachère et terres abandonnées	13,7	30,0	2,6	0,4	8,7	12,4	4,5	72,4	1%	72,4

Note : Simplification du tableau 4-4 (données présentées en km²).

**Figure IV-19 : Répartition actuelle des modes d'occupation des sols au Ningxia Nord**

L'urbain revêt un faible pourcentage (2 %), mais représente la majeure partie du PIB puisque 88,4 % (tableau 4-11) y sont produits. Il joue un rôle très important dans l'économie de cette région.

La jachère et les terres cultivées abandonnées (1 %) sont principalement réparties dans les départements Pingluo, Yinchuan et Huinong.

3. EVALUATION DE LA PRECISION ET VALIDATION

Une classification, basée sur l'observation de terrain, a été effectuée. Les résultats issus de cette classification montrent des imperfections et notamment des classes mal-réparties. Ces résultats ne sont pas suffisamment précis pour réaliser des cartes d'occupation des sols à moyennes et grandes échelles (1/100 000 à 1/200 000).

La *précision totale* du 'meilleur' résultat de la classification supervisée est de 84 %. Un traitement de post-classification est appliqué afin d'améliorer le résultat. La précision du résultat issus de ce post-traitement ne peut être calculée de manière automatique par le logiciel PCI que nous utilisons. Pour réaliser cet objectif, trois droites sécantes (deux orientées nord-ouest sud-est et une orientée nord-est sud-ouest) ont été tracées sur la carte finale de l'occupation du sol (figure IV-18). Puis, nous avons procédé à une vérification de manière aléatoire, le long de chacune de ces droites par rapport à la composite colorée de bandes 7, 4 et 1. Le résultat de cette vérification est le suivant :

Transect 1 : NO-SE, 127,5 km, 102 points vérifiés dont 7 points erronés.

Transect 2 : NO-SE, 126,3 km, 84 points consultés dont 7 points erronés.

Transect 3 : NE-SO, 175,6 km, 133 points vérifiés dont 10 points erronés.

La précision de la classification peut donc être validée par la formule suivante :

$$A = [1 - (\sum Ei / \sum Pi) Li / \sum Li] \times 100\% \dots\dots\dots (IV-1)$$

Où, *A* : précision ; *Ei* : points erronés comptés aléatoirement sur le transect *i* ; *Pi* : points totaux vérifiés sur le transect *i* et *Li* : longueur du transect *i*.

La précision de la classification finale pour le site étudié, calculée selon l'équation (IV-1) est de:
 $A = 93 \%$.

Après réallocation et agrégation, la précision de la classification a donc été améliorée de près de 10 % (de 84 % à 93 %). La nouvelle carte d'occupation des sols au Ningxia Nord reflète mieux la réalité.

Dans l'ArcView GIS, la validation et l'évaluation de la précision ont été effectuées simultanément. Les types d'occupation, les bordures et l'espace de chacune des classes ont été

calibrées sur la composite colorée des bandes 7, 4 et 1. Les classes “terres cultivées”, “roche nue, sol sableux”, “urbain”, “retenues d’eau”, “résidus de charbon”, “marais”, etc., sont bien groupées.

Une imperfection apparaît dans les groupes “forêt” et “village”. Les arbres isolés au bord des champs (le peuplier blanc) n’ont pas été intégrés dans le groupe “forêt”. La canopée de moins de 30 m ne peut être distinguée par le capteur ETM+. C’est aussi le cas des maisons rurales dont la longueur, inférieure à 30 m, ne peuvent être classifiées. D’autres capteurs plus précis (SPOT 5, HRG...) vont nous permettre de résoudre ce problème.

Cette enquête de ressources des sols par classification a été présentée dans le “Final Appraisal Workshop of the Sino-Belgian Cooperation Project on Northwest China” qui a eu lieu à Beijing du 1^{er} au 4 juin 2002. Elle est approuvée par les partenaires chinois, Ningxia Remote Sensing Center.

V. EVOLUTION DES DONNEES SOCIO-ECONOMIQUES

Pour analyser les changements de l’occupation du sol et leurs dynamiques, il est nécessaire de connaître en premier lieu les activités socio-économiques et humaines de la région étudiée. Au niveau du département, les données socio-économiques de 1988 à 1999 ont été exprimées dans le tableau 3-4, où chaque index figure une augmentation en valeur dérivée de la soustraction suivante :

$$\Delta = X_{99} - X_{88}$$

L’analyse des données socio-économiques est montrée comme suit :

1. DEVELOPPEMENT DE LA POPULATION ET DE LA MAIN-D'ŒUVRE

A partir du tableau 4-6 et de la figure IV-20, il est clair que la population urbaine a considérablement augmenté au détriment de la population rurale sauf dans les départements de Taole et de Yongning. C’est-à-dire que l’augmentation de la population totale est principalement due à la croissance de la population urbaine (coefficient de la corrélation $R^2 = 0,996$).

La diminution de la population rurale dans la plupart des départements dans la région du Ningxia Nord entre 1988 et 1999 a, semble-t-il, deux raisons : d’une part, les ruraux, en particulier la jeune génération, ont émigré vers les villes et, en contribuant au développement de l’industrie (cf. tableau 4-6 le très haut taux de croissance industriel annuel compris entre 12,9 % à 31,2 %), ils sont devenus des colons urbains ; d’autre part, un faible taux de natalité (tableau 4-7). Depuis l’application de la politique du contrôle des naissances en Chine, le taux de croissance démographique est faible dans la région du Ningxia Nord (de 0,5 % à 1,1 %).

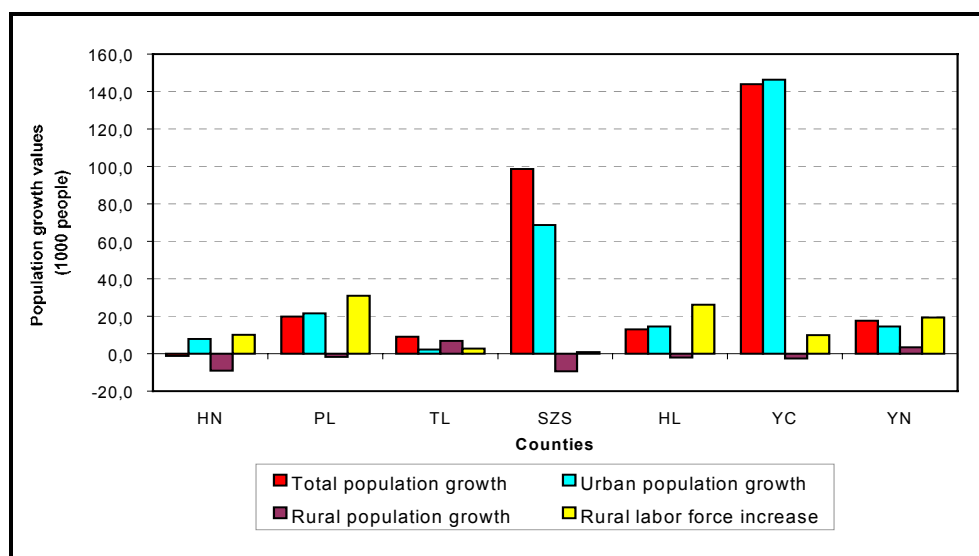


Figure IV-20 : Changements en population et main-d'œuvre au Ningxia Nord entre 1988 et 1999

Tableau 4-6 : Développement socio-économique au Ningxia nord entre 1988 et 1999

Département	ΔPopulation Totale (1000 habit)	ΔPopulation urbaine (1000 habit)	ΔPopulation rurale (1000 habit)	Δ Main d'œuvre rurale (1000 habit)	ΔSuperficie ensemencée (1000 ha)	ΔSuperficie agricole (1000 ha)	ΔProduction Agricole (1000 ton)
Huinong	-1,10	7,90	-9,00	10,10	8,70	7,00	43,98
Pingluo	19,70	21,50	-1,80	31,00	15,50	15,50	139,98
Taole	9,10	2,30	6,80	2,70	5,00	3,70	17,55
Shizuishan	59,30	68,70	-9,40	0,90	0,10	0,10	2,31
Helan	12,60	14,50	-2,00	26,20	4,20	8,50	112,59
Yinchuan	43,90	146,40	-2,50	10,00	2,30	0,60	34,85
Yongning	18,00	14,50	3,50	19,40	4,90	5,30	67,71
Total Nnxia	261,50	275,80	-14,40	100,30	40,70	40,70	418,97

Département	ΔHuiles végétales (1000 ton)	ΔProduit de viandes (1000 ton)	ΔProduction agricole (million yuan)	Taux de croissance agricole annuel (%)	ΔProduction industrielle (million yuan)	Taux de croissance industrielle annuel (%)	ΔPIB (million yuan)	ΔPIB par habitant (yuan)
Huinong	5,84	2,86	250,10	13,96	368,50	31,17	290,16	3895,10
Pingluo	3,88	12,08	508,40	14,21	739,10	15,05	738,05	2792,10
Taole	1,04	1,14	54,30	10,73	17,90	16,93	69,06	2679,90
Shizuishan	-0,05	0,52	26,30	11,36	3024,20	12,89	2020,80	5870,50
Helan	-0,86	4,35	402,30	12,70	583,80	19,01	582,67	3269,20
Yinchuan	-0,44	5,80	446,60	14,04	4421,60	13,20	4973,62	7918,40
Yongning	0,20	2,83	402,00	11,89	693,40	21,73	699,10	3747,00
Total Nnxia	9,61	29,58	2090,50	13,17	9844,10	14,95	9373,46	4310,31

Note: Les index suivants tels que production totale de viandes, PIB et PIB par habitant sont des valeurs croissantes de 1991 à 1999 ; la production industrielle totale est également croissante entre 1990 et 1999.

2. ACCROISSEMENT DES TERRES CULTIVEES

Le tableau 4-6 rapporte que la superficieensemencée et celle des cultures vivrières ont connu une augmentation de 40,700 ha pour la région du Ningxia nord de 1988 à 1999, ce qui implique que l'augmentation du terrainensemencé est principalement attribuée à l'augmentation de la superficie de culture vivrière. Cependant, ces chiffres sont inférieurs de 6 490 ha, à l'extension de la superficie agricole repérée par la télédétection d'après Landsat TM (tableau 4-3 et tableau 4-6). Cette différence est principalement due à la sous-estimation par les gouvernements locaux, pendant la période de 1988 à 1999, de l'extension de la superficie agricole pour les départements de Yinchuan et Yongning. La figure IV-21 met l'accent sur cette différence.

Tableau 4-7 : Indices de la population au Ningxia Nord en 1999

Département	Population totale (1000 p)	Composition de la population						Taux de natalité (%)	Taux de mortalité (%)	Taux de croissance (%)	Ratio de contrôle de naissance (%)
		Han		Hui		Autres minorités					
		Pop	%	Pop	%	Pop	%				
Huinong	70,4	56,7	80,58	13,6	19,25	0,12	0,17	1,39	0,86	0,53	98,08
Taole	30,7	22,4	74,07	7,8	25,74	0,56	0,19	1,56	0,58	0,98	98,11
Pingluo	260,2	175,4	67,41	84,4	32,43	0,43	0,16	1,52	0,65	0,87	92,13
Shizuishan	325,8	287,3	88,17	33,7	10,36	4,81	1,47	0,91	0,22	0,69	100
Helan	176,9	134,6	76,07	41,8	23,6	0,57	0,33	1,64	0,59	1,04	93,25
Yinchuan	593,8	469,1	79,01	109,1	18,38	15,5	2,61	1,07	0,46	0,61	99,26
Yongning	183,7	158,2	86,40	24,2	13,24	0,67	0,36	1,77	0,62	1,15	90,10

(D'après Ningxia Statistical Yearbook, 2000)

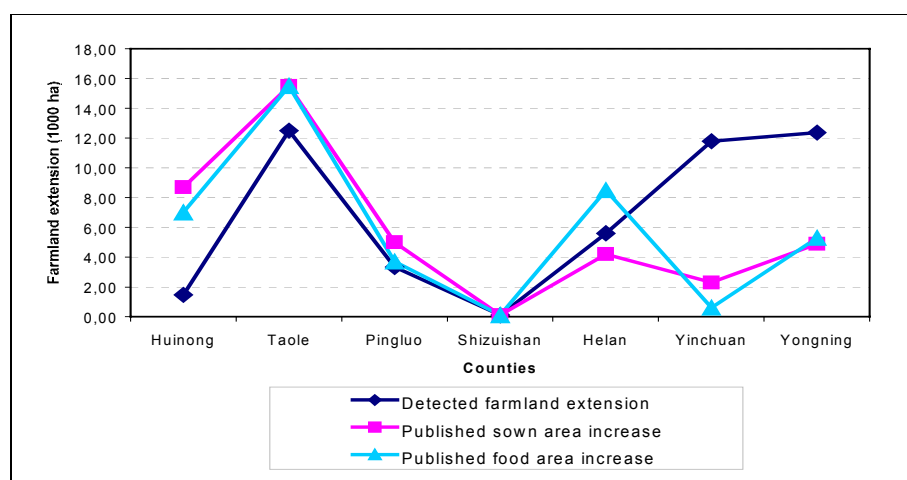


Figure IV-21 : Différence entre l'extension de la superficie agricole détectée d'après Landsat TM et celles publiées par les gouvernements locaux

3. AUGMENTATION DES PRODUCTIS AGRICOLES ET INDUSTRIELS

Avec l'augmentation de la main-d'œuvre rurale, la production agricole (y compris vivrière et de la viande) a fortement augmenté. La main-d'œuvre rurale joue un rôle clé dans le domaine agricole. Sa croissance conduit à une augmentation de produit vivrier ($R^2 = 0,975$), de produit des viandes ($R^2 = 0,606$) et de production agricole totale ($R^2 = 0,719$).

Le tableau 4-6 illustre une croissance remarquable en production industrielle dans chaque département. Celle-ci est fortement associée à la croissance de la population urbaine ($R^2 = 0,959$).

4. CROISSANCE DU PIB

Le PIB (Produit intérieur brut) est un critère de l'évaluation du développement socio-économique dans une certaine région ou un pays. Son augmentation au niveau du département est visible dans le tableau 4-6 et sa composition dans le tableau 4-8. L'analyse de la corrélation révèle que l'augmentation du PIB est nettement liée à l'augmentation de la production industrielle et de la population urbaine (figure IV-22). Cela veut dire que l'augmentation du PIB est principalement soutenue par les activités de la population urbaine récemment accrue et qu'elle s'appuie principalement sur l'augmentation de la production industrielle et commerciale. La contribution de la production agricole est plutôt négligeable.

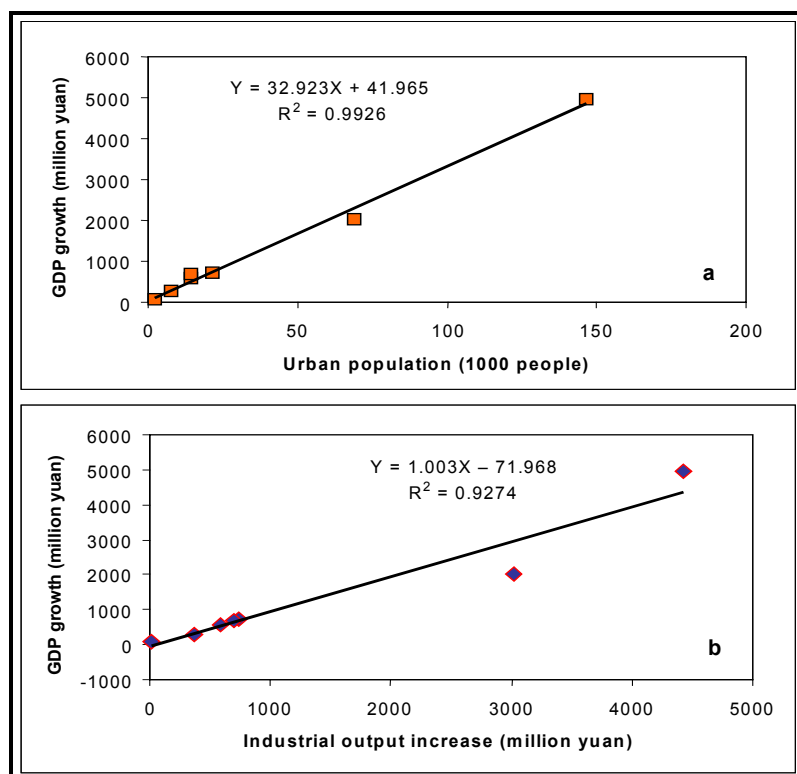


Figure IV-22 : Rapport entre l'augmentation du PIB et celle de la population urbaine (a) et celle de la production industrielle (b) au Ningxia Nord pendant la période de 1988 à 1999

Tableau 4-8 : Composition du PIB et son augmentation dans la région du Ningxia Nord de 1991 à 1999 (en million de yuans)

Composition du PIB		YC	YN	HL	SZS	PL	TL	HN	Croissance totale	Pourcentage de croissance
Agriculture *	1999	404,53	358,99	346,90	19,67	418,90	52,12	169,49	$\Delta = 1088,22$	11,6 %
	1991	146,54	154,58	150,24	12,25	149,57	17,51	51,69		
Industrie **	1999	3118,08	335,68	273,42	1999,61	362,11	20,07	154,23	$\Delta = 4389,34$	46,8 %
	1991	913,04	55,34	68,26	699,16	112,95	6,77	18,34		
Commerce & services	1999	3336,45	277,15	249,68	921,28	284,80	31,41	58,00	$\Delta = 3895,86$	41,6 %
	1991	825,86	62,80	68,83	208,39	65,24	10,26	21,53		

Note: (1) D'après Ningxia Statistical Yearbooks, publié en 1992 et 2000 par China Statistics Press

(2) YC : Yinchuan, YN : Yongning, HL : Helan, SZS : Shizuishan, PL : Pingluo, TL : Taole, HN : Huinong

5. EVOLUTION METEOROLOGIQUE

Le département du Yongning, dans la région de Yinchuan, Ningxia Nord, a été pris comme exemple en ce qui concerne les variations des précipitations annuelles de la deuxième moitié du siècle dernier (de 1951 à 1999). Bien que les précipitations aient fluctué d'année en année, la tendance paraît indiquer un déclin des années 1950 aux années 1990 (figure IV-23). En d'autres termes, le climat, dans cette région, est devenu plus sec. Les données météorologiques départementales, de 1988 et 1999, listées dans le tableau 4-9 et la figure IV-24, confirment ce changement.

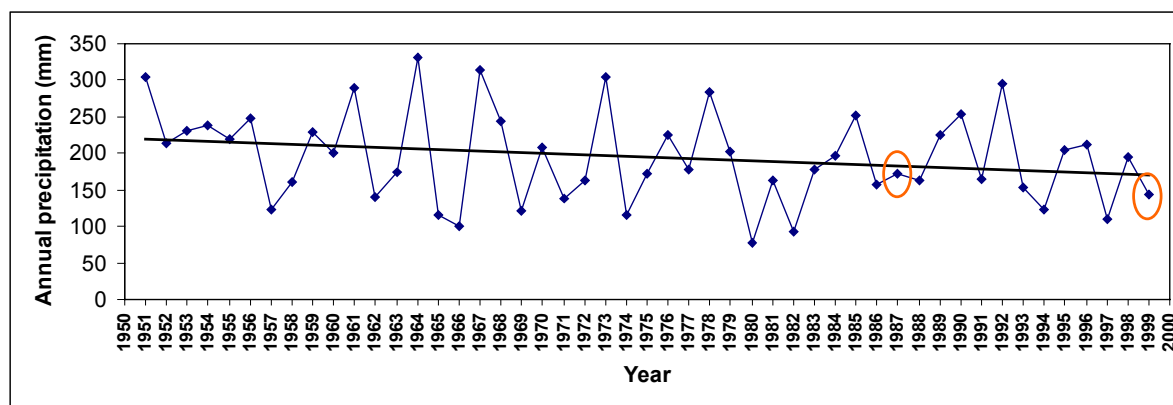


Figure IV-23 : Fluctuation des précipitations annuelles dans la plaine du Yinchuan, Ningxia Nord, en prenant Yongning comme exemple

Les ellipses rouges indiquent les années d'acquisition des images Landsat.

Nous pouvons voir dans le tableau 4-9 et la figure IV-24 que la température moyenne annuelle a augmenté, les précipitations diminués et l'évaporation augmenté. Cela veut dire que le climat est

devenu plus sec et plus chaud depuis 1988. Cela peut être considéré comme une indication locale du réchauffement global.

Tableau 4-9 : Changements météorologiques au Ningxia Nord entre les années 1988 et 1999

Département		Huinong	Pingluo	Taole	Shizuishan	Helan	Yinchuan	Yongning
Température annuelle (°C)	1999	10,2	10,4	10,0	11,5	10,5	10,3	10,3
	1988	9,1	8,6	8,4	9,6	8,8	8,8	8,7
$\Delta T = T_{1999} - T_{1988}$ (°C)		1,1	1,8	1,6	1,9	1,7	1,5	1,6
Précipitations annuelles (mm)	1999	120,0	154,9	133,3	127,0	132,3	165,1	143,4
	1988	219,0	211,0	245,0	227,0	158,0	200,9	162,4
$\Delta P = P_{1999} - P_{1988}$ (mm)		-99	-56,1	-111,7	-100	-25,7	-35,8	-19
Evaporation annuelle (mm)	1999	2318,0	1897,5	1904,1	2147,2	1814,4	1675,7	1907,0
	1988	1860,3	1604,8	1645,3	2115,8	1473,4	1491,9	1513,2
$\Delta E = E_{1999} - E_{1988}$ (mm)		457,7	292,7	258,8	31,4	341	183,8	393,8

Note : Données originales d'après le Ningxia Statistical Yearbook, 1988 et 1999.

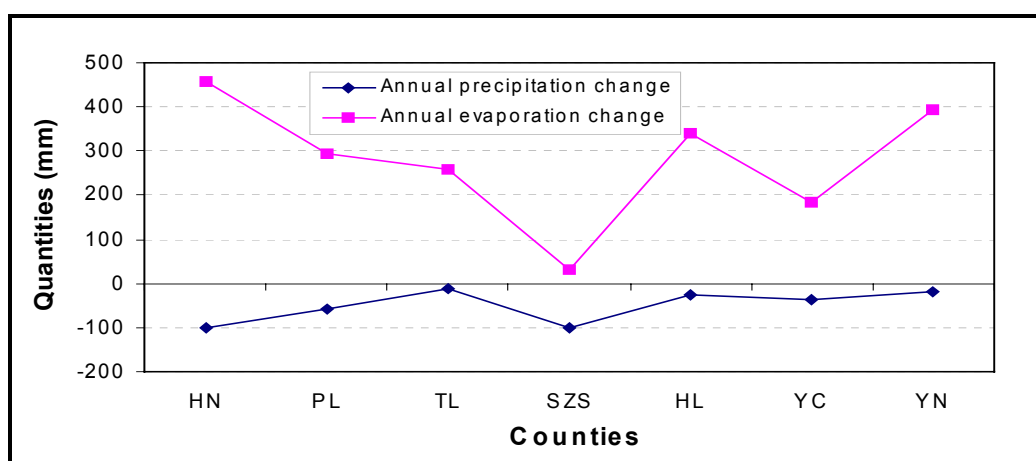


Figure IV-24 : Baisse des précipitations et augmentation de l'évaporation entre 1988 et 1999 dans la région du Ningxia Nord

VI. ANALYSE D'INTERACTION HOMME-ENVIRONNEMENT

Les changements de couverture et d'utilisations du sol ne peuvent pas avoir lieu en toute indépendance mais sont, au contraire, liés aux activités humaines et aux changements du climat. La compréhension de la dynamique des changements de l'occupation des sols a été de plus en plus identifiée comme l'un des impératifs principaux dans la recherche du changement environnemental

global (Lambin *et al*, 1999 ; Geist *et al*, 2001). La surveillance de tels changements est plus efficace quand elle est liée à la compréhension des forces d'entraînement des processus de changement.

Ainsi que nous l'avons exposé dans le Chapitre II, cette tâche pourrait être calibrée par les modèles de régression soit *l'analyse de panel* soit *l'analyse transversale*. La première lie les changements de variables dépendantes (par exemple, changements de l'utilisation du sol) pendant un certain intervalle de temps avec les changements des variables indépendantes (par exemple, l'évolution des activités humaines) dans le même intervalle et à travers un grand nombre de localités (équation II-21 et II-24). La deuxième associe les variables dépendantes (par exemple, la structure d'utilisation du sol) avec les variables indépendantes (par exemple, données socio-économiques) à un temps donné et à travers un grand nombre de localités. L'analyse de panel permet de comprendre les forces directrices des changements environnementaux alors que l'analyse transversale a pour but de distinguer les déterminants spatiaux du mode d'utilisation du sol, en un temps donné.

1. ANALYSE DE PANEL

Les données de changements de couverture du sol au niveau du département (tableau 4-3) et les données (socio-économiques et météorologiques) de changements correspondantes de 1988 à 1999 (tableau 4-6) sont incorporées dans les modèles de régression (équation II-24, Chapitre II) sous SYSTAT, un logiciel pour les analyses multivariées. En prenant les changements d'utilisation du sol comme variables dépendantes et les changements socio-économiques et météorologiques comme variables indépendantes, la modélisation est exécutée *étape par étape* avec un indice de confiance de 0,05 ; les résultats sont présentés dans le tableau 4-10.

Tableau 4-10 : Relations entre activités humaines et changements environnementaux au Ningxia Nord

Variables dépendantes	Variables indépendantes retenues	Const.	Paramètre estimé	Erreur Std.	Coef. Std.	Df	F	Pr>F	R ²
ΔTerres cultivées	ΔProduction agricole	- 0,363	0,024	0,006	0,855	1	13,61	0,0140	0,731
ΔPrairie artificielle et naturelle	ΔProduit des viandes	- 3,331	3,991	0,557	0,955	1	51,36	0,0010	0,911
Dégradation du sol	ΔProduction industrielle	5,031	0,002	0,001	0,841	1	12,11	0,0180	0,708
ΔConstruction rurale	ΔMain-d'œuvre	- 1,010	-1,031	0,211	-1,594	1	23,96	0,0160	0,996
	ΔProduction vivrière		0,289	0,042	1,949	1	47,86	0,0060	
	ΔProduction agricole		0,028	0,003	0,721	1	76,02	0,0030	
ΔUrbain	ΔPopulation urbaine	- 0,152	0,134	0,010	0,986	1	170,07	0,0002	0,971
Mutation eaux vers terres	ΔSuperficie ensemencée	-2,006	1,672	0,362	0,932	1	22,25	0,0050	0,867
Mutation terres vers eaux	ΔProduction Agricole	0,397	0,045	0,0120	0,862	1	14,46	0,0130	0,743

Le tableau 4-10 démontre que le changement de chaque composant environnemental a sa propre force d'entraînement socio-économique. Par exemple, l'extension de terrain agricole est associée avec l'augmentation de la production agricole ; l'extension urbaine est liée à la croissance de population urbaine ; et la dégradation du sol a une relation avec l'augmentation de la production industrielle. Ces relations sont exprimées dans la figure IV-25.

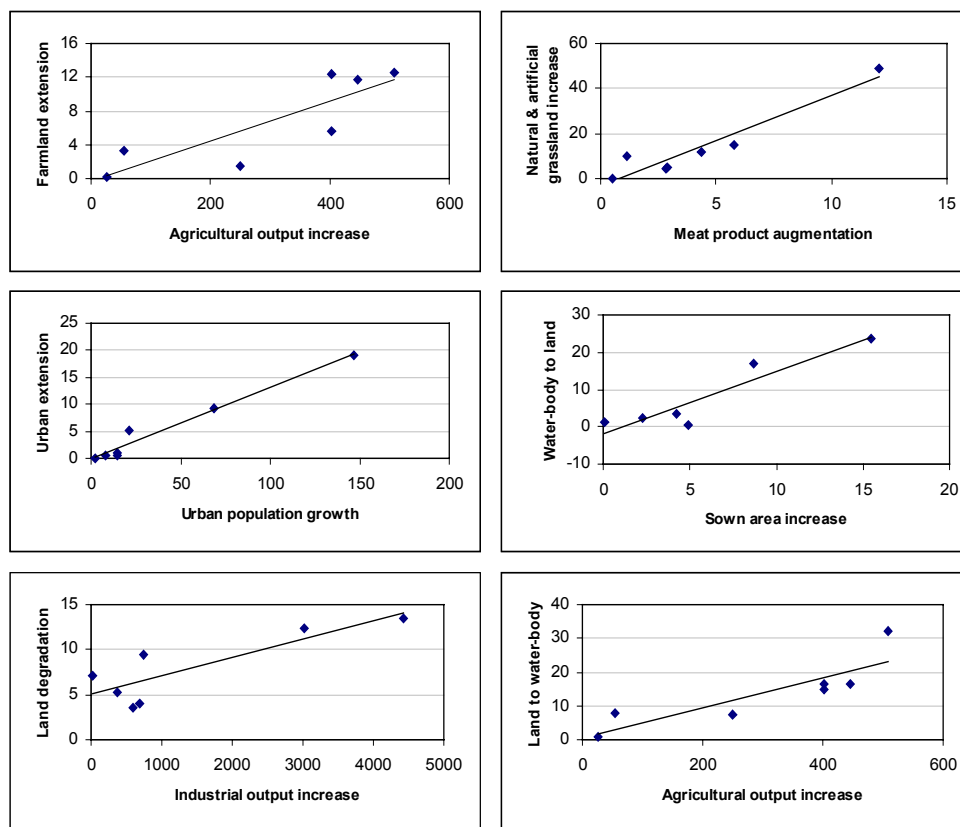


Figure IV-25 : Relation entre les changements environnementaux et leurs forces d'entraînement socio-économiques

De telles connaissances sur l'interaction entre l'évolution de l'environnement et l'activité humaine seront fort utiles aux autorités pour prendre des décisions concernant l'exploitation des ressources et la planification environnementale.

2. ANALYSE TRANSVERSALE

Les mêmes modèles ont été appliqués à l'analyse transversale en intégrant les données de mode d'utilisation du sol en 1999 (tableau 4-5) et les données socio-économiques en 1999 (tableau 4-11). L'analyse a été menée à bien de la même manière et avec un même indice de confiance que l'analyse de panel ; les résultats sont présentés dans le tableau 4-12.

Tableau 4-11 : Données socio-économiques et météorologiques départementales au Ningxia Nord en 1999

Département	Population totale (1000 p)	Population urbaine (1000 p)	Population rurale (1000 p)	Main d'œuvre rurale (1000 p)	Superficie ensemencée (1000 ha)	Superficie vivrière (1000 ha)	Production vivrière (1000 ton)	Production de viandes (1000 ton)	Engrais chimique consommé (1000 ton)
Yinchuan	593,8	476,0	117,8	57,5	21,6	15,6	107,6	10,52	28,862
Yongning	183,1	34,6	148,5	84,9	34,6	32,1	219,1	7,30	29,385
Helan	177,0	33,9	143,0	89,0	38,9	36,6	238,52	8,47	37,302
Shizuishan	325,9	315,7	10,1	2,4	2,0	1,6	8,54	0,91	1,33
Pingluo	260,3	58,8	201,4	113,2	61,9	52,6	258,57	16,80	60,715
Taole	30,2	6,0	24,2	9,0	11,2	8,4	33,56	1,78	6,611
Huinong	704	15,2	55,2	33,3	24,4	17,4	82,66	5,07	16,182
Total Ningxia Nord	1640,7	940,2	700,2	389,3	194,6	164,3	948,6	50,9	180,4

Département	Production agricole totale (10 ⁶ yuan)	Production industrielle (10 ⁶ yuan)	PIB (10 ⁶ yuan)	Composition du PIB			Température annuelle moyenne (°C),	Précipitations annuelles (mm)	Evaporation annuelle (mm)
				Agriculture	Industrie	Commerce & service			
Yinchuan	584,65	6574,88	6859,06	404,53	3118,08	3336,45	10,3	165,1	1675,7
Yongning	566,98	835,36	971,82	358,99	335,68	227,15	10,3	143,4	1907
Helan	550,12	737,86	870	346,90	273,42	249,68	10,5	132,3	1841,4
Shizuishan	38,52	4552,89	2940,56	19,67	1999,61	921,28	11,5	127	2147,2
Pingluo	662,16	1031,07	1065,81	418,90	362,11	284,80	10,4	154	1897,5
Taole	80,6	23,7	103,6	52,12	20,07	31,41	10,0	133,3	1904,1
Huinong	269,09	403,57	381,72	169,49	154,23	58,00	10,2	120	2318
Total Ningxia Nord	2752	14159,3	13192,57	1770,6	6263,2	5158,77	10,45	139,26	1955,84

Note : (1) Source de données : Ningxia Statistical Yearbook, 2000, China Statistics Press. (2) PIB 1999 constitué par l'agriculture (13,4 %), l'industrie (47,5 %), le commerce & le service (39,1 %)

Tableau 4-12 : Déterminants spatiaux des composants environnementaux actuels au Ningxia Nord

Variable dépendante	Variable indépendante retenue	Constante	Paramètre estimé	Std error	Std coeff,	Df	F	Pr>F	R ²
Terres cultivées	Population rurale	1,472	3,902	0,373	0,978	1	109,42	0,0001	0,956
Urbain	Production industrielle totale	2,233	0,010	0,001	0,981	1	131,57	< 0,0001	0,963
Village	Population rurale	3,361	0,216	0,060	0,848	1	12,788	0,0160	0,719
Forêt et verger	Production agricole	-17,366	0,200	0,072	0,780	1	7,743	0,039	0,608
Sol salinisé	Engrais chimique consommé	3,779	4,015	1,224	0,825	1	10,69	0,022	0,681
Retenues d'eau	Superficie ensemencée	2,318	2,159	0,582	0,856	1	13,744	0,014	0,733
Marais	Superficie ensemencée	5,492	0,884	0,274	0,822	1	10,442	0,023	0,676
Jachère et terres abandonnées	Superficie ensemencée	-3,995	2,234	0,613	4,399	1	13,302	0,022	0,894
	Superficie vivrière		-2,035	0,677	-3,623	1	9,026	0,040	

De même que l'analyse de panel, l'analyse transversale peut identifier les facteurs décisifs du mode d'utilisation du sol d'un moment observé. Ces facteurs sont appelés déterminants spatiaux, ou plus exactement, déterminant socio-économiques prépondérants dans la situation instantanée de l'environnement. Ils peuvent prendre la forme de graphiques (figure IV-26).

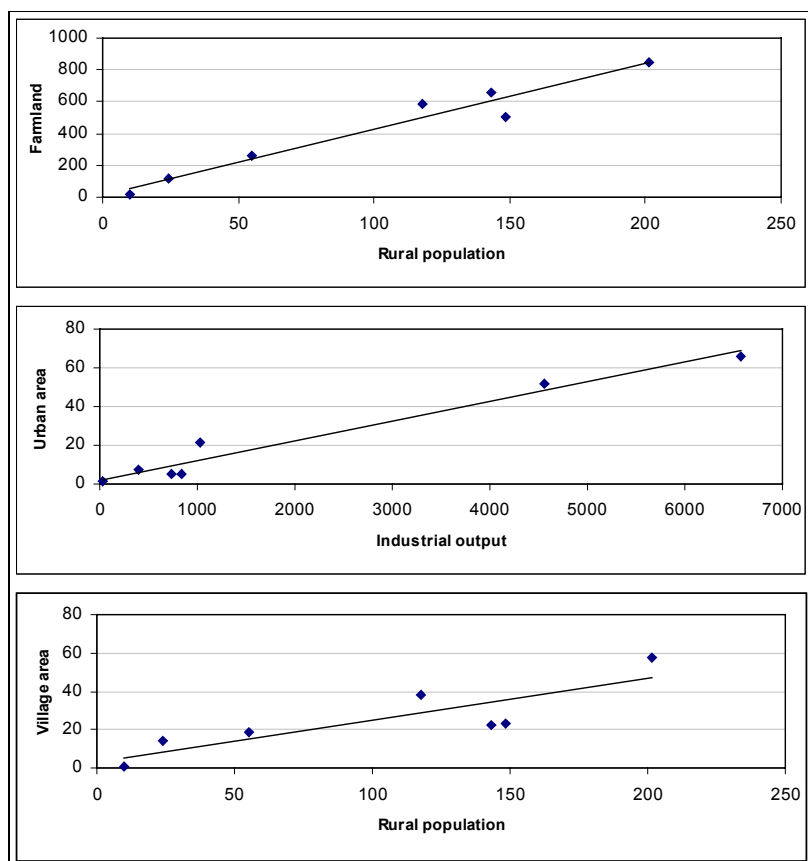


Figure IV-26 : Déterminants spatiaux des composants environnementaux actuels au Ningxia Nord

VII. DISCUSSION

En se basant sur la détection de changements, la classification des ressources des sols et la modélisation de l'interaction homme-environnement, une réflexion peut être menée sur une partie des modes d'occupation spécifique des sols dans l'écosystème du Ningxia Nord :

LES TERRES CULTIVEES (incluant les terrains irrigués et les champs de riz), dynamiquement reliées à la population rurale ($R^2 = 0,956$), ont une extension remarquable (471km²) qui constitue la principale modification connue par l'environnement dans la région, depuis 1987. L'augmentation de la production agricole joue, cependant, un faible rôle dans la croissance du PIB (11,61 %).

L'extension des superficies cultivées est fortement liée avec l'augmentation de la production agricole ($R^2 = 0,731$). Ainsi la population rurale et les activités agricoles sont le facteur décisif de la mise en culture.

$$\text{Terres cultivées} = 1,472 + 3,902 [\text{Population rurale}] \dots\dots\dots(\text{IV-2})$$

$$\Delta \text{Terres cultivées} = -0,363 + 0,024 [\Delta \text{Produit agricole}] \dots\dots\dots(\text{IV-3})$$

La superficie des terres cultivées devrait augmenter de 432 km² en 2010, à un taux d'extension de 39,3 km²/an ou 1,5 %. Si la disparition des terres arables sous l'effet de l'urbanisation et de l'extension des villages (respectivement 45 et 101km², voir les paragraphes suivants) doit être compensée, leur superficie devrait atteindre approximativement 574 km² en 2010 pour faire face à l'augmentation de la population. Cela veut dire que 11,3 % du sol qui n'est pas encore utilisé doit être transformé en terre agricole. Cependant, où pouvons nous trouver un tel territoire amendable pour cette extension? La Plaine de Yinchuan a une longue histoire dans le développement de son agriculture. La terre utilisable a été presque complètement exploitée. Le sable le plus stérile a été converti en terre cultivée pendant les 12 années passées dans les départements de Yongning (vigne et plantation d'éphédre), de Yinchuan (ferme Nanliang), de Helan et de Pingluo. Cette étude montre que les terres arables pourraient être gagnées sur les marais le long de la rivière, les terres sableuses ou sur la prairie sablonneuse le long de la marge ouest de la Plaine de Yinchuan. Mais la mise en culture de ces sols n'est pas chose facile et nécessite des travaux d'irrigation non-négligeable.

LES ZONES URBAINES, avec une superficie actuelle totale de 158,7 km² (66,1 km² pour Yinchuan et 51,5 km² pour Shizuishan) et reliées à la production industrielle ($R^2 = 0,963$), ont une extension de 35,8 km² (19,1km² à Yinchuan et 9,4 km² à Shizuishan) entraînée par la croissance de la population urbaine ($R^2 = 0,971$). Le taux d'augmentation est de 3,0 km²/an ou 2,2% pour la période 1987-1999.

L'augmentation de la production, basée sur les zones urbaines, représente 3,6 % du changement total et occupe 88,4 % de la croissance du PIB. L'analyse de panel et l'analyse transversale démontrent que la population urbaine et ses activités dans l'industrie sont les facteurs principaux de cette composante environnementale et de son évolution (équations IV-4, IV-5).

$$\text{Urbain} = 2,233 + 0,010 [\text{Production industrielle totale}] \dots\dots\dots(\text{IV-4})$$

$$\Delta \text{Urbain} = -0,152 + 0,134 [\Delta \text{Population urbaine}] \dots\dots\dots(\text{IV-5})$$

Ces équations indiquent que les activités socio-économiques de la population urbaine en augmentation, dans l'industrie, le commerce et les services jouent un rôle prépondérant dans

l'extension urbaine. La croissance de la population urbaine est positivement corrélée avec l'augmentation de la production industrielle ($R^2 = 0,958$) et la croissance de PIB ($R^2 = 0,992$). Cela signifie que l'extension urbaine ou l'urbanisation récente peut être attribuée aux activités de la population urbaine en développement, dans le domaine industriel et dans d'autres domaines représentés dans le PIB tels que le commerce et les services.

Moteur principal de l'économie, la zone urbaine représentera une surface de 200,6 km² en 2010. Cette mutation causera encore une perte d'environ 41 km² des terres cultivées.

La pollution de l'environnement et la dégradation des sols sont les conséquences du développement de l'économie, en particulier celui des industries. La dégradation des sols est liée à la production industrielle ($R^2 = 0,708$) en raison de l'exploitation des cailloux et des sables pour la construction urbaine, du développement des mines et des industries houillères. La pollution atmosphérique, l'accumulation des résidus et des poussières de charbon, constituent un grave problème environnemental dans les grandes villes, en particulier, Shizuishan, où le soleil reste voilé. Des poussières provenant des rues et des gaz d'échappement automobiles sont une menace pour la santé des habitants. Comment coordonner le développement de l'économie, l'urbanisation et le contrôle de dégradation de l'environnement ? C'est un sujet très important pour l'urbanisme futur.

LES VILLAGES, avec une superficie actuelle de 174,5 km² et ne représentent qu'une faible part de la structure d'occupation des sols (2%). Ils sont liés à la population rurale ($R^2 = 0,719$, équation IV-6).

$$\text{Village} = 3,361 + 0,216 [\text{Population rurale}] \dots\dots\dots(\text{IV-6})$$

Ainsi que le démontre l'étude de détection de changements, un tel type d'utilisation du sol a augmenté de 68,3km² au cours des 12 dernières années, à un taux d'extension de 5,7 km²/an ou 4,2 %. Si une telle tendance se maintient, les villages occuperont une superficie de 275,3 km² en 2010 (équation IV-7). Donc 101 km² de terres agricoles serraient perdues.

Cette augmentation est liée à la croissance de la main-d'œuvre rurale, l'augmentation de produit vivrier et de production agricole ($R^2 = 0,996$). Cette relation peut être exprimé ainsi :

$$\Delta \text{Superficie construite en milieu rural} = -1,01 + 0,028 [\Delta \text{Produit agricole}] + 0,289 [\Delta \text{Produit vivrier}] - 1,031 [\Delta \text{Main-d'œuvre rurale}] \dots\dots\dots(\text{IV-7})$$

La construction rurale, l'extension des villages, est accomplie par la main-d'œuvre rurale pour améliorer ses conditions de vie et stocker la production agricole.

LES PLANS D'EAU, représentent une superficie de 436,3 km² et constituent 5% du territoire total. Ils sont spatialement liés à la superficieensemencée totale ($R^2 = 0,733$, équation IV-8), et ont connu deux types de changement dans la Plaine de Yinchuan. Le premier, de “terre vers eau” (terres converties en dépressions d’eau ou en étangs de poisson) est lié à l’augmentation de la production agricole ($R^2 = 0,743$, équation IV-9), et implique que les activités des ruraux en agriculture, culture poissonnière, etc., sont les principales causes de cette modification.

$$\text{Retenue d'eau} = 2,318 + 2,159 [\text{Superficieensemencée totale}] \dots\dots\dots(\text{IV-8})$$

$$\text{Terre vers eau} = 0,396 + 0,045 [\Delta\text{Production agricole}] \dots\dots\dots(\text{IV-9})$$

L’autre changement dit d’eau vers terre, représente l’assèchement des plans d’eau ou les plans d’eau ayant été convertis en terres, en partie cultivées. Ce changement est associé avec l’augmentation de la superficieensemencée ($R^2 = 0,867$). L’augmentation de la terre cultivée implique une augmentation des besoins en eau pour l’irrigation. Si les retenues d’eau n’ont pas le moyen de se recharger en eau, elles seront facilement asséchées. Par ailleurs, les dépressions asséchées peuvent être mises en culture (par exemple Lac de Gaomiao au Huinong). Et ceci peut expliquer que la transformation des retenues d’eau en terre, a quelque chose à voir avec l’augmentation de la superficieensemencée :

$$\text{Retenues d'eau vers terre} = -2,006 + 1,672 [\Delta\text{Superficieensemencée}] \dots\dots\dots(\text{IV-10})$$

Donc, les changements concernant les retenues d’eau semblent d’avoir une mobilité transversale qui est liée aux activités agricoles : dans certains endroits, les plans en eau se sont étendus, des terres ont été converties en plans d’eau ou en étang poissonnier ; alors qu’ailleurs ils ont été convertis en terre. Mais au total, la surface des plans d’eau des départements étudiés a connu une nette augmentation de 49 km² (à un taux d’incrémentation de 4,1 km²/an ou 1,0 %) par rapport à l’extension des terres cultivées et des autres activités agricoles. Si une telle tendance se prolonge, 45km² de retenues d’eau supplémentaires devraient être mises en place en 2010. Où se trouvent les ressources en eau qui alimenteront cette extension, dans un contexte où les précipitations ont connu, jusqu’à maintenant, une baisse progressive? Le Fleuve Jaune serait certainement la source principale de ces hypothétiques retenues. Et quel serait alors le destin de la rivière?

LE FLEUVE JAUNE, dont le cours a une surface actuelle de 81,3 km², représente 1,0 % du territoire du Ningxia Nord. Il semble s’être rétréci depuis 1987 de 83,8 km² avec un taux de réduction de 7,0 km²/an ou de 6,1 %. Ce rétrécissement est peut-être lié à plusieurs facteurs naturels et anthropogènes : changement climatique et activités humaines.

La figure IV-27 montre que les précipitations mensuelles de mai à octobre 1987 et 1999 correspondant aux images Landsat acquises. Les précipitations annuelles sont respectivement de 161,4 mm et 165,1 mm. La surface du fleuve, repérée sur les images, devrait être associée aux précipitations des deux mois précédents l'acquisition des images. Les précipitations (75,2 mm) des mois d'août et septembre 1987 (image acquise le 20 septembre) et celles (58,3 mm) des mois de juillet et août 1999 (image acquise le 12 août) seraient déterminantes des surfaces du cours du fleuve. La différence de 16,9 mm pourrait être un facteur causant le rétrécissement du fleuve.

Le Fleuve Jaune a été beaucoup exploité au cours de dernières décennies: endigué à l'amont du bassin. Actuellement, cinq grandes stations hydrodynamiques ont été mises en place dans la vallée majeure du fleuve : Longyangxia, Liji Xia, Yanguoxia, Bapanxia et Qingtongxia. Ceci explique partiellement les impacts produits sur le débit et la surface du fleuve.

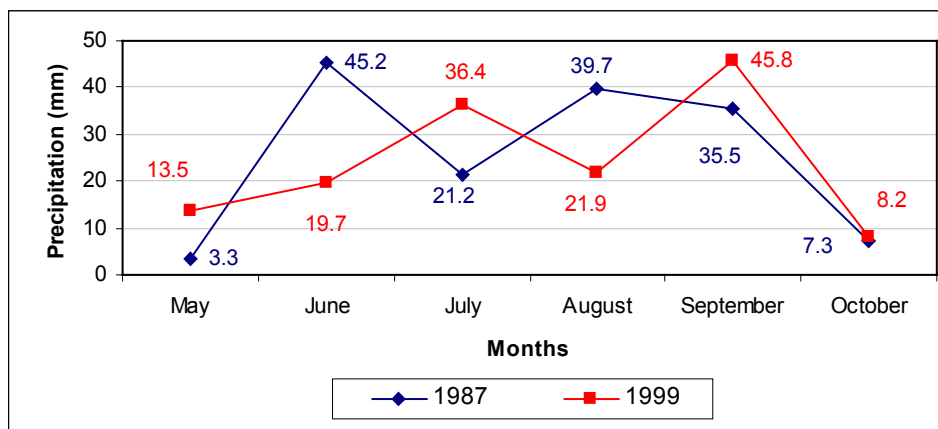


Figure IV-27 : Précipitations mensuelles dans la région de Yinchuan en 1987 et 1999

(Source de données : Bureau de Météorologie du Ningxia)

La rivière a été utilisée pour l'agriculture : irrigation et pisciculture dans la plaine de Yinchuan. Avec l'extension des terres agricoles, de la pisciculture et du stockage contre l'aridité, l'extraction d'eau de la rivière a inévitablement augmenté. Cela provoque la réduction du cours du fleuve.

Le changement météorologique a probablement contribué à la réduction de la surface de la rivière, cependant, les activités humaines jouent un rôle primordial dans cette évolution. Dans le contexte du réchauffement global, si l'extension des terres agricoles et l'utilisation abusive de l'eau persistent à l'amont du bassin, le cours du fleuve risque de disparaître. En 2010, le Fleuve Jaune — berceau de 7000 ans de civilisation chinoise n'existera plus au Ningxia Nord. Ces dernières années, on assiste à l'assèchement fréquent du cours à l'aval du fleuve dans les provinces de Henan et Shandong. Dans ce contexte aride, comment exploiter le fleuve et distribuer les quantités viables pour ces régions ? C'est un défi aux décideurs pour la sauvegarde du Fleuve Jaune et développer durablement les régions du nord-ouest.

LES PRAIRIES SABLONNEUSES, incluant les prairies artificielles (95km²) associées avec les produits des viandes ($R^2 = 0,911$), représentent 9 % du sol total et sont légèrement en relation avec la température moyenne annuelle ($R = -0,625$). Ceci suggère que le climat pourrait être un facteur potentiel influençant ce type de couverture du sol vulnérable. Les travaux de terrain démontrent un autre impact : les activités humaines. Le fait que le pâturage sur la prairie arénacée fragile dans les cônes d'épandage pluvial pourrait facilement mener à une dégradation de l'écosystème du fait que moutons et chèvres arrachent les racines en broutant est établi. Un autre phénomène observé est que les personnes locales extraient quelques types de racines, par exemple, l'éphèdre, le réglisse, des herbes médicinales traditionnelles chinoises poussant sur le sol arénacé de Mu Us. Si ces activités se produisaient dans la grande échelle, la couverture fragile de la végétation serait rapidement détruite. Par conséquent, le fait que ce genre de prairie arénacée, plus ou moins dégradée, puisse être, même partiellement, transformé en terre cultivée, dans un avenir proche, dépend effectivement des conditions naturelles mais principalement des activités humaines telles que le pâturage.

LA JACHERE, incluant des terres cultivées abandonnées et plus ou moins salinisées, est spatialement associée avec la superficie ensemencée totale et la surface des récoltes vivrières ($R^2 = 0,894$).

L'analyse transversale donne des indications, sur l'interaction homme-environnement précédemment présentée, mais également, sur, par exemple, le sol salinisé par l'utilisation d'engrais chimique ($R^2 = 0,681$), et le marais avec la superficie ensemencée totale ($R^2 = 0,676$). Une étude plus approfondie peut être menée, en particulier quand les données détaillées sont disponibles.

VIII. SYSTEME DE SUIVI DYNAMIQUE

Un système de suivi du changement de la couverture et de l'utilisation du sol, basé sur la détection de changements et l'analyse des forces d'entraînement a été conçue en utilisant avec le logiciel ArcView 3.2 et 3.1. Les couches thématiques incluses dans ce système sont les suivants :

- (1) Changements d'occupation des sols de 87 à 99 (13 couches)
- (2) Mode d'occupation des sols en 99 (1 couche)
- (3) Système d'irrigation (1 couche)
- (4) Système de drainage (1 couche)
- (5) Système de transport (incluant les autoroutes et les chemins de fers, 4 couches)
- (6) Rues à Yinchuan (1 couche)

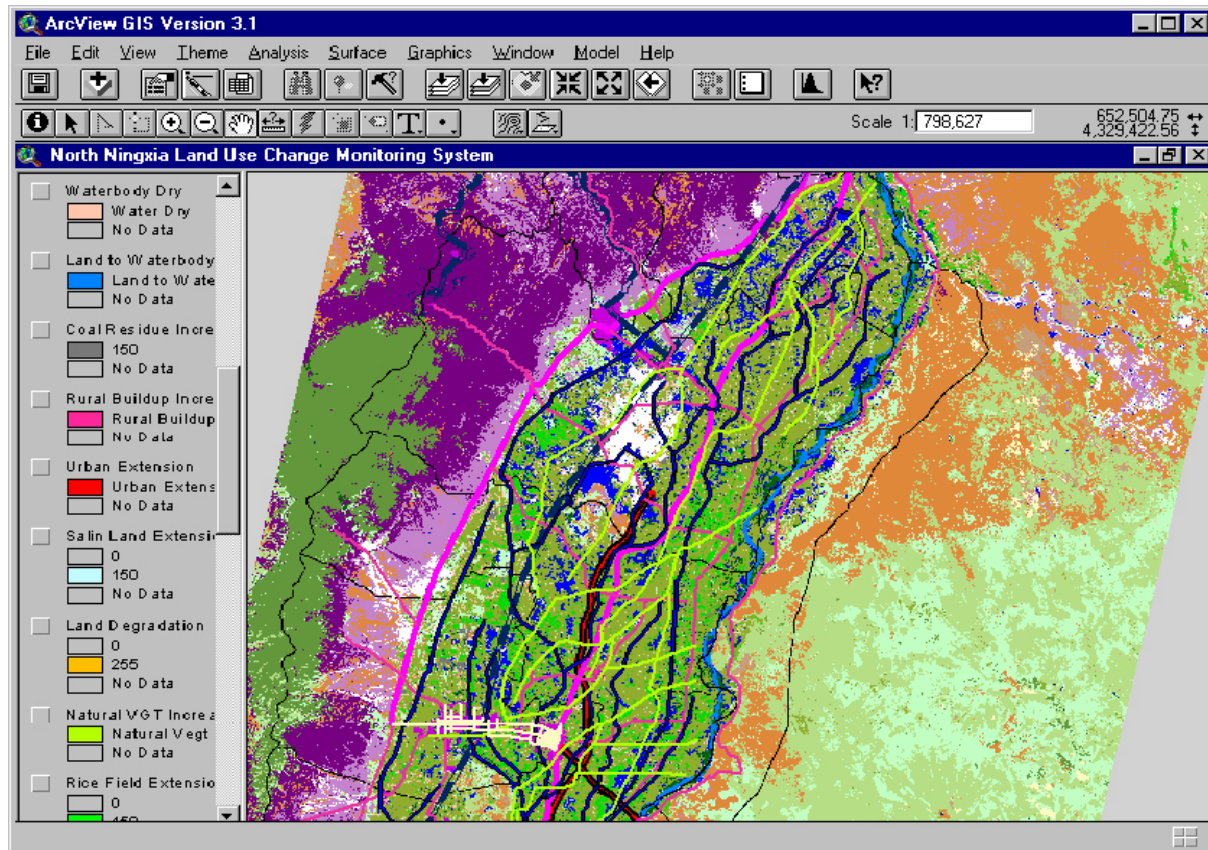


Figure IV-28 : Une vue du système de suivi établi pour Ningxia Nord

- (7) Images de Landsat MSS79, TM87, TM89 et ETM99 (4 couches)
- (10) Surface de l'urbain 99 et du Fleuve Jaune 87 et 99 (3 couches)
- (11) Frontières et étendues des départements (2 couches)
- (12) Données de changements et de mode d'occupation des sols
- (13) Données et socio-économiques et météorologiques au niveau départemental

Avec ce système, les changements de l'environnement et les données d'occupation des sols peuvent facilement être gérées et suivies. Si l'image récente et les données socio-économiques sont mises à jour, plus de détection de changement et de modélisation spatiale seront possibles. Ce système serait donc utile aux gouvernements locaux pour organiser l'environnement et élaborer les politiques d'utilisation du sol durable.

IX. CONCLUSIONS

Une recherche synthétique sur la détection et la modélisation du changement de la couverture et de l'utilisation du sol ainsi qu'une évaluation de son potentiel de développement a été réalisée en adoptant la méthodologie de l'espace au sol et des activités humaines à l'environnement et en se servant des techniques géomatiques telles que la télédétection, le SIG et le GPS. Un système de surveillance dynamique du changement environnemental a été construit sous ArcView GIS, pour le Ningxia Nord.

Cette recherche démontre que 11,7 % du territoire total du Ningxia Nord a évolué depuis 1987 et que l'extension des terres cultivées en est la modification la plus significative (environ 471 km²) et occupe près de la moitié du changement total (49,4 %). Cependant, le rendement agricole joue un rôle relativement faible dans l'économie du Ningxia nord (11,6 % de la croissance du PIB). L'extension urbaine, représentant seulement 3,6 % de tout le changement, est liée à 88,4 % de la croissance du PIB.

On n'a observé aucune désertification progressive mais un secteur de 55,6 km² du sol a été dégradé. Cette dégradation, y compris l'augmentation de résidus de charbon (36,2 %), la dégradation de végétation, la salinisation (52,3 %) et l'augmentation des carrières (11,5 %), se produit dans les départements de Yinchuan, de Shizuishan et de Pingguo où un rapide développement de l'industrie et de l'urbanisation a eu lieu.

Des analyses multivariées ont été menées afin d'identifier les forces d'entraînement des changements environnementaux et les déterminants spatiaux de leurs structures instantanées. Il est extrêmement utile de comprendre le mécanisme de l'évolution environnementale. Si des données socio-économiques plus détaillées, par exemple, à un niveau communal, et la quantité moyenne de l'eau exigée pour cultiver un hectare de récolte, etc., étaient disponibles, les résultats de modélisation seraient plus appropriés. Cette confrontation avec le futur ne conduit pas à l'optimisme. Il n'y a pas beaucoup de terre arable pour l'extension ou la mise en culture, ni de ressources d'eau disponibles pour le futur développement, et le Fleuve Jaune pourrait devenir se tarir dans dix ans. Ces pensées devraient être prises en compte dans la prise de décision politique pour la planification et le développement d'une utilisation durable du sol.

Chapitre V : Etude de cas n° 3

EVALUATION DES CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX AU SHAANXI NORD, CHINE^❶

❶ D'après *Weicheng Wu*, *Evaluation of land use and cover changes in North Shaanxi, China*, *Photo-Interpretation*, Vol.39, No.2, p.15-29, plates p.35-45, 2003.

RESUME : Zone de transition entre la terre arénacée de Mu Us et le Plateau de Loess, la partie du Nord de Shaanxi est l'un des secteurs arides et écologiquement vulnérables de la Chine du Nord-Ouest. Il est exposé aux impacts des facteurs naturels et des activités humaines. L'étude d'une telle zone est donc particulièrement intéressante pour effectuer un suivi intensif de changement d'utilisation du sol et établir un système de surveillance dynamique visant à comprendre le mécanisme des changements, les rapports homme-environnement, et à produire des références utiles pour les gouvernements centraux et locaux dans leur planification d'utilisation durable du sol. Les images multitemporelles de Landsat ont été employées pour la détection de changement en adoptant une méthode synthétique comprenant la correction atmosphérique, la transformation de chapeau à cône, le differencing d'indicateur, l'établissement de seuils (thresholding), l'identification des types de changement et la quantification au niveau départemental. Une classification intensive a été réalisée sur l'image récente pour mesurer les ressources actuelles des sols. Une analyse de régression multivariée a été opérée pour indiquer les forces d'entraînement des changements environnementaux et comprendre l'interaction entre les activités humaines et les modifications environnementales en incorporant les résultats obtenus par la télédétection et les données socio-économiques départementales. Les résultats de modélisation par le modèle de régression suggèrent que la dégradation de végétation — le changement prédominant dans le secteur d'étude, est probablement liée à l'érosion de sol ($R^2 = 0,985$) ainsi qu'à la dégradation de la prairie ; l'extension des terres cultivées, se produisant principalement dans les vallées du département de Yulin, est associée à l'augmentation de produit vivrier ($R^2 = 0,987$) ; l'urbanisation, spatialement attachée à l'exploitation de charbon, est liée à la croissance de la population urbaine ($R^2 = 0,881$) ; et la diminution de la surface des retenues d'eau, ayant lieu dans la terre arénacée, est négativement corrélée avec l'augmentation de terre cultivée ($R^2 = 0,562$). Par conséquent, les facteurs qui président aux changements de l'utilisation des sols dépendent de diverses activités socio-économiques humaines même si l'origine de cette dégradation se trouve dans les politiques peu raisonnables d'exploitation des ressources des sols.

MOTS CLES : Changements d'occupation des sols, images de Landsat TM et ETM, modélisation par les modèles de régression multivariée, forces d'entraînement, interaction homme-environnement, évaluation, système de suivi, Shaanxi Nord/Mu Us, Chine.

I. INTRODUCTION

Une question fréquemment soulevée dans le domaine des régions arides et semi-arides est celle de la *désertification*, sujet largement abordé depuis 1975 — date à laquelle Lamprey a signalé que le désert du Sahara avait avancé vers le sud à un taux de 5-6 km/a. Le débat ne prit fin qu'au début des années 1990 quand cette avancée du désert du Sahara fut définitivement reconnue comme étant un mythe (Tucker *et al.*, 1991, Hellden, 1991, etc.). Cependant, cela ne signifie pas que la *dégradation* du sol, prenant la forme de réduction de biomasse, de perte d'eau, d'érosion de sol et de salinisation, n'existe pas. Lorsque la couverture du sol est sérieusement dégradée, qu'elle réunit toutes les conditions du désert, ou comme Warren *et al.* (1988) le disaient, quand la couverture de végétation diminue à environ 35% on peut parler de désertification. Par conséquent, la dégradation est un problème commun dans l'environnement aride du fait à sa susceptibilité aux facteurs naturels et anthropogènes.

Zhu *et al.* (1995), Chen (1997) et Leng *et al.* (1997) ont analysé les phénomènes de dégradation et/ou de désertification du sol, lors des dernières décennies, en Chine du Nord-Ouest et ont conclu qu'une grande surface de terre a été désertifiée, à différents degrés, ou est en cours de désertification à un taux d'environ 1,39% ; et que la cause principale en sont les activités humaines irrationnelles, telles que la culture intensive, le surpâturage, le déboisement, etc. Divers médias ont rapporté, dans les années 90, que les déserts en Chine du Nord, y compris la terre arénacée de Mu Us et le désert de Tengger, se déplaçaient vers le sud et menaçaient l'environnement humain, dans la partie Nord de Shaanxi et à l'ouest des provinces de Ningxia. L'orage de poussière se produisant presque chaque printemps dans le ciel de Chine, en particulier à Beijing, ces dernières années, a rendu évident le fait que la dégradation ou la désertification sérieuse des sols s'aggrave dans la région du Nord-Ouest de la Chine. Il est donc primordial que les gouvernements centraux et locaux chinois organisent une recherche et une évaluation intensives sur les changements environnementaux dans cette région aride. Ce constat est à l'origine du projet de coopération Sino-Belge sur la Chine du Nord-Ouest. Shaanxi Nord /Mu Us a été choisi pour être l'un de nos sites d'étude.

Le secteur d'étude est situé dans la zone frontière entre deux provinces Shaanxi et Mongolie intérieure (figure V-1) et, d'un point de vue géomorphologique, il s'agit d'une région de transition entre le plateau de Löss (à l'est) et la terre arénacée de Mu Us (à l'ouest). C'est un territoire d'environ 28.000 km² qui s'étend de 108°38'E à 111°21'E en longitude et de 37°58'N à 39°49'N en latitude. Cet espace est formé de six départements administratifs (*county*) appelés respectivement Yulin, Shenmu, Fugu, Jiaxian (une moitié) au Shaanxi, Ejinhoro et Uxin (une moitié) en Mongolie intérieure (figure V-1). La température moyenne annuelle varie de 8,9 à 10 °C ; les précipitations annuelles s'élèvent à

264-425 mm avec une moyenne de 353,6 mm dont la majeure partie tombe, de manière diluvienne, entre juillet et septembre ; l'évaporation annuelle se situe autour de 2388,7 mm (Xu, 1999 ; Chen *et al.*, 2002). La valeur de rapport de la précipitation à l'évaporation (P/EVP) est d'environ 0,15. Selon le MAB (programme intergouvernemental sur l'homme et la biosphère de l'UNESCO, 1977), ainsi que nous l'avons mentionné dans le Chapitre 1, la région de Shaanxi Nord /Mu Us est située dans une zone de climat aride. Les vents, principalement de nord-ouest, ont une vitesse de 5 m/s (la vitesse maximum atteignant les 20 m/s), ils soufflent 230 fois par an et peuvent soulever des sables et les déplacer d'un endroit à l'autre (Gao *et al.*, 2001). Ils jouent un rôle important dans le mouvement de dunes de sable et l'érosion de sol.

Le loess et le sable sont facilement transportés par le vent et les trombes d'eau, l'érosion du sol est donc devenue un problème grave dans le plateau arénacée et les collines de loess (Chen, 1997 ; Leng *et al.*, 1997 ; Leung, 1997 ; Xu, 1999 et Gao *et al.*, 2001). La Grande Muraille a été ensablée à proximité de la ville de Yulin. Dans les années 90, les médias ont rapporté une avancée du désert vers le sud. D'un point de vue historique, des activités humaines induisant une dégradation des sols se sont développées dans la région étudiée. Chen *et al.* (2002) rapportent, qu'avant la Dynastie Qin, la couverture forestière représentait plus de 50% du plateau Ordo (appelé aujourd'hui Mu Us). Le déboisement a commencé sous la dynastie Han (206 avant JC-220) et a continué pendant la période Tang (618-907) et, plus récemment, sous la dynastie Qing (1644-1911). En 1697, l'empereur Kangxi a encouragé les paysans de l'intérieur du pays à immigrer dans cette région pour s'approprier des terres. Un déboisement intensif, lié à la construction de temples et d'habitations de notables, s'est produit sur le plateau. La forêt primaire a été dévastée et la prairie originelle dénudée. Dans les années 1950, avec les politiques "priorité au développement de la production d'acier" et "Grand Bond en avant", un déboisement massif a eu lieu dans tout le pays. La couverture végétale de la région de Mu Us n'a pu faire face à cette destruction. La région Shaanxi Nord/Mu Us connaît donc depuis longtemps une dégradation due aux activités humaines. Dans les années 80, l'application de la politique "réformer et ouvrir" a généré de nouveaux types de changements des sols dus au développement de l'exploitation du charbon. Quelle est la situation actuelle de l'utilisation du sol et de ses récents changements alors ? La désertification continue-t-elle aujourd'hui ? Il est important de mener une étude environnementale avant d'entamer une exploitation, à grande échelle, des ressources des sols.

Quelques auteurs, mentionnés plus haut, ont déjà réalisé des études sur la dégradation des sols dans la région. Cependant, seul un petit nombre d'entre eux ont orienté leur étude vers l'évaluation de l'interaction homme-environnement en s'appuyant sur une approche quantitative et un système dynamique de suivi. C'est pourquoi, cette étude a pour but premièrement, de distinguer les changements d'occupation des sols; deuxièmement, de vérifier si les dernières décennies ont connu une désertification ou une avancée du désert vers le sud ; troisièmement, de comprendre les impacts des activités humaines sur les changements environnementaux afin d'offrir aux gouvernements locaux une référence utile pour la planification d'une utilisation des sols durable.

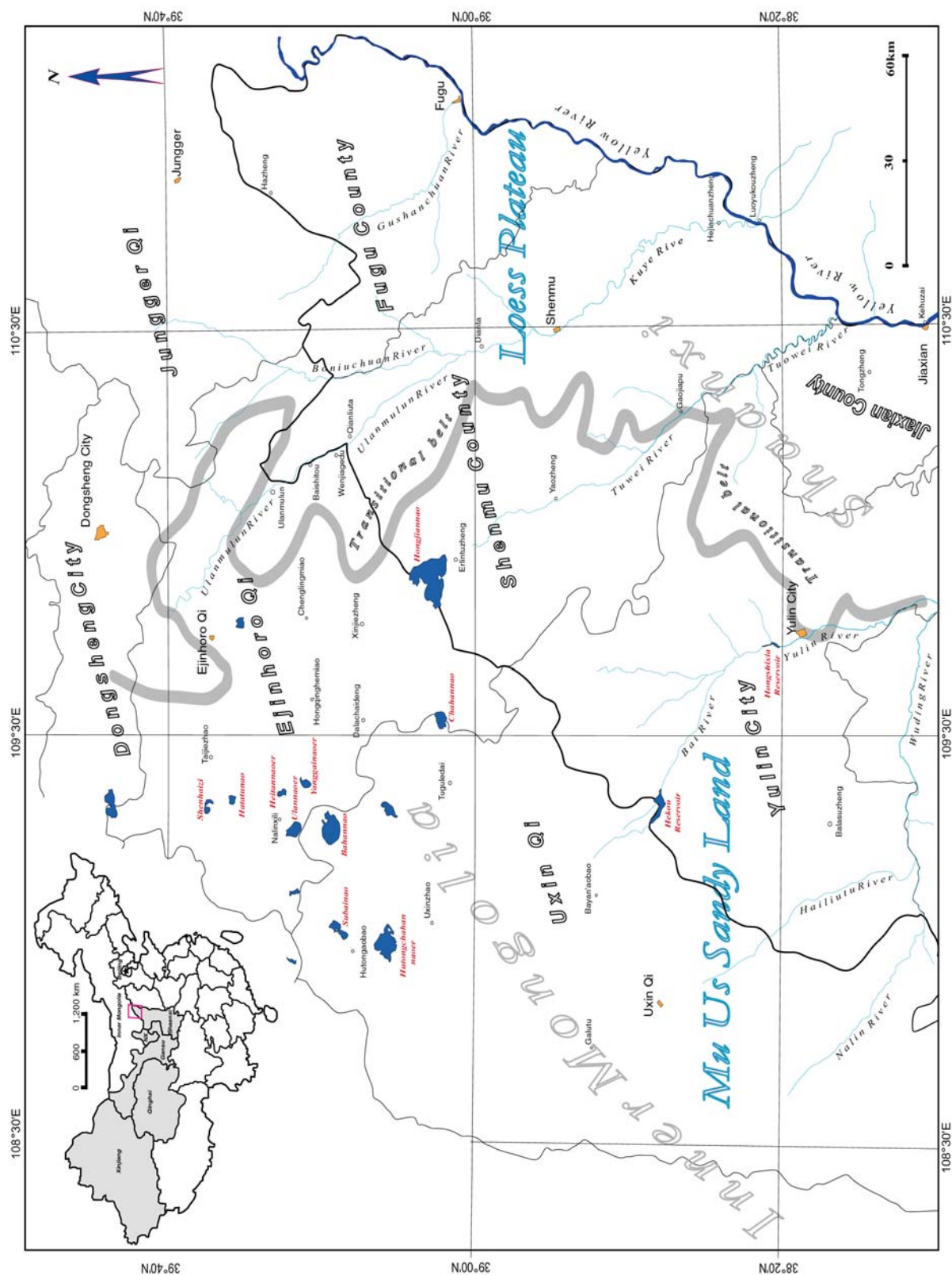


Figure V-1 : Localisation, unités administratives et géomorphologiques de la zone étudiée

— Shaanxi Nord/Mu Us, Chine

Des images de télédétection, des données socio-économiques départementales ainsi que des logiciels de traitement comme PCI, ER Mapper, XLSTAT et ArcView GIS ont été utilisés pour cette étude.

II. METHODOLOGIE

Une approche synthétique composée d'analyses multidimensionnelles, de l'espace au sol et des activités humaines aux modifications environnementales, a été utilisée pour dresser un bilan de l'utilisation des sols et de la couverture de la région de Shaanxi Nord/Mu Us. La méthodologie a deux aspects : la télédétection pour effectuer la distinction des différents types de changement et l'enquête sur les ressources actuelles du sol ; et la modélisation statistique pour analyser les relations homme-environnement. La méthode de travail est présentée dans la figure V-2.

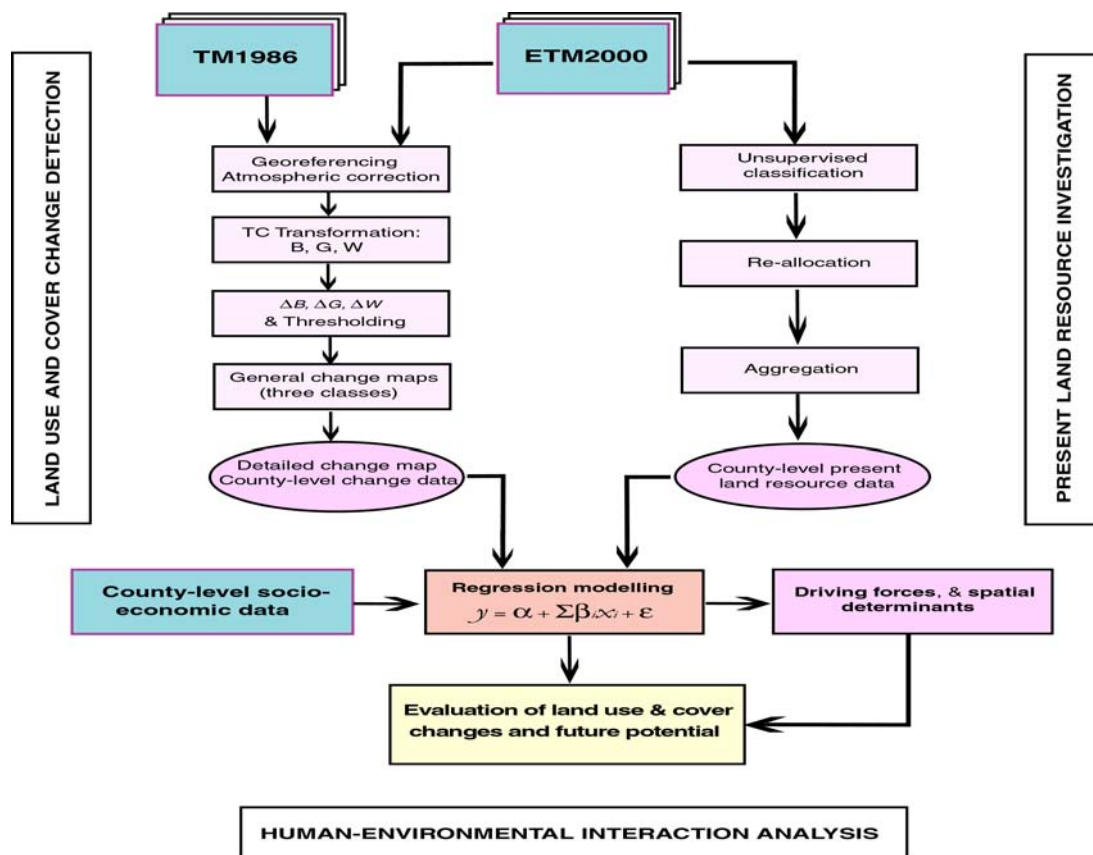


Figure V-2 : Méthodologie utilisée pour cette étude

III. IDENTIFICATION DES CHANGEMENTS

La détection de changement est le procédé qui consiste à identifier plusieurs états d'un objet ou d'un phénomène en les observant à différents moments (Singh, 1989). Grâce aux avantages liés à l'observation macroscopique et multitemporelle, les données de télédétection sont souvent utilisées pour obtenir et évaluer les informations sur le changement d'utilisation des sols et de couverture. Cette méthode ne devrait, idéalement, utiliser que des données issues d'un même capteur ou d'un capteur similaire, d'une même résolution spatiale, d'un même angle de vue, de mêmes bandes spectrales et obtenues à une même heure. Les dates anniversaires sont souvent choisies pour réduire l'incidence de l'angle solaire et des différences saisonnières (Lillesand *et al.*, 1994). C'est pour cette raison que nous avons opté, dans cette étude, pour les images de Landsat TM en date du 2 août 1986 et d'ETM du 31 juillet 2000 (Path : 127 et Row : 33).

1. CORRECTION GEOMETRIQUE

Les images récentes de Landsat ETM ont d'abord été rectifiées d'un point de vue géométrique, avec le datum WGS84 et la projection UTM (49) basée sur des cartes topographiques (au 1/250,000 et au 1/500,000). Puis elles furent utilisées comme référence pour corriger les anciennes images TM (du 2 août 1986) avec 84 GCP en utilisant un modèle polynomial de 3^{ème} ordre et un ré-échantillonnage bilinéaire. L'erreur de RMS de la correction image par image est comprise entre 0,35 et 0,50 pixels.

2. CORRECTION ATMOSPHERIQUE

Comme nous l'avons décrit dans l'étude du Ningxia Nord (Chapitre IV), la même méthode centrée sur l'image a été appliquée à cette recherche pour corriger l'effet atmosphérique à l'aide de la transformation de chapeau à cône (Crist *et al.* 1984a, 1984b et 1986a).

Après une transformation linéaire orthogonale, le *quatrième composant*, principalement obtenu par la bande 1 et associé à la dispersion atmosphérique, constitue un indicateur de brume (équation IV-1, Chapitre IV). La valeur totale de brume de chaque pixel a donc pu être calculée. La valeur moyenne de brume, du lieu observé, a été utilisée pour enlever l'effet de dispersion. La valeur moyenne d'ETM (2000) est de 19,66 et celle de TM (1986) de 68,58. La valeur de brume d'une image ETM (2000) est nettement moins élevée que celle de TM (1986), c'est pour cette raison que les données ETM, au niveau "1R", ont été corrigées, sur le plan de la radiométrie, par le fournisseur de données (EOS Data Center).

Ensuite ces valeurs moyennes ont été attribuées à chaque bande, en accord avec le résultat de Chavez de 1988 (tableau 2-2), en supposant que les deux images ont été obtenues lors de journées très claires.

Dans cette étude, les deux images ont été prises quasiment le même jour de l'année (un jour d'intervalle en quatorze ans), donc la correction de la radiation relative à la saison et de l'angle solaire n'est pas nécessaire. Contrairement à l'étude du Ningxia Nord, le compte numérique de pixel n'a pas été transformé à la réflectance.

3. TRANSFORMATION DE CHAPEAU A CONE

Dans le but de transformer et d'amplifier les informations sur la couverture végétale et pour réduire la quantité de données, différents indices de végétation (comme NDVI) sont utiles. Pour obtenir plus de précision, en ce qui concerne les informations sur l'humidité et la brillance du sol, une fois de plus la transformation de chapeau à cône a été utilisée. Les paramètres de transformation ont été présentés dans le tableau 2-4 (Chapitre II).

4. DETECTION DE CHANGEMENTS

Ainsi que nous l'avons décrit en détail dans le Chapitre II, l'algorithme "differencing — seuillage — identification de type de changements" a été suivi. Le differencing est présentée dans l'équation V-1.

$$\Delta G = (G_{2000} - G_{1986} + C)/q \dots\dots\dots(V-1)$$

où

ΔG — Différence de verdeur, $\in (0, 255)$

G_{2000} — Verdeur d'ETM (31 juillet 2000) atmosphériquement corrigée

G_{1986} — Verdeur de TM (2 août 1986) atmosphériquement corrigée

C — Constante pour compenser la valeur minimum de ΔG

q — Coefficient normalisé équivalent à $(C + \text{valeur maximum du } \Delta G \text{ d'origine})/255$. Dans cette étude, $C = 159$ et $q = 1,3725$ pour la différence de verdeur.

ΔB ($C = 144$, $q = 1.4314$) et ΔW ($C = 235$, $q = 1.4667$) peuvent être calculés de la même façon.

Le seuillage (établissement de seuil) "treshholding" pour déterminer l'occurrence d'un changement a été réalisé en ajoutant un $\frac{1}{4}\sigma$ à chaque extrémité de $M + 1.5\sigma$ à $M + 3.5\sigma$ pour le changement positif et de $M - 1.5\sigma$ à $M - 3.5\sigma$ pour le changement négatif (figure V-3 et tableau 5-1). Dans ce cas, M représente la valeur moyenne de l'indice différencié ΔB ou ΔG ou ΔW et σ représente l'écart standard de l'indice. Les seuils fixés pour déterminer l'occurrence ou l'absence de changement sont indiqués dans le tableau 5-1.

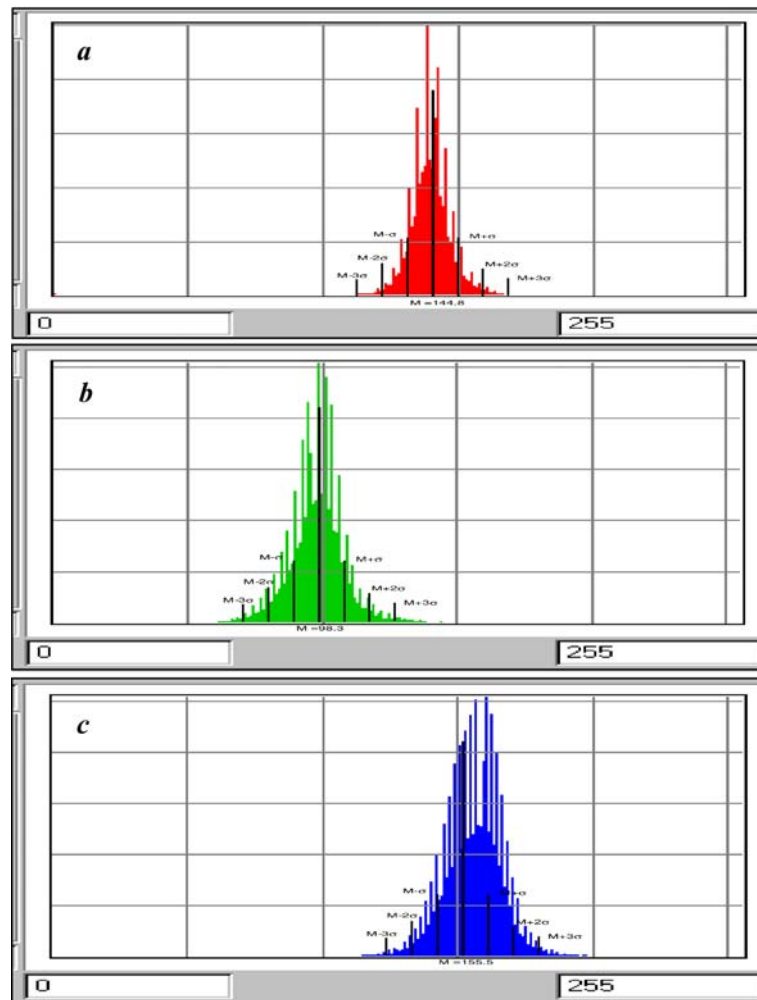


Figure V-3 : Etablissement de seuils (thresholding) pour déterminer le changement positif et négatif

a : ΔB , b : ΔG , c : ΔW

Les résultats du differencing et de la méthode des seuils (thresholding) s'expriment dans des cartes générales comprenant trois catégories : changement négatif, absence de changement et changement positif. En ce qui concerne l'indicateur ΔG , un changement négatif signifie une dégradation de végétation, en incluant la conversion de terres agricoles en urbain et un changement positif signifie une augmentation de la couverture ou de la vigueur de végétation. L'interprétation de ΔB paraît plus complexe : le changement positif— augmentation de la brillance du sol — incluant dégradation de végétation, urbanisation et assèchement des plans d'eau ainsi que diminution de la surface d'eau ; le changement négatif représentant une diminution de la brillance du sol, en incluant l'augmentation de végétation, la transformation de terre en plan d'eau, l'augmentation des résidus de charbon, etc. Les cartes ne comportant que trois classes ne sont pas efficaces pour illustrer la réalité du changement et pour évaluer le changement lié à une utilisation intensive du sol. Il est nécessaire de faire la distinction entre ces différents types de changement. Une comparaison visuelle des cartes

générales de changement issues de ΔB , ΔG , ΔW et des 741 compositions d'ETM (2000) et de TM (1986) a permis de distinguer les différents types de changement (par exemple, l'extension agricole, l'extension urbaine, la dégradation de végétation, la diminution des plans d'eau, etc.) et de réaliser une carte détaillée de changement de la couverture du sol. Ces changements ont été quantifiés à un niveau départemental, pour être intégrés avec les données socio-économiques départementales dans la réalisation d'une modélisation de régression.

Tableau 5-1 : Paramètres pour le test du seuillage (thresholding)

Indicateurs différenciés	ΔB	ΔG	ΔW
Minimum	0	0	31
Maximum	255	255	255
Moyenne (M)	144.81	98.27	155.47
Ecart standard (σ)	12.19	12.14	12.47
Seuils proposés pour le changement positif			
M+1.5 σ	163.09	116.48	174.17
M+1.75 σ	166.14	119.52	177.29
M+2.0 σ	169.19	122.55	180.40
M+2.25 σ	172.23	125.59	183.52
M+2.5 σ	175.28	128.62	186.64
M+2.75 σ	178.33	131.66	189.75
M+3.0 σ	181.38	134.69	192.87
Seuils proposés pour le changement négatif			
M-1.5 σ	126.53	80.06	136.77
M-1.75 σ	123.48	77.02	133.65
M-2.0 σ	120.44	73.99	130.54
M-2.25 σ	117.39	70.95	127.42
M-2.5 σ	114.34	67.92	124.30
M-2.75 σ	111.29	64.88	121.19
M-3.0 σ	108.25	61.85	118.07

Note : les seuils retenus apparaissent en caractère gras.

5. RESULTATS

L'application de la procédure, précédemment présentée, a permis de procéder à une détection de changement efficace dont les résultats sont présentés dans le tableau 5-2, figures V-4 et V-5.

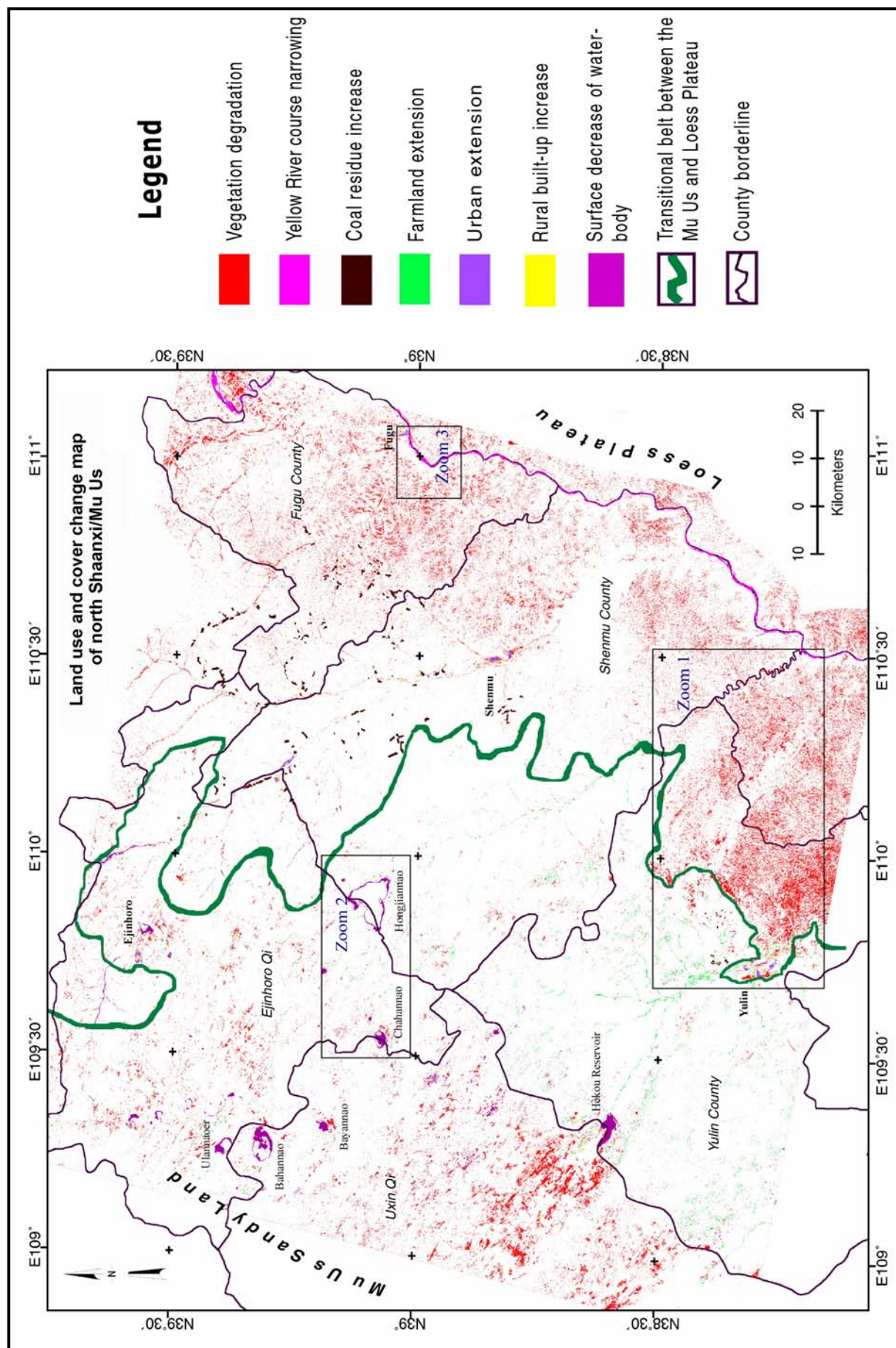
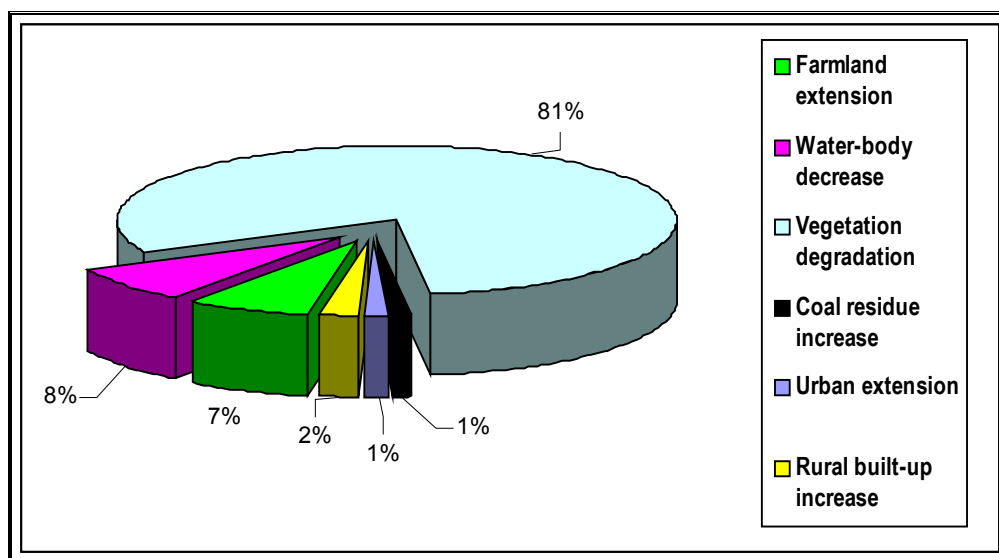


Figure V-4: Changements d'occupation des sols au Shaanxi Nord/Mu Us de 1986 à 2000

Tableau 5-2 : Données départementales de changement de l'utilisation des sols pour Shaanxi Nord/Mu Us entre 1986 et 2000

Département	Zone administrative	ΔRésidus de charbon	ΔTerres agricoles	ΔPlans d'eau	ΔVégétation	ΔUrbain	ΔConstruction en milieu rural	ΔConstructions totales
Fugu	3292	7,2	1,8	0	-249,7	1,7	8,7	10,4
Shenmu	7554	10,1	15,8	-10,1	-205,8	7,5	11,8	19,3
Yulin	> 6903	1,2	70,3	-18,5	-269,2	7,4	5,8	13,2
Jiaxian (1/2)		0	0,8	0	-185,3		0,2	0,2
Ejinhoro Qi	6021	0,1	17,5	-43,7	-111,7	3,7	6,1	9,8
Uxin Qi (1/2)		0	7,1	-52,1	-229,4		2,9	72,9
Total	27718	18,6	113,3	-124,3	-1251,1	20,3	35,5	55,8
Taux de changement total	(km ² /an)	1,3	8,1	-8,9	-89,4	1,5	1,5	4,0
	%		1,4%	-2,7%	-0,5%			6,6%

Note : les changements sont exprimés en km² et les taux de changement en km²/an.

**Figure V-5 : Distribution des changements en pourcentage**

Une zone d'une superficie de 1619 km² (représentant 5,8 % du territoire total) a changé au cours de la période 1986-2000. La modification principale connue par l'environnement rural est la dégradation de la végétation qui a vu la conversion, à un taux de 89,4 km²/an, de près de 1251 km² d'une ancienne prairie dense et herbue et d'une partie des terres agricoles en espace à la végétation clairsemée ou en terre dénudée. Cette modification est survenue à la fois dans les terres arénacées et

dans les collines de loess, en particulier sur le plateau de loess de Yulin, de Jiaxian et de Fugu. Le zoom 1 dans la figure V-4 a été agrandi et présenté dans la figure V-6.

Le deuxième changement important est la réduction de surface des plans d'eau (124 km^2), dans les terres arénacées du Mu Us, avec un taux de réduction de $8,88 \text{ km}^2/\text{an}$ (ou $2,7 \%$). La surface du lac Hongjiannao s'est réduite de $12,6 \text{ km}^2$ et le réservoir de Hekou, encore plein en 1986, était complètement asséché en 2000. En réalité, la plupart des lacs et des bras de rivières ont connu l'assèchement, à différents degrés. Le zoom 2 de la figure V-4 présente ce changement (figure V-7).

La superficie agricole s'est considérablement étendue ($113,3 \text{ km}^2$ avec un taux de $8,1 \text{ km}^2/\text{an}$ ou $1,4 \%$), en particulier dans les vallées de Yulin (figures V-4 et V-6), où la nappe aquifère affleure. Ces vertes vallées sont de véritables oasis dans le désert. Dans le même temps, environ 20 km^2 de terres agricoles ont été converties en zones urbaines dans les départements de Yulin, Shenmu, Fugu et Ejinhoro.

Les zones de construction se sont étendues d'environ $55,8 \text{ km}^2$ à un taux de $4,0 \text{ km}^2/\text{an}$ ou $6,6 \%$. Cette augmentation inclut l'extension urbaine ($20,3 \text{ km}^2$) et celle de la construction en milieu rural ($35,5 \text{ km}^2$). L'extension urbaine est associée, sur un plan spatial, aux départements où des mines de charbon sont exploitées et où les industries se sont développées. L'urbanisation s'installe là où l'on trouve des mines.

Les résidus de charbons peuvent rarement être détectés dans les images TM datées du 2 août 1986, alors qu'en 2000 une augmentation importante de $18,6 \text{ km}^2$ est repérable aux abords des mines de charbon et des routes dans les départements de Shenmu et Fugu (respectivement $10,1 \text{ km}^2$ et $7,2 \text{ km}^2$). Ce changement est dû au rapide développement, depuis le milieu des années 80, de l'exploitation du charbon dans le bassin houiller du Shen(mu)fu(gu)-Dongsheng.

A la frontière des deux provinces de Shaanxi et Shanxi, 19 km^2 du cours du Fleuve Jaune ont été transformés en terre. Ce changement est probablement dû à l'augmentation de l'aridité et/ou à une surexploitation agricole des ressources en eau, dans les parties supérieures et médianes du fleuve. Les raisons du rétrécissement devront être élucidées ultérieurement. Le zoom 3 issu de la figure V-4 présente ce changement dans la figure V-8.

Une importante découverte de cette étude est que l'avancée vers le sud des terres arénacées du Mu Us n'est pas visible pour la période 1986-2000, même si elle peut avoir eu lieu au cours de l'histoire.

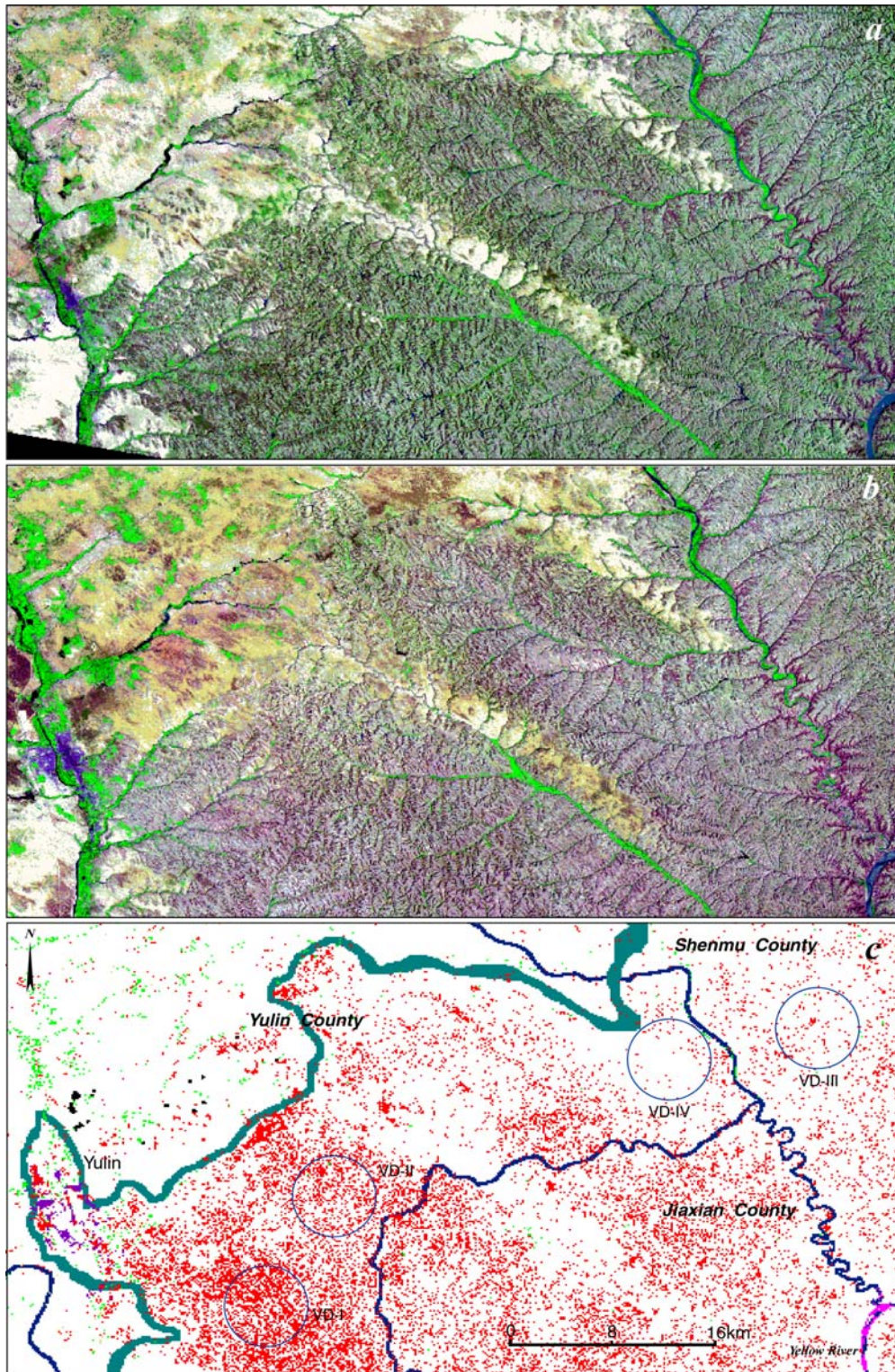


Figure V-6 : Zoom 1 montrant la dégradation de la végétation sur le plateau de loess

a : TM 741 composition (1986), b : ETM 741 composition (2000) ; c : carte de changement d'utilisation du sol issue du zoom 1. La dégradation de la végétation (VD) a été divisée en quatre niveaux (visibles dans les cercles) selon leur degré de dégradation et respectivement appelés VD-I, VD-II, VD-III et VD-IV. Les données correspondant à chaque cercle sont listées dans le tableau 5-6. Les codes de couleurs sont les mêmes que ceux adoptés pour la figure V-4.

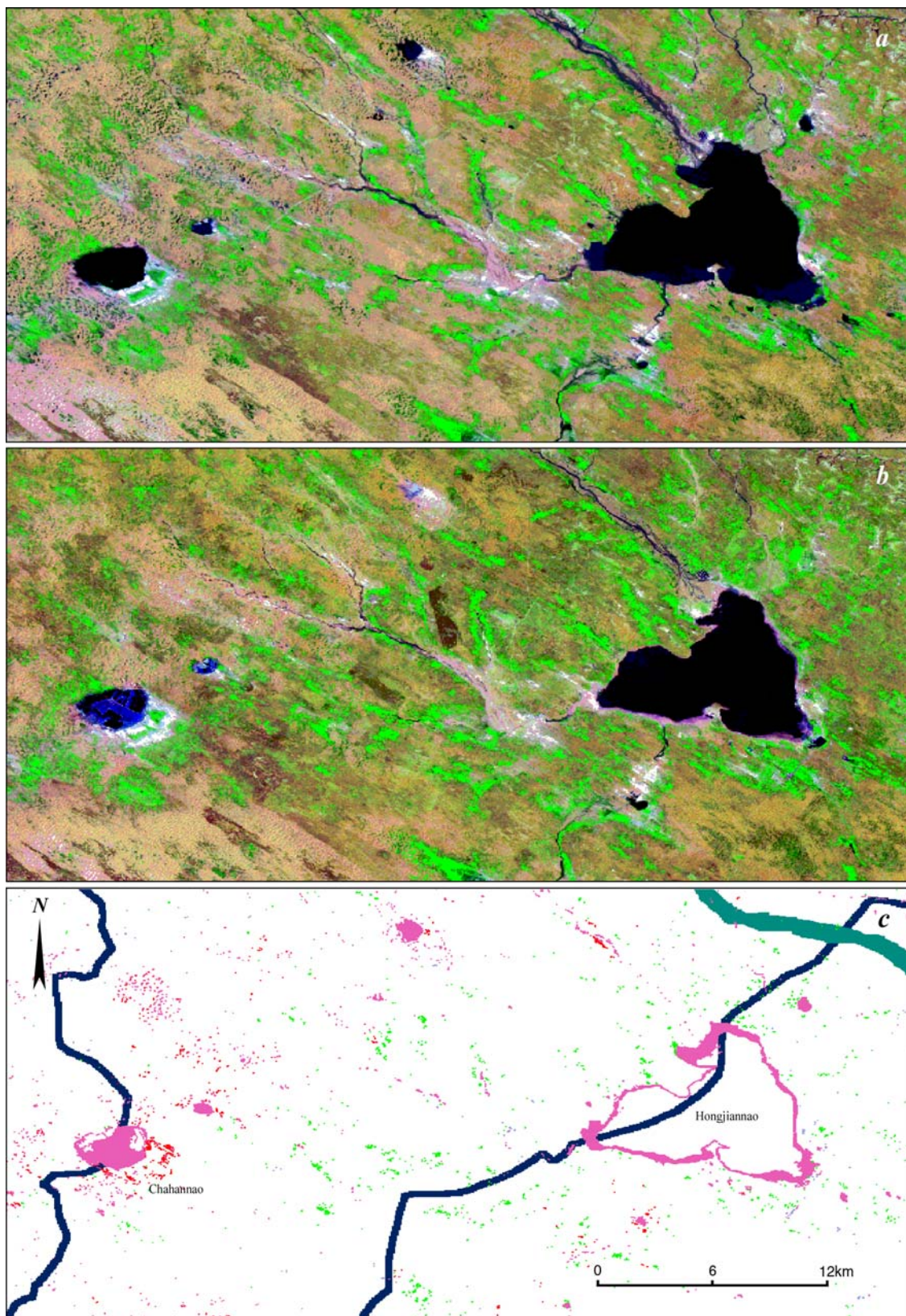


Figure V-7 : Zoom 2 révélant la diminution des plans d'eau dans les terres arénacées du Mu Us.

a : TM 741 composition (1986), b : ETM 741 composition (2000), et c : carte de changement de la couverture du sol

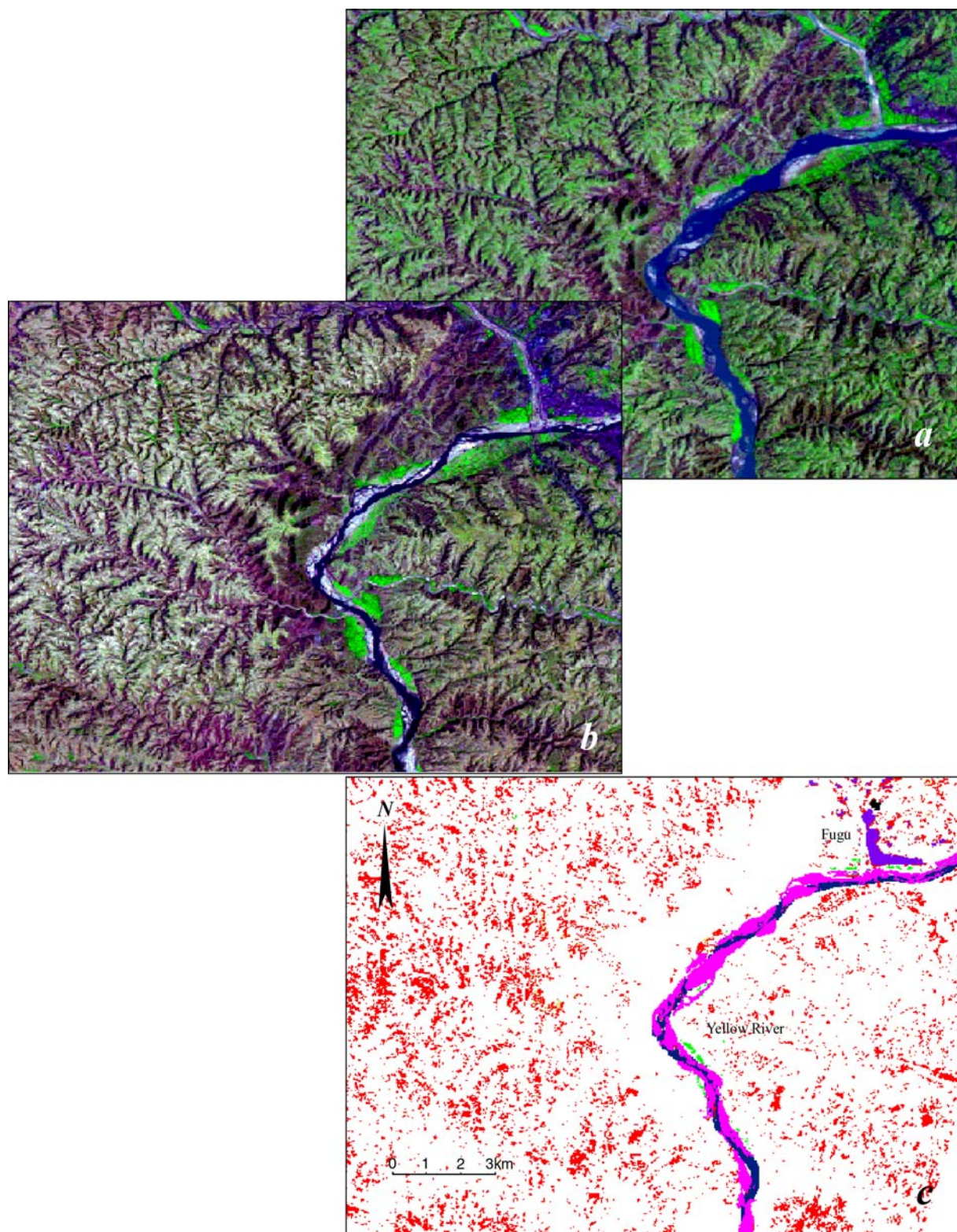


Figure V-8 : Zoom 3 représentant la transformation en terre du cours du Fleuve Jaune, dans les 14 dernières années
a : TM 741 composition (1986), b : ETM 741 composition (2000), et c : carte de changement de la couverture du sol, issue de la figure V-4.

IV. ENQUETE SUR LES RESSOURCES ACTUELLES DU SOL

L'objectif de cette étude est de produire les données actuelles sur les ressources du sol afin de faciliter aux gouvernements locaux, l'évaluation du changement d'utilisation du sol. Cette tâche a été réalisée grâce à une classification des données de télédétection récentes (images ETM du 31 juillet 2000). Les travaux de cette recherche seront utilisés en Chine, donc un "Système de classification de la recherche fondamentale en écologie et en environnement" a été introduit dans cette étude.

La classification a commencé par une classification non supervisées puis par un traitement de post-classification, c'est-à-dire *une réallocation* des groupes mal distribués suivie d'une *agrégation* pour établir des catégories de groupes similaires. Le mode d'occupation du sol de la zone étudiée fut finalement quantifié au niveau départemental. Les procédures mises en œuvre pour cette classification sont les mêmes que celles que nous avons utilisées pour la région de Ningxia Nord (Chapitre IV).

Une carte de l'occupation du sol à dix groupes a été élaborée ; les résultats sont présentés dans les figures V-9 et V-10 ainsi que le tableau 5-3. La précision mesurée en utilisant la méthode de "vérification aléatoire sur les transects", proposée par l'auteur au Chapitre IV, est de 92 %.

Tableau 5-3 : Données départementales d'occupation des sols pour le Shaanxi Nord/Mu Us

No	Types d'occupation du sol	Ejinhoro Qi	Fugu Cty	Shenmu Cty	Yulin City	Jiaxian Cty	Uxin Qi	Total	Pourcentage
1	Plan d'eau	63,1	45,5	114,8	20,5	9,1	18,5	271,4	1%
2	Terres agricoles	131,4	14,5	146,0	264,3	12,4	59,2	627,8	2%
3	Forêt	484,5	86,7	305,0	132,2	18,3	193,2	1219,8	4%
4	Sol nu	56,5	1609,2	1309,1	235,8	360,3	10,9	3581,8	13%
5	Prairie et broussailles	3694,5	1349,3	3394,8	1862,8	622,1	1360,7	12284,1	44%
6	Prairie clairsemée	651,2	122,4	975,9	1399,7	212,9	995,5	4357,6	16%
7	Terre sablonneuse	135,5	4,3	369,0	1159,9	19,3	836,6	2524,6	9%
8	Dunes de sable	48,3	3,0	123,5	642,5	7,7	338,3	1163,2	4%
9	Construction	11,9	13,4	31,0	31,7	2	3,9	94,0	0%
10	Faible couverture végétale	573,1	43,5	650,3	110,0	0	216,5	1593,4	6%
	Totale	5849,7	3291,8	7419,3	5859,4	1264,1	4033,5	27717,9	100%

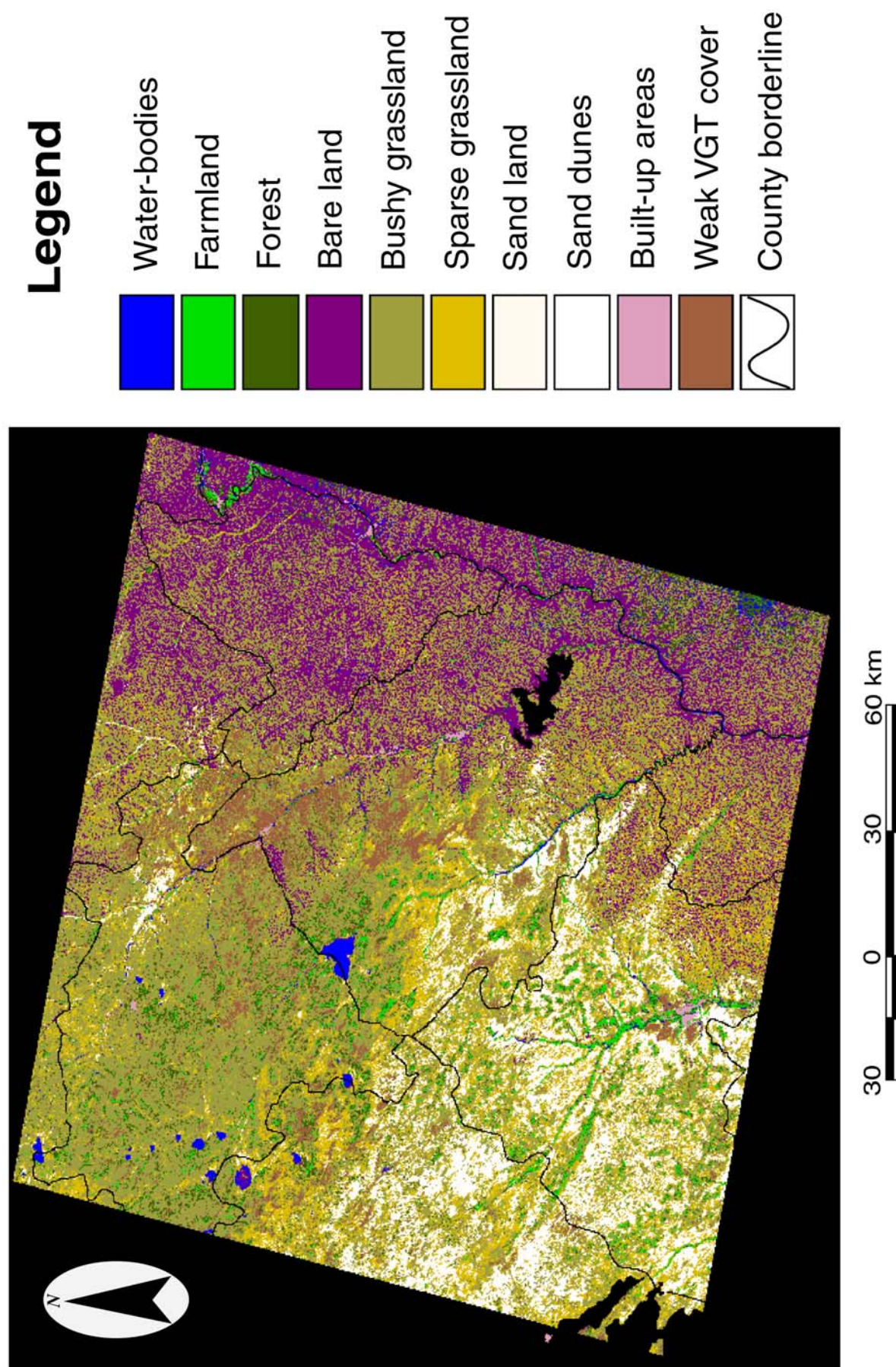


Figure V-9: Le mode d'occupation actuelle des sols au Shaanxi Nord/Mu Us
Sortie d'une classification intensive sur les données Landsat ETM 2000)

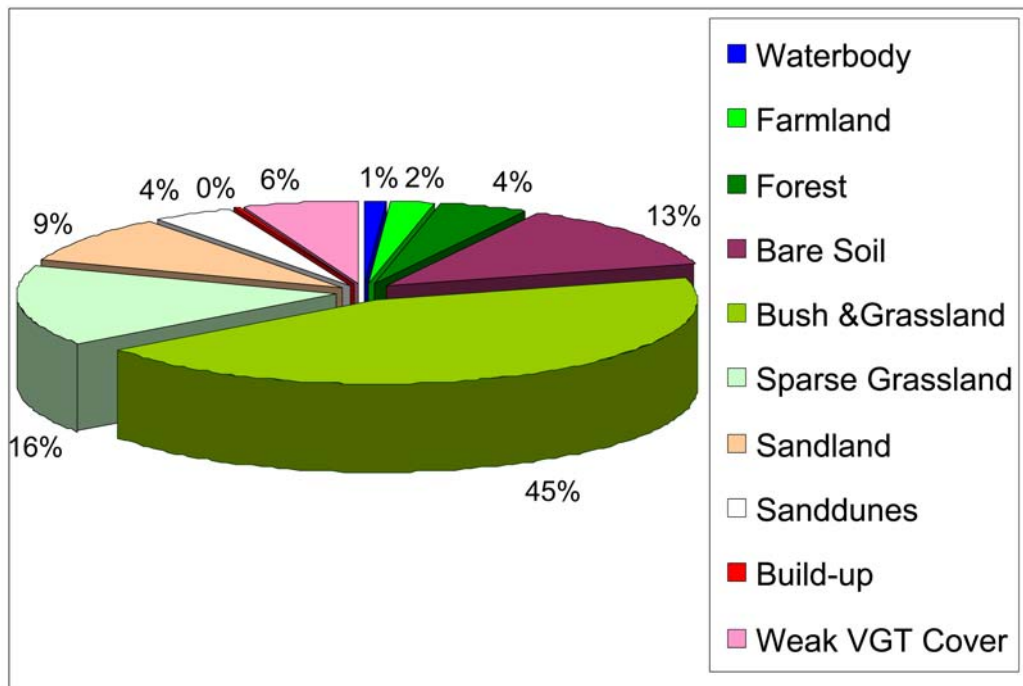


Figure V-10 : Composition actuelle de l'environnement dans le Shaanxi Nord/Mu Us

Comme on peut le remarquer dans cette classification, le principal type de couverture du sol est la prairie (prairie et broussailles 45 %, prairie clairsemée 16 %). Le groupe "terre dénudée" qui inclut sol nu, terre sablonneuse et dunes de sables, représente 26 % du territoire ; la forêt 4 % ; les terres cultivées 2 % ; et, les plans d'eau 1%. Il est important de noter qu'une faible couverture végétale apparaissant en terres sablonneuses est en train de mourir et que donc 6 % du territoire risquent la désertification.

V. ANALYSE DE L'INTERACTION HOMME-ENVIRONNEMENT

Comme nous l'avons mentionné dans les Chapitres II et IV, les modifications environnementales, par exemple, le changement d'utilisation du sol (processus le plus important pour la surface de la Terre) est associé aux activités humaines. L'analyse de panel calibrée par les modèles de régression multivariés a été, une fois de plus, utilisée pour identifier les forces d'entraînement du changement de la zone étudiée. La modélisation a été menée à bien, par l'intégration des données départementales du changement environnemental et des données socio-économiques obtenues au centre de télédétection de Chine du Nord-Ouest (tableau 5-4) à XLSTAT, grâce à une méthode étape-par-étape avec un indice de confiance de 0,05.

Tableau 5-4 : Donnée socio-économiques départementales pour le Shaanxi Nord/Mu Us

Département	Δ Population totale	Δ Population urbaine	Δ Population rurale	Δ Main d'œuvre rurale	Δ Terres cultivées (1000ha)	Δ Production alimentaire (tonne)	Δ Production agricole (million yuan)
Ejinhoro Qi*	16,37	18,41	-2,04		19,37	20762	273,87
Uxin Qi			3,73		4,07	17088	36,51
Fugu	46,268	21,13	25,13	32,9	-10,16	-2953	33,34
Shenmu	105,52	61,17	44,35	37,7	-7,29	28116	134,53
Yulin	105,69	55,2	50,49	14,4	3,51	114102,7	337,14
Jiaxian	20,05	4,316	15,74	11,45	-1,17	-217	24,16

Note : (1) Les valeurs Δ sont calculées par la formule $X_{2000} - X_{1986/1984}$. L'unité de population est de 1000 habitants.

(2) La plupart des données proviennent du Centre de télédétection de Shaanxi, et ont été publiées dans les Statistical Yearbooks of China, et celles suivies d'un * sont issues de la banque de données socio-économiques de Ejinhoro Qi (<http://nic6.forestry.ac.cn/sts/>).

Tableau 5-5 : Forces d'entraînement des changements d'utilisation du sol au Shaanxi Nord/Mu Us

Dépendante	Variable indépendante retenue	Constante	Paramètre estimé	F	Pr>F	R ²
Δ Terres agricoles	Δ Production alimentaire	1,169	0,001	300,267	<0,0001	0,987
Δ Zone urbaine	Δ Population urbaine	0,398	0,120	14,852	0,061	0,881
Δ Plan d'eau	Δ Terres cultivées	-18,511	-1,595	5,141	0,086	0,562

La première colonne du tableau 5-5 représente les changements environnementaux et la seconde, leurs forces d'entraînement. Ces interactions homme-environnement peuvent s'exprimer de la manière suivante :

$$\Delta \text{Terres cultivées} = 1,169 + 0,001[\Delta \text{Production alimentaire}] \dots \dots \dots (V-2)$$

Cette relation implique que la mise en culture des terres est à associée à la demande en production alimentaire. Il est naturel que la croissance de la population exige plus de nourriture. Cela induit une nouvelle mise en culture et donc une extension des terres cultivées.

$$\Delta \text{Plan d'eau} = -18,511 - 1,595 [\Delta \text{Terres cultivées}] \dots \dots \dots (V-3)$$

Le changement des plans d'eau (lacs et réservoirs) est en corrélation négative au changement des terres cultivées. L'extension des terres cultivées exige une augmentation de la consommation en eau (lac et réservoir) pour l'irrigation et de fait implique une diminution des plans d'eau. Si la diminution continue à la même vitesse que lors des 14 dernières années, tous les lacs auront disparus dans 30 ans.

Selon Chen *et al.* (2002), la température moyenne annuelle des 40 dernières années a augmenté de 0,5°C, alors que les précipitations annuelles n'ont que peu varié et que l'évaporation annuelle a diminué. Donc l'extension des terres cultivées serait responsable de ce changement.

$$\Delta \text{Zone urbaine} = 0,398 + 0,120 [\Delta \text{Population urbaine}] \dots \dots \dots (V-4)$$

Cette équation démontre que l'extension urbaine est un résultat de la croissance de la population urbaine. Le développement des mines de charbon et de l'industrie dans le bassin houiller du Shen(mu)fu(gu)-Dongsheng a entraîné une augmentation considérable de la population urbaine ce qui a conduit à la construction de plus d'infrastructures et de plus de logements. Ceci explique la relation spatiale entre extension urbaine et exploitation du charbon.

En dehors de cette relation, le Δ Résidu de charbon est négativement corrélé avec le Δ Terres cultivées ($R = -0,718$) et positivement corrélé avec le Δ Zone de construction totale ($R = 0,872$), ce qui signifie que l'exploitation des mines s'est produite au détriment des terres cultivées et a, en même temps, conduit à l'extension urbaine.

On peut déduire de l'analyse de panel, présentée plus haut, que le changement environnemental est surtout lié aux activités humaines. Chaque type de changement possède sa propre force d'entraînement. Si des données socio-économiques, de niveau plus précis, par exemple de niveau communal, sont disponibles, les résultats de l'analyse de l'interaction homme-environnement seront plus pertinents et complets.

VI. REFLEXIONS SUR LA DEGRADATION DES SOLS

Comme nous l'avons démontré plus haut, la principale modification de l'environnement est la dégradation de végétation qui s'est produite à la fois dans les terres arénacées du Mu Us et sur le plateau de loess. Qu'est-ce qui est responsable de cette transformation ? En prenant en compte les

recherches de mes prédécesseurs, une réflexion sur ce changement environnemental rencontré dans ces deux entités géomorphologiques est proposée ci-dessous.

1. DEGRADATION DE VEGETATION SUR LE PLATEAU DE LOESS

D'un point de vue général, la dégradation de végétation du plateau de loess peut avoir été provoquée par de nombreux facteurs tels que l'augmentation de l'aridité, le surpâturage et l'érosion du sol. Sans données socio-économiques ou météorologiques précises (à l'échelle du village ou de la commune), il est impossible de mener à bien une analyse des implications des activités humaines ou du climat. L'auteur a essayé de comprendre les relations entre cette dégradation et l'érosion des sols.

Jusqu'à maintenant, de nombreuses recherches se sont intéressées à l'érosion des sols (Chen, 1995 et 1997 ; Zhu *et al.*, 1995 ; Leng *et al.*, 1997 ; Leung, 1997 ; Zheng *et al.*, 1997, et Xu *et al.*, 1999), alors que son impact sur la dégradation de végétation a rarement été étudié. En fait, l'érosion du sol détruit inévitablement la couverture de végétation et entraîne la baisse du rendement des terres et l'aggravation de leur dénudation. Sans protection végétale, le sol peut facilement être déplacé par l'eau ou le vent ou par les deux. L'analyse suivante a pour but d'illustrer cette relation.

DISTINCTION DES DIFFERENTS ETATS DE DENUDATION

L'érosion du sol est difficilement repérable dans les images de Landsat TM. C'est pourquoi, la transformation de chapeau à cône sera utile, du fait de son critère de brillance capable d'amplifier l'information de dénudation. Une fois la différenciation entre les deux dates effectuée, les changements de brillance indiquant une disparition de la couverture de végétation, ont pu être obtenus et sont présentés dans la figure V-6. Ainsi, quatre degrés de dégradation ont été distingués, entourés d'un cercle et respectivement appelés : VD-I, VD-II, VD-III et VD-IV, conformément à leur pourcentage de dégradation. Les caractéristiques de chacun des niveaux sont présentées dans le tableau 5-6.

PAYSAGES DE LOESS ET COEFFICIENTS D'EROSION

Chen (1995) a différencié les types de paysages du plateau de loess, entourés de ravins, en trois catégories : *yuan*, *liang* et *mao* ou *liang-mao* (figure V-11a, b, et c). Ces différents types de paysage n'apparaissent pas seuls mais plutôt en combinaison. Le type *yuan* est plutôt présent près du bassin-versant de Luohe dans la partie sud de Shaanxi Nord. Cependant, aux environs du cours médian des rivières Yanhe et Wudinghe des formes *liang* et quelques *liang-mao* prédominent. Plus au nord, les formes *liang* s'abaissent et deviennent des formes *mao*, en s'accompagnant d'une augmentation des ravins. Du sud au Nord, c'est-à-dire du type *yuan*, à travers le type *liang* jusqu'au type *mao*, la densité de ravinement augmente progressivement, en moyenne, de 2.3 km/km², dans les zones *yuan*, à 4.4 km/km² pour les zones *liang* jusqu'à plus de 5 km/km² dans les zones *mao* (Chen, 1995).

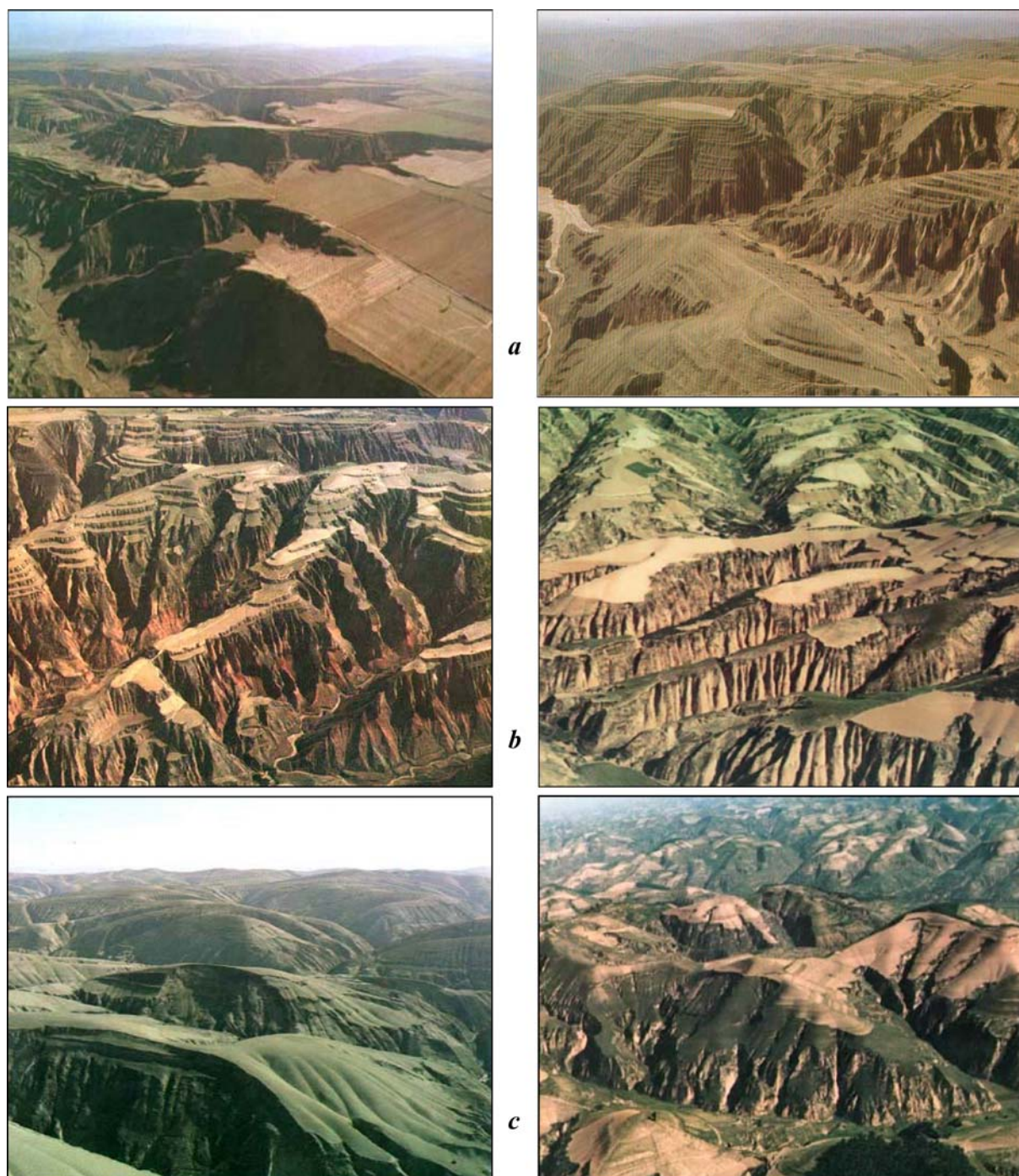


Figure V-11 : Types de paysages sur le plateau de lœss, Shaanxi Nord

a : *yuan*, vaste zone d'une surface plate et régulière couverte de lœss et ravinée (à gauche Luochuan, à droite Fuxiang)

b: *liang*, bande de portions de plateau continues ou discontinues, couvertes de lœss (à gauche Lishi, à droite Jiaxian)

c: *liang-mao*, collines couvertes de lœss et entrecoupées de ravins (à gauche Ansai, à droite in Yan'an)

Source : *Land Resources in the Loess Plateau of China*, édité par the Northwest Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica, publié par Shaanxi Science and Technique Press, 1986 (d'après Leung, 1997).

Suivant cette typologie, notre étude s'intéresse à une zone où le paysage prend les formes *liang-mao* et *mao*, avec une densité élevée de ravinement. C'est la raison pour laquelle l'érosion du sol est très présente dans ce site, du fait des glissements de terrain, des éboulements, du ravinement lié aux violentes chutes d'eau et à l'action du vent sur les versants pentes des ravins (Xu, 1999). Quelques facteurs humains, les mines par exemple (Chen, 1997 et Zheng *et al.*, 1997), ont accéléré ce processus de dégradation.

Chen (1995) a également distingué cinq niveaux de perte de sol dans le Shaanxi Nord : 4900 tonnes/km²/an dans les zones *yuan* du sud, 9899 tonnes/km²/an dans les zones *liang* dans le centre, 13800 tonnes/km²/an dans les zones *liang-mao* autour de Yan'an, 17200 tonnes/km²/an dans les zones *mao* au nord (dans le département du Yulin, par exemple) et 23700 tonnes/km²/an dans les zones *mao*, les plus érodées, aux abords du Fleuve Jaune dans les départements de Shenmu, Jiaxian et de Fugu. Ceci est une classification régionale.

Tableau 5-6 : Paramètres de l'analyse des relations entre dégradation de végétation et érosion du sol

Degré de dégradation de végétation	Pourcentage de dégradation de végétation (%)	Valeurs moyennes de ΔB	Niveau d'érosion possible			
			Coefficient 1 d'érosion (tonnes/km ² /an) *	Coefficient 2 d'érosion (tonnes/km ² /an) *	Coefficient d'érosion régionale (tonnes/km ² /an) **	Niveaux d'érosion
I	49,5	166	20000	20000	23800	<i>Très élevé</i>
II	27,3	160	7500	10000	15500	<i>Elevé</i>
III	5,1	155	1750	2500	9899	<i>Moyen</i>
IV	2,6	151	200	200	4900	<i>Léger</i>

Note: Les données du tableau comportant un (*) proviennent du rapport (2001) du Centre de télédétection de Shaanxi. Celles comportant (**) émanent de Chen (1995).

Cependant, en 2000, le Centre de télédétection de Shaanxi rapporte qu'il existe au moins quatre niveaux d'érosion pour le réseau de la rivière Yanhe : léger (< 200 tonnes/km²/an), moyen (1500-2500 tonnes/km²/an), élevé (5000-10000 tonnes/km²/an), très élevé (10000-20000 tonnes/km²/an) et, selon les circonstances voire extrêmement élevé (>20000 tonnes/km²/an).

ANALYSE DE RELATION

Ainsi que nous l'avons montré ci-dessus, l'érosion du sol apparaît à différents degrés sur les deux échelles régionales et locales. Des niveaux d'érosion similaires sont probablement apparus dans la zone étudiée. L'analyse de régression multivariée, en reliant les degrés de dégradation de la végétation et les niveaux d'érosion, permet de vérifier que les différences spatiales de dégradation de

végétation correspondent bien aux différents niveaux d'érosion (tableau 5-6). Les résultats sont obtenus par l'équation :

$$[VD \%] = 1,120 + 0,002 [\text{Coefficient 2 d'érosion}], R^2 = 0.994 \dots \dots \dots (V-5)$$

$$[\text{Valeur } \Delta B] = 147,190 + 0,001 [\text{Coefficient d'érosion régionale}], R^2 = 0,998 \dots \dots \dots (V-6)$$

Ainsi, il semblerait que l'on puisse relier l'importance de la dégradation de végétation et les différents niveaux d'érosion du sol (équation V-5) ainsi que les valeurs de différenciation (differencing) de la brillance (équation V-6).

Même si, ces dernières décades, un grand nombre de tentatives pour arrêter la fuite des sédiments dans les ravins et contrôler la perte de sol — telles que la construction de terrasses et de barrages (figure V-12a), la réhabilitation ou l'ensemencement par voie aérienne), ont été effectués, l'érosion progresse toujours.

2. DEGRADATION DE VEGETATION AU MU US

De faibles précipitations et un vent puissant au printemps et en hiver, principales caractéristiques d'un plateau arénacé aride, sont deux handicaps naturels majeurs pour l'utilisation du sol. Les activités humaines, en particulier une utilisation inappropriée du sol, sont les forces d'entraînement principales pour la dégradation du sol (Chen *et al.*, 2002 et Zhang *et al.*, 2002). C'est, par exemple, au prix de la destruction de la prairie et de la forêt que, pour accroître la production alimentaire, on a incité à la mise en culture. Sans mesures efficaces de protection et sans systèmes d'arrosage, le rendement de la culture sous pluie reste faible (1/3 de celle des cultures irriguées, Zhang *et al.*, 2002) et le sol fin superficiel est facilement emporté par le vent. Avec ce type d'utilisation, les terres ne peuvent être cultivées que deux ou trois ans puis elles sont ensuite abandonnées à la désertification. La pression due à la croissance démographique a obligé la population rurale à mettre en culture de nouvelles terres, ailleurs. Ainsi, le cycle "mise en culture - abandon - désertification" tourne sans fin. La verdure s'est progressivement réduite et la dégradation s'est étendue. Par exemple, pendant la période du milieu des années 50 au début des années 70, des politiques inappropriées telles que "mettre l'accent sur la production alimentaire" ont été imposées. Ainsi, trois vagues de mise en culture à grande échelle se sont succédées et ont produit une intense dégradation (Chen *et al.*, 2002). Notre détection de changement suggère que le phénomène s'est prolongé pendant les années 80 et 90, dans la plupart des départements étudiés. Un autre facteur impliqué dans cette utilisation des terres est probablement une mauvaise gestion du droit foncier et de propriété du bétail. La société strictement

populaire (où tout appartient à tous), n'ont réussi à faire naître chez les fermiers et les éleveurs ni le sens de la productivité ni celui de la protection de l'environnement (Chen *et al.*, 2002).

De plus, la surproduction de bétail a créé une surcharge pour la prairie et provoqué sa dégradation. Au début des années 60, le nombre de troupeaux a fini par dépasser la capacité de charge des terres ; et cette tendance s'est encore accentuée pendant ces dernières décades. Si l'on prend l'exemple du département de Ejinhoro Qi, la capacité de charge de la prairie a été estimée, en 1985, à 518 000 têtes de mouton alors que la population ovine était de 688.000 têtes, ce qui représente un taux de dépassement de 32,8 % ; de la même manière, en 1997, la capacité de charge théorique était de 524 700, alors que la population réelle était de 821 000 moutons, donc un taux de dépassement de 56,5 % (Chen *et al.*, 2002). Il faut ajouter que le pâturage collectif des troupeaux autour des habitations et des points d'eau, tout au long de l'année, a impliqué, en de nombreux endroits, la disparition du couvert herbacé, ce qui a provoqué le transport éolien du sol superficiel et réamorcé le dépôt de dunes de sable. C'est ainsi qu'une partie des pâturages des terres arénacées de Mu Us se sont transformées en terre dénudée, après trois ou quatre années d'élevage. Ce résultat diffère de celui obtenu par Hanan *et al.* (1991), dans son étude réalisée au Sénégal (Afrique de l'Ouest), dans laquelle il combinait relevé de terrain et analyses de données de télédétection.

En dehors des raisons évoquées plus haut, l'utilisation des buissons pour le chauffage et autres usages domestiques ainsi que l'extraction de certaines herbes médicinales sont d'autres facteurs importants intervenant dans la dégradation du plateau. Du fait de sa pauvreté, la population locale était tenue au déboisement ; l'*Artemisia ordosica*, par exemple, a été largement utilisée comme combustible, pour le chauffage ou la cuisson des aliments, avant même que ne commence l'exploitation à grande échelle des mines de charbon, dans la région. Selon l'étude menée par l'Expédition Etendue sur le Plateau de Löss de l'Académie des Sciences Chinoise (1986), une famille locale consommait, en moyenne, 7500kg de bois sec par an. En supposant que la productivité de l'*Artemisia ordosica* soit de 2250 kg/ha par an, une famille locale aurait impliqué la consommation de 3,3ha de ce couvert végétal. Si seulement un tiers des familles du département d'Ejinhoro devait utiliser ce combustible, 30 000ha de buissons seraient perdus. Le défrichage ne diminue pas seulement le fourrage des troupeaux, il implique également une sérieuse dégradation du sol. Ainsi le défrichage total des broussailles de la prairie des environs de Dalachaideng a conduit à un véritable désastre pour les villageois. Le bourg a été totalement entouré de sables mouvants et il est devenu invivable pour la population. En 1971, tous les villageois ont dû quitter leur terre natale pour aller s'installer ailleurs (Chen *et al.* 2002).

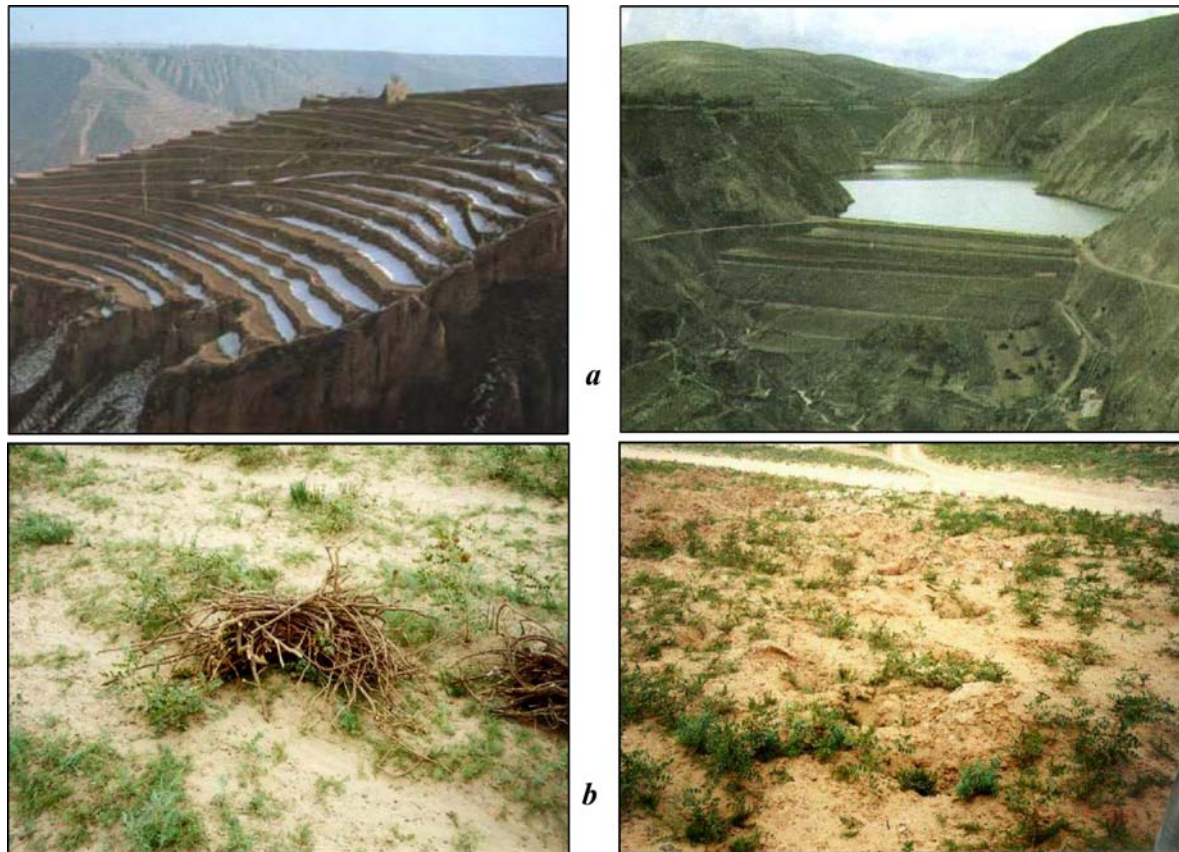


Figure V-12 : (a) Tentatives pour contrôler la perte de sol : terrasses (à gauche à Changwu) et barrages (à droite à Shenmu) (d'après Leung, 1997) ; (b) Exploitation des ressources naturelles : la racine de réglisse (à gauche) et les trous produits par son extraction (à droite) dans les terres arénacées de Mu Us (photos réalisées par l'auteur août 2000).

Une enquête de terrain dans les terres arénacées de Mu Us a révélé que la population locale extrayait, pour compléter leurs revenus, diverses herbes utilisées en médecine traditionnelle chinoise, telles que le *réglisse* (figure V-12b), *l'ephèdre* ainsi qu'un légume sauvage appelé "*facai*" (en chinois). Si cette extraction anarchique, à grande échelle, continue à prendre place, année après année, la fragile couverture végétale sera rapidement dégradée.

Pour finir, les mines de charbon, dans les terres arénacées du Mu Us et sur le plateau de loess, ont généré une rapide croissance économique, créé des milliers d'emploi et conduit à une urbanisation rapide. Et cela a également provoqué la pollution de l'air et la dégradation des sols. Chen *et al.* (2002) ont attiré l'attention sur le fait que la construction des lignes de chemin de fer (Bao-Shen et Shen-Su) sur une longueur de 441 km ainsi que celle des autoroutes (100 km) ont impliqué, pour le site étudié, la destruction de 108,6 km² de végétation et rendu leurs environs déserts. Si réhabilitation et protection de l'environnement ne vont pas de pair avec l'exploitation du charbon, la dégradation du sol dans les bassins houillers se produira plus rapidement que dans des conditions naturelles.

Pour résumer, les raisons pour la dégradation de végétation dans les terres arénacées du Mu Us et sur le plateau de loess sont multiples. Si les conditions naturelles sont difficiles, les activités socio-économiques humaines et, en particulier, une utilisation du sol et une exploitation des ressources irrationnelles, sont les forces d'entraînement principales de la dégradation du sol.

VII. CONCLUSIONS

Une étude multidimensionnelle synthétique sur les changements d'utilisation du sol et de la couverture, intégrant la détection de changement, l'analyse des forces d'entraînement, l'analyse des groupes de ressources du sol et une modélisation de l'interaction homme-environnement a été menée et un système de suivi dynamique pour le Shaanxi Nord/Mu Us développé sous ArcView 3.2. Grâce à cela, une analyse thématique, une gestion et même une détection de changement de la couverture du sol peuvent être effectuées.

Les résultats de cette recherche montrent que 5,9 % de la totalité des terres ont changé pendant la période 1986-2000 : l'avancée du désert vers le sud n'a pu être constatée mais la dégradation des sols s'est produite à une surprenante vitesse ($89,4 \text{ km}^2/\text{an}$) sous la forme de la dégradation des formations herbacées, de la désertification des terres cultivées et de l'érosion du sol ; les plans d'eau ont diminué et le cours du Fleuve Jaune s'est rétréci ; 1593 km^2 (soit 6 % du territoire) au couvert végétal faible, courent un risque de désertification. Les causes de ces changements sont intrinsèquement liées au contexte politique et socio-économique. La raison essentielle de la dégradation du sol, dans les dernières décennies, se situe dans l'ignorance des politiciens en ce qui concerne une utilisation du sol et une exploitation des ressources durables. C'est un véritable défi pour les gouvernements que d'améliorer la situation de l'utilisation du sol et d'éviter une aggravation de la dégradation.

Chapitre VI

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

En suivant la méthodologie présentée au Chapitre II, une recherche interdisciplinaire, établissant une relation entre activités humaines et évolution de l'environnement a pu être menée pour les trois sites étudiés : la région de Nouakchott, le Ningxia Nord et le Shaanxi Nord. Elle a mis en œuvre les techniques de la géomatique, en particulier la télédétection, les SIG et l'analyse de régression multivariée. Nous avons tenté d'analyser les changements de l'environnement urbain et rural ainsi que l'interaction homme-environnement. Ces travaux de recherche sont résumés de la manière suivante :

I. CONCLUSIONS TIREES DES ETUDES DE CAS

(1) L'application de la géomatique combinée avec l'outil géostatistique, au suivi de la dynamique environnementale en zones arides est une méthode adaptative et pertinente pour la recherche en zones arides. Cette thèse fournit donc un *prototype* viable pour de telles recherches. La méthode peut être également appliquée à d'autres types de milieux, par exemple, sub-humides et humides. Elle nous permet de suivre l'évolution des milieux, de cartographier les changements et d'analyser l'interaction homme-environnement. Les résultats aideront les autorités pour comprendre ce qui s'est passé pendant les dernières décennies et ce qui aura lieu dans le proche avenir dans leur environnement si aucune mesure n'est prise.

(2) Les changements de l'environnement, tels que l'extension des terres agricoles, l'urbanisation, les mutations des retenues d'eau, le rétrécissement des fleuves, l'accrétion et l'érosion des plages de sable (Nouakchott), etc., ont sensiblement eu lieu dans les sites d'étude. Chaque type de changement a ses forces d'entraînement et chaque type de composant de l'environnement a ses déterminants spatiaux.

(3) L'invasion du désert n'a pas été observée. Cependant, les signes d'une dégradation sérieuse du sol marquée par la dégradation de la végétation et la salinisation du sol, etc., ont eu lieu en raison des pratiques culturales intensives, de la mise en valeur des terrains pour l'agriculture, du surpâturage, de l'exploitation des ressources naturelles et de l'aménagement environnemental mal conçu. L'aridité peut être un désavantage *a priori*, mais la raison primordiale provoquant la dégradation des sols est l'activité humaine profondément liée aux contextes complexes socio-économiques et politiques.

(4) Les produits ci-dessous sont obtenus à partir des recherches de cette thèse :

- Système de suivi dynamique pour le Ningxia Nord et le Shaanxi Nord/Mu Us établi avec ArcView GIS ;
- Cartes de changement de l'environnement ;
- Cartes d'occupation et les ressources des sols ;
- Relations entre l'homme et l'environnement ;
- Cartes de risque d'inondation, d'évolution côtière et de l'extension de l'urbain pour Nouakchott.

Quelques résultats plus détaillés dérivés des recherches sont montrés suivants ci-après :

NOUAKCHOTT

(1) En s'étendant vers l'est, le sud, le nord et l'ouest, la zone urbaine s'est accrue de 36 km² à un taux de 5,3 % (ou de 3,6 km²/a) pendant la période 1989-1999, ce qui correspond à une croissance de population de 380 000 habitants. Cette rapide expansion dans une étroite bande entre le désert et l'océan représente *un fardeau considérable pour une terre infertile déjà lourdement sollicitée*. De plus, Nouakchott court le risque d'être inondée par la mer. Une analyse spatiale a permis l'identification de trois zones inondables. L'expansion anarchique conduit inexorablement à une détérioration de l'environnement. Des facteurs tels que les ressources en eau, le contrôle de la population urbaine et le choix de zones constructibles devraient être pris en compte dans le nouveau plan d'urbanisme. Du point de vue de la télédétection, peu de terrains peuvent être utilisés pour une urbanisation future. Pour cette raison le sol devra avoir une utilisation économique rationnelle.

(2) Depuis la construction, en 1987, du Port de l'Amitié, la plage nord s'est étendue de 0,9 km² (à la vitesse de 0,1 km²/a) et connaîtra une nouvelle extension de près de 1,3 km² quand l'accrétion aura atteint sa limite supérieure dans 13,4 ($\pm 0,5$ a), c'est-à-dire en 2014-2015. A ce moment, la dérive du littoral s'écoulera en totalité dans le bassin et le port, si aucune mesure n'est prise, sera hors service.

La plage sud a connu une érosion 1,3 km² à un taux de 0,1 km²/a. La construction de l'épi, en 1991, n'a pas empêché l'érosion de la plage mais a, en revanche, accéléré le recul du littoral en jouant le même rôle que le port dans la modification du courant et du sens des vagues. Le recul maximal, opéré entre 1989 et 2001, a été de 362 m. Pour la période de 2001 à 2011, l'analyse de chaîne de Markov fournit une estimation de ce recul de 322 m. Au cours des dix prochaines années, 0,9 km² du littoral seront donc abrasés par la mer.

(3) Les courants côtiers, en particulier la dérive littorale générée par les vagues du NO, se propagent principalement du nord au sud à une vitesse de 0,52-0,66 m/s, calcul basé sur les données de la télédétection et les formules empiriques. Ces courants jouent un rôle important dans l'évolution de la géomorphologie du littoral puisqu'ils peuvent déplacer des sables ayant un grain de 0,01 à 4 mm de diamètre et les déposer quand ils ralentissent ou changent de direction devant un obstacle. C'est ce facteur hydrodynamique qui contrôle l'érosion de la plage et l'accrétion, à Nouakchott.

Le changement environnemental de cette zone hyper-aride est dû aux activités humaines telles que la croissance de la population, l'extension de l'urbanisation, la gestion du littoral et l'exploitation des ressources naturelles. Sans organisation et planification rationnelle, la dégradation environnementale est inévitable. L'urbanisation et la construction d'un port devront absolument prendre en compte ces avertissements.

NINGXIA NORD

La recherche révèle que 11,7 % du territoire total, de cette région aride, ont été modifiés par les activités humaines, depuis 1987.

(1) Le changement environnemental le plus marquant est l'extension des terres agricoles (471 km²), du à une augmentation de la production agricole ($R^2 = 0,731$). D'un point de vue spatial, la surface est liée à la population rurale ($R^2 = 0,956$). Ce résultat est proche de celui obtenu par Veldkamp *et al.* (2001) et Verburg, *et al.* (2000), qui ont rapporté que la structure des terres cultivées correspond plutôt à celle de la distribution de population agricole, en Chine. Toutefois, si cette extension représente 49,4 % de la totalité du changement environnemental, l'augmentation de la production agricole ne joue qu'un faible rôle dans l'économie de la zone étudiée (11,6 % de la croissance totale du PIB).

La transformation d'anciennes terres arénacées en terres cultivées est une réponse à la croissance démographique et au développement de l'économie rurale. Comme nous l'avons exposé, au Chapitre IV, 574 km² supplémentaires de terres vont être convertis, pour les mêmes raisons, en terres cultivées, en 2010. Où pourra-t-on trouver un tel sol dans cette zone, véritable oasis au milieu du désert et des terres arénacées. Ceci constitue un intimidant défi pour les gouvernements locaux.

(2) L'extension urbaine bien que ne représentant que 3,6 % du changement total d'occupation du sol, est néanmoins liée à 88,4 % de la croissance de du PIB. Ceci démontre l'importance des zones urbaines dans le développement économique local. L'urbanisation est dirigée par la croissance de la population urbaine ($R^2 = 0,971$). Sa localisation spatiale dépend de la production industrielle ($R^2 = 0,963$).

Il est reconnu que l'urbanisation est, en Chine, la principale cause de disparition des terres cultivées (Veldkamp *et al.*, 2001). Malgré un moindre développement par rapport aux régions de l'est et du sud-est, on constate que 35,8 km² de terres anciennement cultivées se sont néanmoins transformés en zone urbaine. 41km² de terres agricoles seront perdues en 2010.

(3) Les plans d'eau, spatialement attachés aux zonesensemencées ($R^2 = 0,733$), ont rencontré deux types de transformation, dans la plaine du Yinchuan. La transformation de terre en plan d'eau est liée à l'augmentation de la production agricole ($R^2 = 0,743$), celle des plans d'eau en terre est associée à l'expansion des terres ensemencées ($R^2 = 0,867$). Ces deux types de changement sont la conséquence des activités agricoles de la population rurale.

Malgré l'assèchement de certains lacs, la surface totale des plans d'eau a augmenté d'environ 49 km² (à un taux d'incrémentation de 4,1 km²/a ou 1,0 %), ce qui correspond à l'extension des terres cultivées et d'autres activités agricoles. Si l'on se tient à cette tendance, 45 km² supplémentaires de plan d'eau seront créés d'ici 2010. D'où proviendra cette eau puisque les précipitations ont, jusqu'à maintenant, progressivement diminuées ? La réponse viendra certainement du Fleuve Jaune.

(4) Le Fleuve Jaune, dont le cours a actuellement, au Ningxia Nord, une surface de 81,3 km² ce qui représente 1% de la surface de cette région, a connu une réduction de 83, 8 km² à la vitesse de 7,0 km²/an ou à un taux de 6,1 %, depuis 1987. Si, dans ce contexte de réchauffement global, les terres agricoles continuent à s'étendre et la population rurale à surexploiter les ressources en eau du fleuve, son cours se transformera en terre et le Fleuve Jaune, berceau de 7000 ans de civilisation chinoise, n'existerait plus au Ningxia Nord, en 2010. Cela devrait retenir l'attention mondiale !

(5) 55,6 km² du sol ont été dégradés par l'exploitation du charbon (36,2 %), le déboisement dans les montagnes, le surpâturage et la salinisation dans les plaines (52,3 %) ainsi que l'augmentation des carrières de sable et de pierre pour la construction (11,5 %). Dans la partie nord de la zone d'étude, au bord de la ville de Shizuishan, l'air est extrêmement pollué du fait du développement des industries chimiques et du charbon. Le résultat de la modélisation démontre que la dégradation du sol est liée à l'augmentation de la production industrielle ($R^2 = 0,708$) et est localisée dans les départements souffrant d'un développement industriel et d'une urbanisation rapide, tels que ceux de Yinchuan, Shizuishan et Pingluo.

Du point de vue de la protection de l'environnement, il serait dangereux que les gouvernements ne se réfèrent qu'à la croissance économique.

SHAANXI NORD

(1) 5,9 % du territoire total ont changé entre 1986 et 2000. L'avancée du désert vers le sud n'a pas été repérée mais la dégradation du sol ou la désertification sont survenus au surprenant taux de 89,36km²/an, sous la forme de la dégradation des formations herbacées, de la désertification des terres cultivées et de l'érosion du sol, phénomènes généralement associés à une politique d'exploitation des ressources et d'utilisation du sol irraisonnée. Le processus "mise en culture — abandon — désertification" et le surpâturage sont deux formes de dégradation du sol sur le plateau d'Ordos (Mu Us). L'érosion éolienne et hydrique des sols est probablement la cause majeure de l'importante dégradation biophysique de la végétation dans les collines de loess. L'impact du climat sur la dégradation de la végétation n'est pas encore clairement établi.

(2) De même que pour le Ningxia Nord, l'extension des terres agricoles est dirigée par la demande en production alimentaire ($R^2 = 0,987$). La croissance démographique implique une augmentation de la production alimentaire ce qui induit une nouvelle mise en culture. A proximité des nappes aquifères, il est possible d'utiliser les terres mises en cultures pendant plusieurs années. En l'absence de nappes aquifères ou de lacs pour l'irrigation, elles resteront des cultures sous pluie et seront donc sujettes à l'érosion des sols et à la désertification.

(3) L'augmentation des terres cultivées a impliqué une diminution des plans d'eau ($R^2 = 0,562$). L'urbanisation est pilotée, d'une façon dynamique, par la croissance de la population urbaine ($R^2 =$

0,881), en particulier dans le cas des villes où l'exploitation du charbon et l'industrie se sont rapidement développées.

(4) Le cours du Fleuve Jaune s'est rétréci de 19km², probablement du fait d'une sur-utilisation dans les parties supérieure et médiane de son cours ; une zone de 1593 km² (6,0 % du territoire total) d'une faible couverture végétale risque la désertification. Ces deux types de changement sont certainement liés aux activités humaines, par exemple l'agriculture et le pâturage. Leur relation aux changements météorologiques reste établir.

Quoi qu'il en soit, les raisons qui conduisent aux changements environnementaux sont les nombreuses activités humaines, étroitement dépendantes des contextes politique et socio-économique complexes. La raison essentielle de la dégradation du sol, dans les dernières décennies, se situe dans l'ignorance des politiciens en ce qui concerne une utilisation du sol et une exploitation des ressources durables.

Les changements environnementaux sont des phénomènes complexes liés à de multiples facteurs humains ou naturels. La recherche concernant les deux sites d'étude de Chine du Nord-Ouest, a été suivie de façon à ce que tout facteur jouant un éventuel rôle dans l'évolution environnementale puisse être pris en compte dans la modélisations de panel et transversales. Il est certainement utile de comprendre les mécanismes des changements environnementaux. Si des données socio-économiques plus précises, comme, par exemple, des données au niveau communal, la quantité moyenne d'eau nécessaire à la culture d'un hectare, étaient disponibles, les résultats seraient plus pertinents. Si, de plus, la modélisation statistique spatiale, comme elle a été décrite dans le Chapitre II, pouvait être utilisée pour ces études approfondies, les raisons des changements environnementaux pourraient être mieux expliquées. Ces questions doivent encore être élucidées.

Ces résultats et les produits obtenus mentionnés ci-dessus peuvent être considérés comme des références aux gouvernements pour leur prise des décisions.

II. REFLEXIONS ET PERSPECTIVES

Pour les régions confrontées à de tels grands changements, voire de sévères dégradations environnementales, quelques réflexions seront données dans cette section. Quant à Nouakchott, une réflexion concernant le développement a été évoquée dans le Chapitre III. Ainsi, une perspective est particulièrement centrée sur la Chine du Nord-Ouest.

REFLEXIONS

L'utilisation appropriée de l'eau

En tant que régions arides, ressources d'eau sont l'essentielle pour le développement socio-économique. Bien qu'aride en climat, la plaine de Yinchuan a tiré bénéfice du Fleuve Jaune pour l'irrigation et convient pour l'agriculture. Cependant, l'abus, ou dans une certaine mesure le gaspillage de l'eau, a mené à une augmentation des retenues d'eau et la formation des marais, et déclenché localement une salinisation. Malheureusement, un tel abus peut être un phénomène commun dans le bassin en amont du fleuve, en raison de la lutte des paysans locaux pour l'eau due à l'aridité. Ningxia nord est seulement un exemple. De cette façon, comment le Fleuve Jaune n'a-t-il pas été asséché à l'aval? Ainsi, comment gérer raisonnablement de l'eau pour l'agriculture et la pisciculture et déterminer la quantité maximum d'eau autorisée pour chaque région sont les questions importantes posées dans la future planification d'utilisation des terres, non seulement pour Ningxia nord, mais également pour toute la région du nord-ouest.

La structure d'utilisation de la terre

Comme indiqué dans le Chapitre V, du fait de l'aridité, la mise en valeur à grande échelle dans la terre arénacée de Mu Us pour la culture, a causé une désertification du sol. En plus, le rendement de la culture sous pluie reste faible. Telle terres culturelles doivent être converties en pâturage pour empêcher la dégradation du sol. On dit que le pâturage est probablement l'utilisation mieux appropriée du sol. Cependant, sous la pression de la population, il est impossible de transformer toutes les terres cultivées en prairies. Celles de bonne qualité, par exemple, dans les vallées où l'eau souterraine est disponible, devraient être gardées. Avec une amélioration du système d'irrigation de l'eau souterraine, une meilleure productivité pourrait être attendue.

En fait, il existe un équilibre de l'occupation du sol pour un écosystème fragile. Pour une utilisation durable, il est nécessaire de garder une structure raisonnable pour l'agriculture, l'élevage et la sylviculture. Zhang *et al.* (2002) pensaient que le rapport approprié entre la terre cultivée, la forêt (incluant l'arbuste) et la prairie était 7,4 %, 40,1 % et 46,2 %. Cette structure signifie que les terres cultivées peuvent produire suffisamment de nourriture pour alimenter la population, pour obtenir la viande à vendre, et qu'il y aurait assez de forêts et d'arbustes pour empêcher l'érosion de sol.

Il est très impressionnant de constater que l'afforestation a été effectuée à grande échelle dans les régions arides, et même dans les déserts au nord et nord-ouest de la Chine au cours de dernières décennies. Malheureusement, l'effet de ces travaux est très faible. Parce que les arbres ont besoin de beaucoup d'eau pour grandir et survivre. La forêt morte, près de la ville de Yulin, est un exemple. Il est ainsi considéré que les semis des graines pour les prés serait plus efficace et pratique que celle des arbres. Ceci est digne d'attention pour les décideurs dans leur planification de l'exploitation des ressources et leur gestion de l'environnement de terrains arides.

L'aménagement des mines

Comme mentionné dans le Chapitres IV et V, l'exploitation du charbon dans les montagnes de Helan (Shizuishan, Shitanjing, Ruqigou au Ningxia nord), dans la terre sablonneuse de Mu Us (Ejinhoro Qi en Mongolie intérieure) et sur le plateau de Loess (Shenmu, Fugu au Shaanxi nord), a entraîné une dégradation de l'environnement, par exemple, la pollution atmosphérique, l'érosion du sol, les résidus des poussières de charbon et la destruction des terres cultivées. Ainsi il est nécessaire d'employer certains moyens pour aménager les carrières et contrôler la pollution. Ce qui est le plus important est d'évaluer les impacts potentiels sur l'environnement et de prendre des mesures adaptées avant l'exploitation des houillères.

La propriété terrienne et gestion foncière

La propriété de terre est un facteur important qui influence l'utilisation de la terre. Avant 1980, toutes les terres appartenaient au gouvernement. Les gens n'ont eu aucun intérêt dans l'utilisation durable du sol. Cette situation n'avait pas été changée jusqu'en 1981, quand la Chine a mené la réforme sur des droits d'utilisation et de gestion foncière de la terre selon la politique de Deng Xiaoping. Depuis lors, chaque personne, dans les campagnes, a le droit de posséder un lopin de terre pendant la période contractuelle. Cette réforme a augmenté l'intérêt des paysans et leur investissement dans l'agriculture et considérablement amplifié les productivités des sols dans les années 80. Cependant, quand le délai d'exécution arrive à terme, les personnes n'ont plus intérêt à investir dans le travail de terres. Par conséquent, la meilleure manière de garder l'intérêt des paysans pour la terre est de leur donner le droit de la gérer en permanence.

Bien sur, ces réflexions sont encore peu poussées. Elles pourront être approfondies dès que des données plus détaillées seraient disponibles.

PERSPECTIVE GLOBALE

En 1999, le gouvernement central chinois inaugurerait officiellement un plan de développement de la région Nord-Ouest, un vaste territoire, aux nombreuses ressources naturelles inexploitées mais à la terre peu fertile. Le but de ce programme est de tenter de parvenir à un niveau de développement économique satisfaisant dans l'Ouest du pays, à 5 ou 10 ans, afin de créer le "Nouvel Ouest de la Chine" pour le milieu du XXI^{ème} siècle. Ningxia Nord, Tarim central et les terres arénacées de Mu Us font partie des sites pilotes choisis dans ce but.

Pour parvenir à ce résultat, la Chine a déjà accéléré la construction de projets d'infrastructures de grande envergure, dans la région Ouest. La gestion de l'eau, l'énergie, les télécommunications et les

équipements urbains sont les priorités de l'agenda gouvernemental pour le projet “développement stratégique de la région Ouest”.

Cependant, comme dans toute région aride ou semi-aride, l'eau est une denrée rare ; la pénurie en sol fertile associée au caractère incertain des précipitations, rendent difficile le développement d'une agriculture à grande échelle. De plus, la présence d'une érosion éolienne sévère ne fait qu'aggraver la situation. Comme nous l'avons démontré dans ces travaux, la Chine du Nord-Ouest est également victime d'une dégradation de son environnement naturel (eau, sol et air). L'affluence de population et le manque de loi sur l'environnement ont conduit à l'érosion et à la dégradation du sol, dues au déboisement incontrôlé, à la mise en culture inappropriée, au surpâturage et à d'autres utilisations du sol inadéquates. La sur-utilisation et le gâchis de l'eau pour l'agriculture ainsi que l'exploitation du charbon ont, par exemple, conduit à la dégradation de l'environnement et à de longues périodes de ralentissement ou de tarissement du cours de Fleuve Jaune — deuxième plus grand cours d'eau du pays. Ces problèmes sont les “Creeping Environment Problems (CEPs)” (“problèmes environnementaux latents”) (Glantz *et al.*, 2001), ce qui signifie “aux changements imperceptibles d'un jour à l'autre mais qui s'aggravent notablement avec le temps. A ce stade, les tentatives d'amélioration s'avèrent plus difficiles et plus coûteuses”. Ils doivent absolument être pris en compte si la Chine veut réussir un développement durable de ses provinces de l'Ouest. Tout gouvernement qui ignore ces CEPs s'expose à des conséquences financières et environnementales qui finiront par dégrader les bienfaits du développement à court terme. Malheureusement, ces CEPs n'ont apparemment pas encore été pris en compte en Chine, ce qui implique que de nombreux problèmes environnementaux, mentionnés ci-dessus, ne sont encore ni repérés ni abordés.

Au début de la mise en œuvre de ce programme de développement, il est important que les décideurs n'oublie pas ce proverbe chinois : “Pour connaître le chemin qui t'attends, demande à ceux qui reviennent”. Voici un autre proverbe pertinent : “Si tu ne change pas de direction, tu iras là où tu te diriges” ou encore “On récolte ce qu'on a semé”. Il est donc important, sinon essentiel, que les dirigeants prennent le temps de considérer sérieusement tous les obstacles potentiels qu'ils pourraient rencontrer et qui pourraient interférer avec leurs objectifs de développement de l'Ouest. C'est seulement en s'intéressant à des expériences analogues de développement économique rapide dans des milieux à l'environnement fragile, chinoises ou internationales, que la Chine a une chance d'éviter, dans les prochaines années, une débâcle équivalente à celle connue, dans les années 50, lors du Grand Bond en Avant.

La vision du futur ne rend pas très optimiste. Il n'y a plus de terre arable disponible pour l'extension des cultures, plus de ressources en eau pour un développement futur, la dégradation environnementale se produit à grande échelle et le Fleuve Jaune risque de s'assécher dans une dizaine d'années. Ces réflexions devraient être utiles aux gouvernements pour mettre en place un développement durable de la région de l'Ouest de la Chine.

En conclusion, c'est seulement en comprenant mieux les rapports homme-environnement et en prévoyant les tendances évolutives que nous pourrons définir les politiques pour une meilleure occupation du sol et une gestion environnementale.

BIBLIOGRAPHIES

1. Allen, J. C. and Barne, D. F., The causes of deforestation in developing countries, *Annals of the Association of North American Geographers*, Vol.75, No.2, p.163-184, 1985.
2. Anderson, J. R., Land Use and Land Cover Changes — A Framework for Monitoring, *Journal of Research*, USGS, Vol.5, p.143-153, 1977.
3. Anuta, P. E., *An analysis of temporal data for crop species classification and urban change detection*, Laboratory for Applications of Remote Sensing, Information Note: 110873, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1973.
4. Anselin, L., *Spatial econometrics: methods and models*, Dordrecht, Kluwer, 1988.
5. Anselin, L., *SpaceStat: a program for the analysis of spatial data*, Santa Barbara, NCGIA, University of California, 1992.
6. Anselin, L., Interactive techniques and exploratory spatial data analysis, In: *Geographic Information System*, edited by Longley, P.A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. and Rhind, D.W., 2nd ed., Vol.2, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
7. Aspinall, R. J., An inductive modeling procedure based on Bayes theorem for analysis of pattern in spatial data, *International Journal of Geographic Information Systems*, Vol.6, p.105-121, 1992.
8. Aspinall, R. J., and Person, D. M., Data quality and spatial analysis, In: *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*, edited by Goodchild, M.F., Steyaert, L.T. and others, GIS World, Inc., 1996.
9. Aspinall, R. J., GIS and landscape conservation, In: *Geographic Information System* edited by Longley, P.A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. and Rhind, D.W., 2nd ed., Vol.2, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
10. Atkinson, P. M. and Tatnall, A.R., Neural networks in remote sensing, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.18, p.699-709, 1997.
11. Aubréville, A., *Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale*, Société d'Édition Géographiques, Maritime et Colobiales, Paris, p.329-344, 1949.
12. Baker, W. L., A review of models of landscape change, *Landscape Ecology*, Vol.2, No.2, p.111-133, 1989.
13. Baize, D. et King, D., La modélisation spatiale des couvertures pédologiques "Carte papier" et S.I.G., In: *Gestion de l'Espace Rural et Système d'Information Géographique*, éd. par Buche, P., King, D. et Lardon, S., INRA, France, 1992.
14. Barbier, E. and Markandya, A., The conditions for achieving environmentally sustainable development, *European Economic Review*, Vol.54, p.659-669, 1990.
15. Battaglin, W. A., Kuhn, G., and Parker, R., Using GIS to link digital data and the precipitation runoff modeling system: Gunnison River Basin, Colorado, In: *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*, edited by Goodchild, M.F., Steyaert, L.T. and others, GIS World, Inc., 1996.
16. Bell, E. J., Markov analysis of land use change — an application of stochastic processes to remotely sensed data, *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 8, p.311-316, 1974.
17. Bell, E. J. and Hinojosa, R. C., Markov analysis of land use change: continuous time and stationary processes, *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol.11, p.13-17, 1977.
18. Benediktsson, J.; Swain, P. and Ersoy, O.K., Neural network approaches versus statistical methods in classification of multisource remote sensing data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.28, p.540-552, 1990.

19. Bernhardsen, T., *Geographic Information System, An Introduction*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 1999.
20. Bibby, P.R. and Sherpherd, J.W., Monitoring land cover and land use for urban and regional planning, In: *Geographic Information System* by Longley, P.A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. and Rhind, D.W., 2nd ed., Vol.2, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
21. Brimicombe, A.J. and Bartlett, J.M., Linking GIS with hydraulic modeling for flood risk assessment: the Hong Kong approach, In: *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*, edited by Goodchild, M.F., Steyaert, L.T. and others, GIS World, Inc., 1996.
22. Brown, D. G., Pijanowski, B. C., and Duh, J. D., Modeling the relationship between land use and land cover on private lands in the Upper Midwest, USA, *Journal of Environmental Management*, Vol. 59, 2000.
23. Brown, L. A., On the use of Markov chains in movement research, *Economic Geography*, Vol.46, No.2, p.393-403, 1970.
24. Burnham, B. O., Markov intertemporal land use simulation model, *Southern Journal of Agricultural Economics*, July, p.253-258, 1973.
25. Byrne, G. F., Crapper, P. F. and Mayo, K. K., Monitoring land-cover change by principal components analysis of multitemporal Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 10, p.175-184, 1980.
26. Callot, Y., Mering, C. and Simonin, A., Image-analysis and cartography of sand hill massif on high resolution images: application to the Great Western Erg (NW of Algerian Sahara), *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 15, No.18, p.3799-3822, 1994.
27. Callot, Y., Marticorena, B. and Bergametti, G., Geomorphological approach for modelling the surface features of arid environments in a model of dust emissions: application to the Sahara desert, *Geodinamica Acta*, Vol. 13, p.245-270, 2000.
28. Callot, Y. et Oulehri, T., Géodynamique des sables éoliens dans le Nord-Ouest saharien : relations entre aérologie et géomorphologie, *Geodinamica Acta*, Vol. 9, p.1-12, 1996.
29. Canadian Center of Remote Sensing, *Glossary*, <http://dweb.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/db/glossary>, 2002.
30. Caruba, R. et Dars, R., *Géologie de la Mauritanie*, 1991.
31. Chamard, Ph., Courel, M-F., Les vents et leur efficacité morphologique dans la région de Nouadhibou (Mauritanie), *Publ. Association internationale de Climatologie*, Vol.1, p.123-130, 1988.
32. Chamard, Ph., Courel, M-F., Contribution à l'étude des vents en Tunisie, *Publ. Association internationale de Climatologie*, Vol.7, p.232-237, 1995.
33. Chamard, Ph., Courel, M-F, La forêt sahélienne menacée, *Sécheresse*, Vol. 10, No.1, p.11-18, 1999.
34. Chamard, Ph., *Contribution à l'étude du Sahel et des régions Saharo-Sahéliennes*, pour l'habilitation à la direction de recherches, Université de Paris X-Nanterre, 1999-2000.
35. Chander, G. and Markham, B., Revised Landsat 5 TM radiometric calibration procedures and post-calibration dynamic ranges, <http://landsat7.usgs.gov/documents/L5TMCal2003.pdf>.
36. Chang, R. F., *Coastal Engineering Environment (in Chinese)*, Press of Qingdao Ocean University, China, 1997.
37. Chatterjee, S. and Price, B., *Regression analysis*, 1st ed., John Wiley & Sons, 1977.
38. Chatterjee, S. and Price, B., *Regression analysis*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1991.
39. Chavez, P. S., Jr., Atmospheric, solar and M.T.F. corrections for ERTS digital imagery, *Proceedings of American Society of Photogrammetry Fall Conference*, Phoenix, Arizona, p.69, 1975.

40. Chavez, P. S., Jr., An improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 24, p.459-479, 1988.
41. Chavez, P. S., Jr, Image-Based Atmospheric Correction — Revisited and Improved, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 62, No., 9, p.1025-1036, 1996.
42. Chen, H., *Remote Sensing Geology* (in Chinese), Geology Press of China, 1984.
43. Chen, J. and Gao, S. J., Root Causes, Development and Trend of Desertification in Yijinhuoluo County, Inner Mongolia, China, <http://nic6.forestry.ac.cn/sts/zw/cy.html>, 2002.
44. Chen, X., Hu, H., Tateishi, R. *et al*, A method on land cover classification by combining unsupervised algorithm and training areas data, *Geocarto International*, Vol.14, p.13-17, 1999.
45. Chen, Z. Q., Geomorphological characteristics and regional differentiation of landscape of North Shaanxi, *Journal of Chinese Geography*, Vol.5, No.4, p.74-80, 1995.
46. Chen, Z. Q., Human impacts on soil erosion and sediment yield in North Shaanxi, China, *Journal of Chinese Geography*, Vol.7, No.1, p.63-70, 1997.
47. Chou, Z.Y., Li, J., Guo, H.J., *Application techniques of Remote Sensing* (in Chinese), Publication house of Wuhan University of S&T in Survey, 1995.
48. Cohen, J. and Cohen, P., *Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd ed., Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1983.
49. Cohen, W. B. and Fiorella, M., Comparison of methods for detecting conifer forest change with Thematic Mapper imagery, In: *Remote Sensing Change Detection — environmental monitoring methods and application*, Lunetta, R. S. and Elvidge, C. D., Eds, Taylor & Francis Ltd., London, 1999.
50. Collins, J. B. and Woodcock, C. E., An assessment of several linear change detection technique for mapping forest mortality using multitemporal Landsat data, *Remote sensing of Environment*, Vol. 56, p.66-77, 1996.
51. Collins, L., Drewett, R. and Ferguson, R., Markov models in geography, *The Statistician*, Vol.23, p.179-209, 1974.
52. Colwell, J.E. and Weber, F. P., Forest change detection, *Proceedings of the 15th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, Michigan, p.839-852, 1981.
53. Cuq, F., *Etude des houles à la côte à partir d'images SAR et SPOT*, Rapport PNTS, Février, 1991.
54. Country Watch, *Mauritania political, economic and environmental information and news*, http://www.countrywatch.com/files/112/cw_country.asp, 2000.
55. Cowen, D. J., GIS versus CAD DBMS: what are the differences? *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.54, p.1551-1554, 1988.
56. Courel, M.-F., Kandel, R.S., Rasool, S.I., Surface albedo and the Sahel drought, *Nature*, Vol.307, p.528-531, 1984.
57. Courel, M.-F., *Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites*, Thèse d'état ès-lettres, Université de Paris 1, 1984, published by IBM Paris, 1985.
58. Courel, M.-F. *et al*, Les écosystèmes littoraux de l'Aftout es Sahéli, en Mauritanie, *Journées du Programme environnement*, CNRS/ORSTOM, Lyon, 13-15 janvier 1993.
59. Courel, M.-F. *et al*, Evolution récente d'un milieu lagunaire mauritanien: les écosystèmes littoraux de l'Aftout-es-sahéli, *Sécheresse*, p. 33-39, 1996.

60. Courel, M.-F., Nouakchott, site à risques multiples, Espace et Société en Mauritanie, *URBAMA*, Fascicule de Recherche n°33, Tours, France, 1998a
61. Courel, M.-F., Leterrier, E., Le Rhun, J., L'environnement de la ville de Nouakchott: un site à risques multiples, *Géochronique*, publication BRGM et société géologique de France, 1998b.
62. Courel, M.-F., Rudant, J.P., Tulliez, G., Apport de l'imagerie ERS1 en milieu aride: cas de la région de Nouakchott en Mauritanie, *Septième journée scientifique du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF*, 1998c.
63. Courel, M.-F., Rudant, J.P. and Chamard, Ph.C., SPOT et Radar, deux outils complémentaires d'analyse en milieux arides : l'exemple de Nouakchott en Mauritanie, *Publ. A.I.C.*, Vol. 12, p. 228-236., Aix-en-Provence, 2000.
64. Crist, E. P., Cicone, R. C., Application of the Tasseled Cap concept to simulated Thematic Mapper data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 50, p.343-352, 1984a.
65. Crist, E. P., Cicone, R. C., A physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data — The TM Tasseled Cap, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE22, No.3, p.256-263, 1984b.
66. Crist, E. P., Laurin, R., and Cicone, R. C., Vegetation and soil information contained in transformed Thematic Mapper data, in *Proceedings of IGARSS'86 Symposium*, p.1465-1470, Ref. ESA SP-254, European Space Agency, Paris, 1986a.
67. Crist, E.P. and Kauth, R. J., The Tasseled Cap De-Mystified, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 52, No.1, p.81-86, 1986b.
68. Curcio, J. A., Evaluation of atmospheric aerosol particle size distribution from scattering measurement in the visible and infrared, *Journal of the Optical Society of America*, Vol.51, p.548-551, 1961.
69. Daniel, R. C., Shuxford, R. H., and Mccandless, D., Coastline mapping and identification of erosion hazard areas in Pacific County, Washington, ESRI 1998, *User Conference*, San Diego, CA., 1998.
70. Dave, J.V., Effect of atmospheric conditions on remote sensing of a surface of non-homogeneity, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.46, p.1173, 1980.
71. Deering, D. W., Rouse, J. W., Haas, R.H. and Schel, J. A., Measuring 'forage production' of grazing units from Landsat MSS data, *Proceedings of the 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Vol.II, p.1169-1178, 1975.
72. Demangeot, J., Bernus, E., *Les milieux désertiques*, Armand Colin, 2001.
73. De Sède, M.-H., Prélaz-Droux, R., Claramunt, C. et Vidale, L., GERMINAL: Un siers pour la gestion globale de l'environnement, In: *Gestion de l'Espace Rural et Système d'Information Géographique*, éd. par Buche, P., King, D. et Lardon, S., INRA, France, 1992.
74. Deshamps, P.Y., Herman, M., Tanré, D., Modeling of the atmospheric effects and its application to the remote sensing of ocean colour, *Applied Optics*, Vol.23, p.3751-3758, 1983.
75. Didon, E. et Maurel, P., Intégration de la télédétection dans les systèmes d'information géographique, In: *Gestion de l'Espace Rural et Système d'Information Géographique*, éd. par Buche, P., King, D. et Lardon, S., INRA, France, 1992.
76. Doob, J.L., *Stochastic processes*, Wiley, New York, 1953.
77. Dou, G.R., Dong, F.W. and Dou, X.P., Research on the mathematical models of the coastal embouchure sands (in Chinese with English abstract), *Sciences in China (A)*, Vol.25, p.995-1001, 1995.

78. Dregne, H. E., *Desertification of Arid Lands*, Harwood Academic Publishers, New York, 1983.
79. Dregne, H.E., and Chou, N.T., Global Desertification Dimensions and Costs, In: *Degradation and resource and restoration of arid lands*, Lubbock, Texas Tech. University, 1992.
80. Dueker, K.J. and Kjerne, D., *Multipurpose cadastre terms and definitions*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing and American Congress on Surveying and Mapping, Falls Church, VA, 1989.
81. Dynkin, E. B., *Theory of Markov Processes*, Pergaman Press Ltd., 1960
82. Eastman, J. R., *Idrisi 32 Release 2 — Guide to GIS and Image Processing*, Vol. 2, Clark Labs, Clark University, May 2001.
83. EES expert group, *Classification System of Ecological Environment Investigation in China* (draft in Chinese, not published), Aug., 2000.
84. Elvdge, C.D., Miura, T., Jansen, W.T., Groeneveld, D. P. and Ray, J., Monitoring trends in wetland vegetation using a Landsat MSS time series, In: *Remote Sensing Change Detection — environmental monitoring methods and application*, Lunetta, R. S. and Elvidge, C. D., Eds, Taylor & Francis Ltd., London, 1999.
85. Emmi, Ph. C., and Horton, C. A., Seismic risk assessment, accuracy requirement, and GIS-based sensitivity analysis, In: *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*, edited by Goodchild, M.F., Steyaert, L.T. and others, GIS World, Inc., 1996.
86. Engvall, J. L., Tubbs, J. D. and Holmes, Q. A., Pattern recognition of Landsat data based on temporal trend analysis, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 6, p.303-314, 1977.
87. ER Mapper, *User Guide of ER Mapper 6.0*, ER Mapper, Inc., 2000.
88. Evans, D. L., Farr, T. G., Van Zyl, J. J., and Zebker, H. A., Radar Polarimetry: Analysis tools and applications, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 26, No. 6, p774-789, 1988.
89. Eriksen, S., Linkage between climate change and desertification in East Africa (Part 1 and 2), *Arid Lands Newsletter*, No.49, May/June 2001 (<http://ag.arizona.edu/OALS/ALN/aln49>)
90. FAO/UN, *Handbook for defining and setting up a food security information and early warning system* (FSIEWS), UN, Rome, 2000 (<http://www.fao.org/docrep/003/x8622e00.htm>)
91. Fischer, M. M., Spatial analysis: retrospect and prospect, In: *Geographic Information System*, edited by Longley, P.A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. and Rhind, D.W., 2nd ed., Vol.2, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
92. Forse, B., The myth of the marching desert, *New Scientist*, Vol.4, p.31-32, 1989.
93. Forster, B. C., Derivation of atmospheric correction for Landsat MSS with particular reference to urban data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 5, No. 5, p.799-817, 1984.
94. French, D. P. and Reed, M., Integrated environmental impact model and GIS for oil and chemical spills, In: *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*, edited by Goodchild, M.F., Steyaert, L.T. and others, GIS World, Inc., 1996.
95. Frérot, A.-M. *et al*, Du parcours à la ville : L'imprévu, Espace et Société en Mauritanie, *URBAMA*, Fascicule de Recherche n°33, Tours, France, 1998.

96. Frihy, O. E., Dewindar, K. M. and Banna, L. M., Natural and human impact on the northeastern Nile delta coast of Egypt, *Journal of Coastal Research*, Vol.14, p.1109-1118, 1998.
97. Fung, T., and LeDrew, E., Application of principal components analysis to change detection, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 53, No. 12, p.1649-1658, 1987.
98. Ganopolski, A., Kubatzki, C., Claussen, M., Brovkin, V. and Petroukhov, V., The influence of vegetation-atmosphere-Ocean interaction on climate during the Mid-Holocene, *Science*, Vol.280, p.1916-1919, 1998.
99. Gao, J. Zha, Y and NI, S., Assessment of the effectiveness of desertification rehabilitation measures in Yulin, North-western China using remote sensing, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.22, No.18, p.3783-3795, 2001.
100. Gaury, F., L'utilisation d'un système d'information géographique pour l'étude des relations entre système de culture et qualité des eaux souterraines, In: *Gestion de l'Espace Rural et Système d'Information Géographique*, éd. par Buche, P., King, D. et Lardon, S., INRA, France, 1992.
101. Geist, H. and Lambin, E.F., *What drives tropical deforestation?* LUCC Report Series No.4, LUCC International Project Office, University of Louvain, 2001.
102. Geng, K., Shan, P. et al, *The past, present and future of Yinchuan region: The evolution processes, characteristics and regularities of the late Quaternary geographical environment* (in Chinese), Survey Press of China, 1992.
103. Geoplace.com, *Geoworld*, 2002 (<http://www.geoplace.com/gw/1996/0496/0496feat2.asp>)
104. Gessler, P. E., Moore, I. D., McKenzie, N. J. and Ryan, P.J., Soil-Landscape Modeling in Southeastern Australia, In: *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*, edited by Goodchild, M.F., Steyaert, L.T. and others, GIS World, Inc., 1996.
105. Getis, A., Spatial analysis, In: *Geographic Information System*, edited by Longley, P.A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. and Rhind, D.W., 2nd ed., Vol.2, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
106. Girard, M-C., Girard, C., *Traitement des données de télédétection*, Dunod, Paris, 1999.
107. Glantz, M. H., and Orlovsky, N. S., Desertification: A review of the concept. *Desertification Control Bulletin*, Vol. 9, p.15-22, 1983.
108. Glantz, M. H., Ye., Q., and Ge, Q., China's western region development strategy and the urgent need to address creeping environmental problems, *Aridlands*, Vol., 49, May/June, 2001
(<http://ag.arizona.edu/OALS/ALN/aln49/glantz.html>).
109. Goodchild, M. F., Haining, R. P., and Wise, S., Integrating GIS and spatial analysis: problem and possibility, *International Journal of Geographical Information System*, Vol.6, p.407-423, 1992.
110. Gong, P., Marceau, D.J. and Howarth, P.J, A comparison of spatial feature extraction algorithms for land use classification with SPOT HRV data, *Remote Sensing of Environment*, Vol.40, p.137-151, 1992.
111. Gong, P., Pu, R. and Chen, J., Mapping ecological land systems and classification uncertainty from digital elevation and forest-cover data using neural networks, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.62, p.1249-1260, 1996.
112. Gordon, S., Utilizing Landsat imagery to monitor land use change: A case study in Ohio, *Remote Sensing of Environment*, Vol.9, p.189-196, 1980.
113. Gordon, H. R., Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans, *Applied Optics*, Vol.17, p.1631-1636, 1978.

114. Gorman, L., Morang, A. and Larson, R., Monitoring the coastal environment, Part IV: mapping, shoreline changes and bathymetric analysis, *Journal of Coastal Research*, Vol.14, p.61-92, 1998.
115. Goutet, G., Evoluition climatique récente de la frange littorale du sud-ouest de la Mauritanie; référence à la station de Nouakchott, *Mémoire de Maîtrise*, sous la direction de Mme Viviane Balland, Marie-Françoise Courel et Philippe Chamard, Université de Paris 1, 2000.
116. Graetz, R. D., Pech, R. P. and Davis, A. W., The assessment and monitoring of sparsely vegetated rangeland using calibrated Landsat data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 9, No. 7, p.1201-1222, 1988.
117. Green, K. S., Kempka, D. K. and Lackey, L., Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 60, No. 3, p.331-337, 1994.
118. Griffith, D. A., *Advanced spatial statistics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1988.
119. Guo, Z. T., Ruddiman W.F., Hao, Q.Z., Wu, H.B., Qiao, Y.S. et al, Onset of Asian desertification by 22Myr ago inferred from loess deposits in China, *Nature*, 416, p.159-163, 14 March 2002.
120. Hanan, N. p., Prevost, Y., Diouf, A., and O. Diallo, Assessment of desertification around deep wells in the Sahel using satellite imagery, *Journal of Applied Ecology*, Vol. 28, p.173-186, 1991.
121. Haralick, R.M., Shanmugam, K. and Dinstein, I., Textural features for image classification, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-3, 610-621, 1973.
122. Hellden, U., *Drought impact monitoring*, Lunds Universitets Naturgeografiska Institution, Rapport och Notiser 61, Lund, Sweden, p. 61, 1984.
123. Hellden, U., Desertification monitoring: is the desert encroaching? *Desertification Control Bulletin*, Vol.17, p.8-12, 1988.
124. Hellden, U., Desertification--Time for an assessment, *Ambio*, Vol. 20, p.372-383.,1991.
125. Holben, B. and Jutice, C., An examination of spectral band ratioing to reduce the topographic effect on remotely sensed data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.2, p.115-133, 1981.
126. Howarth, P. J. and Wickware, G. M., Procedure for change detection using Landsat digital data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.2, p.277-291, 1981.
127. Hsu, T. W., Ou, S.H., and Tzang, S. Y., Evaluations on coastal topographical changes at Hualien Coast, Taiwan, *Journal of Coastal Research*, Vol.16, p.790-799, 2000.
128. Huete, A. R., A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*, Vol. 25, p.295-309, 1988.
129. Huang, H.L., Antonelli, P., Application of Principal Component Analysis to High Resolution Infrared Measurement Compression and Retrieval, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.40, No.3, p.365-388, 2001 (<http://barrage.ssec.wisc.edu/~paoloa/documents/paper/paper.html>).
130. Ingram, K., Knapp, E. and Robinson, J. W., *Change detection technique development for improved urbanized area delineation*, Technical memorandum CSC/TM-81/6087, Computer Science Corporation, Silver Spring, Maryland, 1981.
131. Jensen, J. R., Toll, D.L., 1982, Detecting residential land use development at the urban fringe, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.48, p.629-643, 1982.
132. Jensen, J. R., Urban change detection mapping using Landsat digital data, *The American Cartographer*, Vol. 8, p.127-147, 1983.

133. Jensen, J. R., Ramsey III, E. W., Mackery, H. E. *et al*, Inland wetland change detection using aircraft MSS data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.53, p.521-529, 1987.
134. Jol, H. M., Smith, D. G. and Meyer, R. A., Digital ground penetrating radar (GPR): A new geophysical tool for coastal barrier research (examples from the Atlantic, Gulf, and Pacific coasts, USA), *Journal of Coastal Research*, Vol.12, p.960-968, 1996.
135. Jordan, C. E., Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor, *Ecology*, Vol.50, No.4, p.663-666, 1969.
136. Justice, C.O., Monitoring the grasslands of semi-arid African using NOAA-AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 7, p.1383-1409, 1986.
137. Kauth, R. J. and Thomas, G. S., The Tasseled Cap — a graph description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Machine Processing of Remote Sensed Data*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, p.4B41-4B51, 1976.
138. Kaufman, Y. J. and Sendra, C., Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.9, No.8, p.1357-1381, 1988.
139. Kaufman, Y. J. and Tanré, D., Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS, *Proceedings of IEEE IGARS'92*, p.261-270, New York, 1992.
140. Kaufman, Y. J. and Tanré, D., Strategy for direct and indirect methods for correcting the aerosol effect on remote sensing: From AVHRR to EOS-MODIS, *Remote Sensing of Environment*, Vol.55, p.65-79, 1996.
141. Kent, M., Gill, W. J., Weaver, R. E. *et al.*, Landscape and plant community boundaries in biogeography, *Progress in Physical Geography*, Vol.2, p.315-353, 1997.
142. Kiang, R. K., Atmospheric effect on cluster analyses, *Proceedings of the 13th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Vol.2, p.1189-1194, Ann Arbor, Michigan, 1979.
143. King, D., Le Bissonnais, Y., Hardy, R., Eimberck, M. et King, C., Combinaison spatiale d'informations pour l'évaluation des risques de ruissellement à l'échelle régionale, In: *Gestion de l'Espace Rural et Système d'Information Géographique*, éd. par Buche, P., King, D. et Lardon, S., INRA, France, 1992.
144. Kleinbaum, D. G., Kupper, L. L., Muller, K. E. and NIZAM, A., *Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods*, 2nd ed., Duxbury Press, 1998.
145. Kleinbaum, D. G., Kupper, L. L., Muller, K. E. and NIZAM, A., *Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods*, 1st ed., Wadsworth Publishing Company, Inc., 1978.
146. Kneizys, F.X., Shettle, E. P., Gallery, W. O. *et al.*, *Atmospheric transmittance/ Radiance: Computer Code LOWTRAN6*, AFGL Publication (Hanscom U.S. Air Force Base, Massachusetts: Air Force Geophysics laboratory), 1983.
147. Knipling, E.B., Physical and physiological bases for the reference of visible and near infrared radiation from vegetation, *Remote Sensing of Environment*, Vol.1, p.155-159, 1970.
148. Komar, P. D., *Beach Processes and Sedimentation*, Prentice-Hall, Inc., 1998.
149. Lambin, E. F. and Strahler, A. H., Change-vector analysis in multitemporal space: A tool to detect and categorize land cover change processes using high temporal resolution satellite data, *Remote Sensing of Environment*, Vol.48, p.231-244, 1994.

- 150.Lambin, E. F., *Modelling deforestation processes* (A Review), Tropical ecosystem environment observations by satellites, TREES series B: Research Report n°1, EUR15744EN, p.45-101, 1994.
- 151.Lambin, E. F. and Ehrlich, D., Land-cover changes in sub-Saharan Africa (1982-1991): Application of a change index based on remotely-sensed surface temperature and vegetation indices at a continental scale, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 61, No.2, p.181-200, 1997a.
- 152.Lambin, E. F. and Ehrlich, D., Identification of tropical deforestation fronts at broad spatial scales, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, No.17, p.3551-3568, 1997b.
- 153.Lambin, E. F., Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions, *Progress in Physical Geography*, Vol.21, No.3, p.375-393, 1997.
- 154.Lambin, E. F., Baulies, X., Bockstael, N., Fisher, G. et al., *Land-Use and Land-Cover Change (LUCC): Implementation Strategy*, published by IGBP, 1999.
- 155.Lambin, E. F., Land cover assessment and monitoring, In: *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, Editor: R. A., Meyers, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- 156.Lambin, E. F., Turner, B.L., Geist, H. J., Agbola, S.B., Angelsen, A., Bruce, J.W., Coomes, O.T., et al., The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths, *Global Environmental Change*, Vol. 11, p.261-269, 2001.
- 157.Lamprey, H.F., *Report on the desert encroachment reconnaissance in north Sudan*, Oct. 21-Nov. 10, UNESCO/UNEP (mimeo), p.16, 1975.
- 158.Lanjamet, La grande plage mauritanienne (géographie, écologie et faune), Centre culturel français, A. de St Exupéry, *Coll. Connaissance de Mauritanie*, p.93, 1988.
- 159.Larsen, L., GIS in environmental monitoring and assessment, In: *Geographic Information System* by Longley, P.A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. and Rhind, D.W., 2nd ed., Vol.2, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- 160.Legros, J.P., Bornand, M. et Viron, J.C., Recherche des zones aptes à l'épandage de compost urbains dans la région de Montpellier (Hérault, France), In: *Gestion de l'Espace Rural et Système d'Information Géographique*, éd. par Buche, P., King, D. et Lardon, S., INRA, France, 1992.
- 161.Leng, S., Zheng, D., Land degradation and its management in the arid and semiarid areas of China, *Journal of Chinese Geography*, Vol.7, No. 4, 1997.
- 162.Leung, G., Yellow River Homepage, <http://www.cis.umassd.edu/~gleung>, 1997.
- 163.Lillesand, T. M. and Kiefer, R. W., *Remote Sensing and Image Interpretation* (1st ed.), John Wiley & Sons, Inc., 1979.
- 164.Lillesand, T. M. and Kiefer, R. W., *Remote Sensing and Image Interpretation* (3rd ed.), John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- 165.Lillesand, T. M. and Kiefer, R. W., *Remote Sensing and Image Interpretation* (4th ed.), John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- 166.Lindgren, D. T., *Land use planning and remote sensing*, Martinus Nijhoff Publishers, 1985.
- 167.Longley, P.A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. and Rhind, D. W., *Geographic Information System*, 2nd ed., Vol.2, John Wiley & Sons, Inc., 1999.

168. Lunetta, R. S., Application, project formulation and analytical approach, In: *Remote Sensing Change Detection — environmental monitoring methods and application*, Lunetta, R. S. and Elvidge, C. D., Eds, Taylor & Francis Ltd., London, 1999.
169. MAB, *MAB Technical Notes 7 for the Map of the world distribution of arid regions*, 1977, published by the UNESCO, Paris, 1979.
170. Mackey, B. G., Sims, R. A., Baldwin K.A., and Moore I. D., Spatial analysis of boreal forest ecosystems — Results from the Rinker Lake case study, In: *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*, edited by Goodchild, M.F., Steyaert, L.T. and others, GIS World, Inc., 1996.
171. Maia, L. P., Jimenez, J. A., Serra, J. *et al.*, The Fortaleza (NE Brazil) Waterfront: Port versus coastal management, *Journal of Coastal Research*, Vol.14, p.1284-1292, 1998.
172. McCoy, J. and Johnston, K., *Using ArcGIS Spatial Analyst*, ESRI, USA, 2001.
173. Maidment, D.V., Environmental modeling with GIS, In: *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*, edited by Goodchild, M.F., Steyaert, L.T. and others, GIS World, Inc., 1996.
174. Mainguet, M., *Desertification: Natural background and human mismanagement*, Springer, Berlin, 1991.
175. Mainguet, M., *Desertification* (2nd ed.), Springer-Verlag, 1994.
176. Malila, W. A., Change vector analysis: an approach for detection forest changes with Landsat, *Proceedings of the 6th Annual Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University, West Lafayette, p. 326-335, 1980.
177. Malingreau, J. P., Tucker, C. J., and Laporte, N., AVHRR for monitoring global tropical deforestation, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 10, p.855-867, 1989.
178. Mathieu, R., Pouget, M. *et al.*, Caractérisation spectrale et spatialisée d'indicateurs de la dégradation du complexe sol-végétation à partir de données SPOT XS, *Photo-Interpretation*, No.4, 1998.
179. Mertens, B., and Lambin, E.F., Spatial modelling of deforestation in Southern Cameroon: Spatial disaggregation of diverse deforestation processes, *Applied Geography*, Vol.17, p.143-162, 1997.
180. Mertens, B., and Lambin, E.F., Land cover change trajectories in Southern Cameroon, *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 90, No.3, p.467-494, 2000.
181. Meuret, M., Mielliet, P., Maitre, P. et Mazurek, H., Diagnostic sur une pratique de gardiennage de troupeau caprin en milieu boisé, In: *Gestion de l'Espace Rural et Système d'Information Géographique*, éd. par Buhe, P., King, D. et Lardon, S., INRA, France, 1992.
182. Miller, L. D., Nualchawee, K. and Tom, C., Analysis of the dynamics of shifting cultivation in the tropical forest of northern Thailand using landscape modelling and classification of Landsat imagery, *Proceedings of the 12th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, MI, USA, April 20-26, Vol.2, p.1167-1185, 1978.
183. Mitsova, H., Mitsova, L., Brown W. M. and others, Modeling spatial and temporal distributed phenomena: new methods and tools for open GIS, In: *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*, edited by Goodchild, M.F., Steyaert, L.T. and others, GIS World, Inc., 1996.
184. Moran, M. S., Jackson, R. D., Slater, P., N., and Teillet, P. M., Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 41, p.169-184, 1992.
185. NASA, *Landsat 7 Science data Users Handbook*, 2000 (<http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook>).

186. Negahban, B., Fonyo, C., Campbell, K. L. and others, LOADSS: a GIS based decision support system for regional environmental planning, In: *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*, edited by Goodchild, M.F., Steyaert, L.T. and others, GIS World, Inc., 1996.
187. Nelson, R. F., Detecting forest canopy change due to insect activity using Landsat MSS, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.49, p.1303-1314, 1983.
188. Nelson, R., *Dryland management: the desertification problem: Environmental Department Working Paper No. 8*, Washington, World Bank, 1988.
189. Nicoullaud, B., Couturier, A., Dammy, J. et Machet, J. M., Utilisation d'un SIG pour la gestion des parcelles d'une exploitation agricole, In: *Gestion de l'Espace Rural et Système d'Information Géographique*, éd. par Buche, P., King, D. et Lardon, S., INRA, France, 1992.
190. Nualchawee, K., Miller, L., Tom, C., Christenson, J. and Williams, D., *Spatial inventory and modelling of shifting cultivation and forest land cover of northern Thailand, with inputs from maps, airphotos and Landsat*, Remote Sensing Center Technical Report, No.4177, Texas, Texas A&M University, College Station, 1981.
191. Olsson, L., *Desertification or climate? — Investigation regarding the relationship between land degradation and climate in the central Sudan*, Lund series in Geography series A, 60., 1983.
192. Olsson, L., *An integrated study of desertification: applications of remote sensing, GIS and spatial models in semiarid Sudan*. Meddelanden fran Lunds Univesitets Geografika Institution, Avhadlingar, 98, p170, 1985.
193. Olson, G. W., Archaeology: Lessons on future soil use, *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 36, No. 5, p.261-264, 1981.
194. Openshaw, S. and Albanides, S., Applying geocomputation to the analysis of spatial distribution, In: *Geographic Information System*, edited by Longley, P.A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. and Rhind, D.W., 2nd ed., Vol.2, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
195. Otto-Bliesner, B. L., El Nino/La Nina and Sahel precipitation during the Middle Holocene, *Geophysical Research Letters*, Vol.26, No.1, p.87-90, 1999.
196. Ozer, P., Evolution des directions et des vitesses des vents de 1951 à 1994 sur la façade atlantique de l'Afrique de l'ouest, 1999, <http://phypc9.geo.ulg.ac.be/climato/aic96txt.html>.
197. Parker, D. C. and Meretsky, V., Measuring emergent properties of agent-based land-use models using spatial metrics, Review copy submitted to *Agriculture, Ecosystem, and Environment*, 2002.
198. Pascal, J-P., Moravie, M-A. et Auger, P., Modélisation de la dynamique forestière: recherche de configuration spatiale, In: *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*, Coordinateur: Blasco, F., CNRS, Elsevier, Paris, p. 365-374, 1997.
199. Paskoff, R., *Les littoraux, impacts des aménagements sur leur évolution*, Troisième édition revue et corrigée, Armand Colin/Masson, Paris, p.5-39, 1998.
200. Philippon, S., *La côte de Nouakchott (Mauritanie): une évolution naturelle et anthropique*, Mémoire de Maîtrise, sous la direction de Prof. Courel, Université de Paris 1, 1999.
201. Potter, J. F., The correction of Landsat data for the effects of haze, sun angle and background reflectance, *Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium Proceedings*, p. 24-31, 1977.

202. Price, J. C., Calibration of satellite radiometers and the comparison of vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, Vol.21, p.15-27, 1987.
203. Price, K. P., Pyke, D. A. and Mendes, L., Shrub dieback in a semiarid ecosystem: The integration of remote sensing and geographic information systems for detecting vegetation, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 58, No.4, p.455-463, 1992.
204. Putnam, J.A., Munk, W.H. and Traylor, M.A., The prediction of longshore currents, *Tras. Am. Geophys. Union*, Vol.30, p.337-345, 1949.
205. Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R. and Kerr, Y. H., Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI), *Remote Sensing of Environment*, Vol. 48, p.119-126, 1994.
206. Quarmby, N.A., Cushnie, J.L., Monitoring urban land cover changes at the urban fringe from SPOT HRV imagery in south-east England, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.10, p. 951-963, 1989.
207. Ramsey III, E. W., Nelson, G. A. *et al*, Generation of coastal marsh topography with Radar and ground-based measurements, *Journal of Coastal Research*, Vol.14, p.1158-1164, 1998.
208. Richards, J. A, 1984, Thematic Mapping From Multitemporal Image Data Using the Principle Components Transformation, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 16, pp 35-46.
209. Richards, J.A., *Remote Sensing Digital Image Analysis - An Introduction* (Springer Verlag, New York), 1986.
210. Richards, J.A and Jia X., *Remote Sensing Digital Image Analysis - An Introduction* (3rd ed., Springer Verlag, New York), 1999.
211. Richardson, A.J. and Wiegand, C.L., Distinguishing vegetation from soil background information, *Photogrammetric Engineering and Remote sensing*, Vol., 43, p.1541-1552, 1977.
212. Richter, R., A fast atmospheric correction algorithm applied to Landsat TM images, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 11, No.1, p.159-166, 1990.
213. Rifman, S. S. *et al*., Experimental study of application of digital image processing technique to Landsat data: *TRW Systems Group Report 26232-6004-TU-00 for NASAGoddard Space Flight Center*, Greenbelt, MD, 1975.
214. Robinson, V.B., Information theory and sequences of land use: an application, *Professional Geographer*, Vol. 30, No.2, p.174-179, 1978.
215. Rouse, J.W., Hass, R.H., Schell, J. A., Deering, D. W., Harlin, J. C., Monitoring the vernal advancement of natural vegetation, *NASA/GSCF Final Report*, Greenbelt, MD, p.371, 1974.
216. Rudel, T.K., Population, development and tropical deforestation: a cross-national study, *Rural Sociology*, Vol.54, No.3, p.327-338, 1989.
217. Sabins, F. F. JR., *Remote Sensing— Principles and interpretation*, W. H. Freeman and Company, 1978.
218. Sali, E. and Wolfson, H., Texture classification in photographs and satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.13, p.3395-3408, 1992.
219. Schaber, G., McCauley, J. F., Breed, C.S., Olhoeft, G.R., Shuttle imaging Radar: physical controls on signal penetration and subsurface scattering in the Eastern Sahara, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, Vol. GE-24, No.4, p.603-622, 1986.
220. Schowengerdt, R. A., *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing*, Academic Press, Inc., London, 1983.

221. Serneels, S. and Lambin, E. F., , Proximate cause of land-use change in Narok District, Kenya: a spatial statistical model, *Agriculture, Ecosystem and Environment*, Vol.85, p.65-81, 2001.
222. Shaban, M.A. and Dikshit, O., Improvement of classification in urban areas by the use of textural features: the case study of Lucknow city, Uttar Pradesh, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22, p565-693, 2001.
223. Sharma, R. D., Enhancement of Earth resources technology satellite (ERTS) and aircraft imagery using atmospheric corrections, *Proceedings of the 8th International Symposium of Remote Sensing of Environment*, Vol.2, Manila, p.1241-1257, 1972.
224. Sheridan, D., Desertification of the United States, In: *Report of Council on Environmental Quality*, US Government, Washington DC, 1981.
225. Simonin, A., Burollet, P., Ballais, J-L., Fournet, A., Parrot, J-F., Apport des données du radar-imageur SIR.C pour la reconnaissance de surface en Tunisie présaharienne, *Annales des Mines et de la Géologie*, Vol. 40, p.45-54, 2000.
226. Simonin, A. et Duperet, A., Inventaire des phénomènes d'érosion dans le Tell oranais (Algérie) à partir de données SPOT stéréoscopiques, *Actes du 115^e Congrès national des Sociétés Savantes et Géologie Africaine*, Avignon, France, p.225-234, 1990.
227. Singh, A., Digital change detection techniques using remotely sensed data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.10, No.6, p.989-1003, 1989.
228. Sklar, F. H., and Costanza, R., The development of dynamic spatial models for landscape ecology: A review and prognosis, In: *Quantitative methods in landscape ecology*, edited by Turner, M. G., Gardner, R. H., *Ecological Studies*, Vol. 82, p.239-288, Springer-Verlag, 1991.
229. Skole, D. and C. J. Tucker, Tropical deforestation and Habitat Fragmentation in the Amazon: Satellite data from 1978 to 1988, *Science*, Vol. 260, p.1905-09, 1993.
230. Slater, P. N., Doyle, F. J., Fritz, N. L., and Welch, R., *Photographic systems for remote sensing, Second Edition of Manual of Remote Sensing*, American Society of Photogrammetry, p.231-291, 1983.
231. Smith, O.B. and Koala S., Desertification : Myth and realities, *Canadian Science Writer's Annual General Meeting*, May 27-29, 1999 (http://www.idrc.ca/media/DesertMyths_e.html).
232. Stafford, D. B. and Langfielder, J., Air photo survey of coastal erosion, *Photogrammetric Engineering*, Vol.37, p.565-575, 1971.
233. Statistical Bureau of Ningxia, *Ningxia Statistical Yearbook* (in Chinese), China Statistics Press, 1989, 1992, 1994, 1997 and 2000.
234. Statistical Bureau of Ningxia, *Economic Atlas of Ningxia* (in Chinese), Xi'an Map Press, 1990, 1997.
235. Steiz, D.E., Chandier L., Droughts aggravated by dust in the wind, NASA Goddard Space Flight Center-EOS, May 15, 2001 (<http://www.newswise.com/articles/2001/5/DUST.GSC.html>).
236. Swain, P. H., *Land use classification and mapping by machine-assisted analysis of Landsat multispectral scanner data*, Laboratory for Applications of Remote Sensing, Information Note: 112776, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1976.
237. Tanré, D., Déroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J. J., Perbos, J. and Deshamps, P. Y., Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: 5S code, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 11, p.659-668, 1990.

238. The world Factbook, Mauritania, <http://www.siteatlas.com/Maps/Factbook/mr.html>, 2000.
239. The Hutchinson Family Encyclopedia, <http://ebooks.whsmithonline.co.uk/encyclopedia/56/M00005056.htm>, 2000.
240. Thomas, D.S.G. and N.J. Middleton, *Desertification: Exploding the Myth*, John Wiley, Chichester, 1994.
241. Thomas, I.L., Ching, N.P., Benning, V.M. et al, A review of multi-channel indices of class separability, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.8, p331-350, 1987.
242. Tobler, W.R., A computer movie: simulation of population change in the Detroit region, *Economic Geography*, Vol.46, p.234-240, 1970.
243. Tobler, W. R., Cellular geography, In: *Philosophy in Geography*, edited by Gale, S, and Olsson, G., Dordrecht, Reidel, p.379-386, 1979.
244. Todd, W. J., Urban and regional land use change detected by using Landsat data, *Journal of Research, USGS*, Vol.5, p.527-534, 1977.
245. Toll, D.L., Royal, J.A. and Davis, J.B, Urban area up-date procedures using Landsat data, *Proceedings of the Fall Technical Meeting of the American Society of Photogrammetry*, Niagara Falls, Canada, p. RS-E1-17, 1980.
246. Toupet *et al*, *Atlas de Mauritanie*, 1977.
247. Townshend, J. and Justice, C., Information extraction from remote sensed data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 2, p.313-329, 1981.
248. Townshend, J.R.G., Agricultural land cover discrimination using thematic mapper spectral bands, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.6, p 681-698, 1984.
249. Tucker, C. J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, Vol.8, p.127-150, 1979.
250. Tucker, C. J., Holben, B.N., and Goff, T. E., Intensive forest clearing in Rondonia, Brazil, as detected by satellite remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 15, p.255-261, 1984.
251. Tucker, C. J., Townshend, J.R.G. and Goff, T. E., African land cover classification using satellite data, *Science*, Vol.227, p. 369-375, 1985.
252. Tucker, C. J., Justice, C.O., Prince, S.D., Monitoring the grasslands in the Sahel 1984-1985, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 7, p.1571-1581, 1986.
253. Tucker, C.J., Dregne, H.E. and Newcomb, W.W., Expansion and contraction of Sahara Desert from 1980 to 1990, *Science*, 253, p.299-301, 1991.
254. Turner II, B.L., Skole, D., Sanderson, S., Ficher, G. *et al.*, *Land-Use and Land-Cover Change Science/Research Plan*, IGBP Global Change Report No.35 and IHDP Report No.7, 1995.
255. Turner, R. E., Malila, W.D., and Nalepka, R.F., Importance of atmospheric scattering in remote sensing or everything you've wanted to know about atmospheric scattering but were afraid to ask, *Proceedings of the 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Vol.3, Ann Arbor, Michigan, p.1651-1695, 1971.
256. Turner, R. E. and Spencer, M. M., Atmospheric model for correction of spacecraft data, *Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Vol.2, Ann Arbor, Michigan, p.895-934, 1972.

257. Turner, R. E., Signature variation due to atmospheric effects, *Proceedings of the 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Vol.2, Ann Arbor, Michigan, p.671-682, 1975.
258. UNCED (United Nations Conference on Environment and Development), *Agenda 21-United Nations Conference on Environment and Development*, Brazil, UNCED, June 3-14, 1992.
259. UNCOD (United Nations Conference on Desertification), *Round-up, Plan of Action and Resolutions*, United Nations Conference on Desertification, p.43, Nairobi, Kenya, 1977.
260. UNEP (United Nations Environment Programme), *General Assessment of Progress in the Implementation of the Plan of Action to Combat Desertification*, 1978-1984, GC-129, 1984.
261. UNEP (United Nations Environment Programme), *Status of Desertification and Implementation of the United Nations Plan of Action to Control Desertification*, Nairobi, Kenya: UNEP, 1991.
262. Université de Rouen et Université de Nouakchott, *Atlas migrations et gestion du territoire, République islamique de Mauritanie*, Coopération française CAMPUS, 1999.
263. Veldkamp, A., Verburg, P.H., Kok, K., De Koning, G.H. J., Priess, J., and Bergsma, A. R., The need for scale sensitive approaches in spatially explicit land use change modelling, *Environmental Modeling and Assessment*, Vol. 6, p.111-121, 2001.
264. Verburg, P.H., Chen, Y.Q., Multi-scale characterization of land use patterns in China, *Ecosystem*, Vol.3, p.369-385, 2000.
265. Verburg, P. H., Veldkamp, W. S. A. *et al.*, Modelling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model, *Environmental Management*, Vol.30, No.3, p.391-405, 2002.
266. Verstappen, H. Th., The application of aerial photograph interpretation in geomorphological research, *Pol. Acad. Sci., Geogr. Studies*, Warszawa, Vol.46, p.122-126, 1963.
267. Verstappen, H. Th., *Remote Sensing in Geomorphology*, Elsevier Scientific Publishing Company, 1977.
268. Vidal, F. et Hubschman, J., Conception 'une base de données images pour la cartographie assistée par ordinateur, exploitation sous logiciel de traitement d'image de télédétection, In: *Gestion de l'Espace Rural et Système d'Information Géographique*, éd. par Buche, P., King, D. et Lardon, S., INRA, France, 1992.
269. Vieux, B. E., Farajalla, N., S. and Gaur, N., Integrated GIS and distributed storm water runoff modeling, In: *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*, edited by Goodchild, M.F., Steyaert, L.T. and others, GIS World, Inc., 1996.
270. Vincent, R. K., An ERTS Multispectral Scanner experiment for mapping iron compounds, In *Proceedings of the 8th international Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, Michigan, p.1239-1247, 1972.
271. Wang, F., Improving remote sensing image analysis through fuzzy information representation, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.56, p.1163-1169, 1990.
272. Wang, Z. and Yang, X., *Birth and Death Processes and Markov Chains*, Springer-Verlag and Science Press of China, 1992.
273. Warren, A. and Agnew, C., *An assessment of desertification and land degradation in arid and semi-arid area*, International Institute for Environment and Development, Drylands Programme, Paper 2, London: IIED, 1988.
274. Weismiller, R.A., Kristof, S.J., Scholz, D.K., Anuta, P.E., and Momen, S.A., Change detection in coastal zone environments, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.43, p.1533-1539, 1977

275. William, M. A. , Interactions of desertification and climate: Present understanding and future research imperatives, *Aridlands*, No.49, may/June, 2001(<http://ag.arizona.edu/OALS/ALN/aln49/glantz.html>).
276. Willinger, M., La modélisation du développement durable: approches économiques, In: *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*, Coordinateur: Blasco, F., CNRS, Elsevier, Paris, p.135-150, 1997.
277. Woodcock, C. E. and Strahler, A., 1987, The factor of scale in remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, Vol.21, p.311-332.
278. Wu, W. and Ai, G., Risk assessment of natural disasters in the course of selection of nuclear waste disposal (in Chinese with English abstract), *Journal of East China Geological Institute*, Vol.18, No.3, 1995.
279. Wu, W. and Lambin, E. F., Land use and cover change dynamics (an abstract), *International Symposium on LUCCD*, Beijing, China, Aug., 2001.
280. Wu, W., Lambin, E. F. and Courel, M.-F., Land use and cover change detection and modeling for North Ningxia, China, *Proceedings of Map Asia 2002*, Bangkok, Thailand, Aug.6-9, 2002a. <http://www.gisdevelopment.net/application/environment/overview/envo0008.htm>
281. Wu, W., Courel, M.-F. and Le Rhun, J., Coastal geomorphological change monitoring by remote sensing techniques in Nouakchott, Mauritania, In: *Proceedings of the 9th International Symposium on Remote Sensing*, edited by Manfred Ehlers, SPIE Vol. 4886, p. 667-679, Agia, Pelagia, Crete, Greece, Sept. 22-27, 2002b.
282. Wu, W., Courel, M.-F. and Le Rhun, J., Application of Remote Sensing to the Urban Expansion Analysis for Nouakchott, Mauritania, *Geocarto International*, Vol. 18, No.1, p.17-24, 2003a.
283. Wu, W. and Zhang, W., Present land use and cover patterns and their development potential in North Ningxia, China, *Journal of Geographical Sciences*, Vol.13, No.1, p.54-62, 2003b.
284. Wu, W., Evaluation of land use and cover change in north Shaanxi, China, *Photo-Interpretation* (in press), 2003c.
285. Xu, J.X., Erosion caused by hyperconcentrated flow on the Loess Plateau of China, *CATENA*, Vol.36, No.1-2, p.1-19, 1999.
286. Yan, Z., Jiang, J., He, J., Zhao, Y. and Du, D., *Urban Geographic Information System* (in Chinese), Sciences Press, 1998.
287. Yang, C., Land degradation and its control strategies in China, *Journal of Chinese Geography*, Vol.7, No.2, 1997.
288. Yuan, D., Elvidge, C. D. and Lunetta, R. S., Survey of multispectral methods for Land cover change analysis, In *Remote Sensing Change Detection — Environmental monitoring methods and application* (Lunetta R.S. and Elvidge C.D.), Taylor & Francis, 1999.
289. Zhang, F. R., and Wang, L.X., Analysis of present land use situation in Ejinhoro Qi, Inner Mongolia (in Chinese), <http://nic6.forestry.ac.cn/sts/tdly/tdly.html>, 2001.
290. Zhang, J. and Foody, G. M., Fully-fuzzy supervised classification of sub-urban land cover from remotely sensed imagery: statistical and artificial neural network approaches, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.22, p. 615-628, 2001.
291. Zheng, F. L., Tang, K. L., Cha, X. and Bai, H.Y., Relationship of eco-environmental changes with natural erosion and artificially accelerated erosion, *Journal of Chinese Geography*, Vol.7, No.2, p.75-84, 1997.

292. Zhu, Z. and Liu, S., Desertification control in northern China. *Desertification Control Bulletin*, Vol.5, p.13-19, 1981.
293. Zhu, Z., and Wang, T., Trends in desertification and its rehabilitation in China, *Desertification Control Bulletin* Vol.22, p.27-30, 1993 (<http://www.ciesin.org/docs/002-224/002-224.html>).
294. Zhu, Z., and Cui, S., Desertification in China: Status, trends and strategies, *Journal of Chinese Geography*, Vol.5, No.3, p.32-43, 1995.

ANNEXE I: CORRECTION ATMOSPHERIQUE ET TRANSFORMATION DE LA RADIANCE A LA REFLECTANCE

This correction and transformation is conducted in two steps:

1. Haze removal

As shown in the above chapters (II, IV and V), the fourth component of the TM Tasseled Cap transformation (Crist *et al.*, 1984a, 1984b and 1986a) is applied to extract the total haze value of pixel, which is formulated as:

$$H = 0.8832 \times B1 - 0.0819 \times B2 - 0.4580 \times B3 - 0.0032 \times B4 - 0.0563 \times B5 + 0.0130 \times B7$$

The mean haze value is used to estimate the atmospheric scattering effect and removed from each band according to their distribution percentage as shown in table 2-2. This value of the TM and ETM image of the critical areas in northwest China is depicted in table A1-1.

Table A1-1: Mean haze value of Landsat TM and ETM+ image used in this research

Path& Row	Region	Sensor type	Date	Zenith angle	Mean haze value (in DCs)
129/33	North Ningxia	L5 TM	Sept.20, 1987	43.97°	85.54
		L7 ETM+	Aug.12, 1999	31.38°	31.06
127/33	North Shaanxi	L5 TM	Aug.2, 1986	34.10°	68.58
		L7 ETM+	July 31, 2000	29.01°	19.66

2. Complete correction by COST model

After haze removal, the effect from the differences of the sun-earth distance and sun elevation angle is undertaken using the COST model (equations II-2 and II-5 in Chapter II). The simplified form of equation II-2 (equation II-5) is repeated here:

$$R_s = \frac{\pi(L_{sat} - L_{haze})}{E_o \cos^2 \theta}$$

where

R_s — spectral reflectance of the surface;

L_{haze} — haze effect, for example, path radiance ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$);

E_o — solar spectral irradiance on a surface perpendicular to the sun's rays outside the atmosphere ($\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$). E_o contains the Earth-Sun distance term that is in astronomical units (AUs are a function of time of year and range from about 0.983 to 1.017), it can be found in tables A1-2 (for Landsat 5) and A1-3 (Landsat 7)

θ — solar zenith angle

L_{sat} — at-satellite spectral radiance for the given band ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$). It has the following relationship with the digital counts of pixel (Lillesand *et al.*, 1994; Chavez 1996, and NASA, 2000):

$$L_{sat} = ((L_{max} - L_{min})/\text{Maximum DC}) * \text{DC} + L_{min}$$

where L_{max} represents the spectral radiance scaled to the maximum digital count (DC), L_{min} is the spectral radiance to the minimum DC. L_{min} and L_{max} are shown in tables A1-4 (for Landsat 5) and A1-5 (for Landsat 7).

Table A1-2: TM solar exoatmospheric spectral irradiance ($\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$)

Model	Neckel and Labs		Chance spectrum CHKUR	
Band	Landsat 4	Landsat 5	Landsat 4	Landsat 5
1	1958	1957	1957	1957
2	1828	1829	1825	1826
3	1559	1557	1557	1554
4	1045	1047	1033	1036
5	219.1	219.3	214.9	215.0
7	74.57	74.52	80.72	80.67

(After Chander *et al.*, 2003)

Table A1-3: ETM+ solar spectral irradiances ($\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$)

Band	1	2	3	4	5	7	8
E_o	1969	1840	1551	1044	225.7	82.7	1368

Table A1-4: Spectral radiances for Landsat 5 ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)

Related duration	From the 1 st March 1984 to the 4 th May 2003		After the 5 th May 2003	
	Lmin	Lmax	Lmin	Lmax
Band				
1	-1.52	152.10	-1.52	193.0
2	-2.84	296.81	-2.84	365.0
3	-1.17	204.30	-1.17	264.0
4	-1.51	206.20	-1.51	221.0
5	-0.37	27.19	-0.37	30.2
6	1.2378	15.303	1.2378	15.303
7	-0.15	14.36	-0.15	16.5

(Modified from Chander *et al.*, 2003)**Table A1-5: Spectral radiances for Landsat 7 ETM+ ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)**

Related duration	Before the 1 st July 2000				After the 1 st July 2000			
	Low gain		High gain		Low gain		High gain	
Band	Lmin	Lmax	Lmin	Lmax	Lmin	Lmax	Lmin	Lmax
1	-6.2	297.5	-6.2	194.3	-6.2	293.7	-6.2	191.6
2	-6.0	303.4	-6.0	202.4	-6.4	300.9	-6.4	196.5
3	-4.5	235	-4.5	158.6	-5.0	234.4	-5.0	152.9
4	-4.5	235	-4.5	157.5	-5.1	241.1	-5.1	157.4
5	-1.0	47.70	-1.0	31.76	-1.0	47.57	-1.0	31.06
6	0	17.04	3.2	12.65	0.0	17.04	3.2	12.65
7	-0.35	16.6	-0.35	10.932	-0.35	16.54	-0.35	10.80
8	-5.0	244	-5.0	158.40	-4.7	243.1	-4.7	158.3

(After NASA, 2000)

The reflectance of the TM and ETM images after atmospheric correction about North Ningxia is depicted as follows:

(1) TM image Sept. 20, 1987:

$$R1 = 0.00201 (\text{DC-43.2}) - 0.00506$$

$$R2 = 0.00419 (\text{DC-24.29}) - 0.01014$$

$$R3 = 0.00338 (\text{DC-12.6}) - 0.00491$$

$$R4 = 0.00512 (\text{DC-5.05}) - 0.00950$$

$$R5 = 0.00328 \text{ (DC-0.34)} - 0.01121$$

$$R7 = 0.0046 \text{ (DC-0)} - 0.01212$$

(2) ETM + images Aug.12, 1999:

$$R1 = 0.00172 \text{ (DC-19.85)} - 0.01358$$

$$R2 = 0.00191 \text{ (DC-11.16)} - 0.01404$$

$$R3 = 0.00178 \text{ (DC-5.8)} - 0.01251$$

$$R4 = 0.00388 \text{ (DC-2.3)} - 0.01859$$

$$R5 = 0.00245 \text{ (DC- 0.2)} - 0.00191$$

$$R7 = 0.0023 \text{ (DC-0)} - 0.01823$$

These reflectance values are inputted for Tasseled Cap features derivation.

ANNEXE II : MATRICES DES COEFFICIENTS DE CORRELATION

Table A2-1: Pearson correlation matrix for the panel analysis in North Ningxia

Evolution of socio-economic elements from 1988 to 1999	Change in environmental elements from 1987 to 1999									
	ΔFarmland	ΔArtificial & natural vegetation	Land to water	Water to land	ΔWater-body	ΔRiver course	Land degradation	ΔUrban	ΔRural built-up	ΔTotal built-up
ΔTotal population	0.309	-0.028	0.010	-0.314	0.340	-0.225	0.802	0.978	-0.041	0.644
ΔUrban population	0.251	-0.043	-0.024	-0.266	0.252	-0.285	0.819	0.986	-0.052	0.641
ΔRural population	0.445	0.140	0.294	-0.350	0.692	0.577	-0.323	-0.286	0.106	-0.112
ΔRural labour force	0.643	0.689	0.857	0.519	0.405	0.060	-0.395	-0.231	0.942	0.516
ΔTotal sown area	0.370	0.821	0.743	0.904	-0.123	0.568	-0.217	-0.336	0.688	0.266
ΔFood area	0.365	0.795	0.770	0.801	0.015	0.390	-0.399	-0.456	0.808	0.267
ΔFood product	0.569	0.752	0.855	0.589	0.330	0.157	-0.377	-0.269	0.945	0.491
ΔMeat product	0.692	0.955	0.942	0.729	0.280	0.355	0.168	0.205	0.911	0.797
ΔVegetable oil	-0.143	0.337	0.177	0.848	-0.691	0.370	-0.158	-0.336	0.167	-0.111
ΔAgricultural output	0.849	0.607	0.862	0.414	0.520	-0.004	-0.127	0.183	0.911	0.779
ΔIndustrial output	0.145	-0.122	-0.125	-0.300	0.175	-0.411	0.841	0.967	-0.150	0.558
ΔGDP	0.313	-0.031	0.022	-0.268	0.304	-0.277	0.778	0.977	-0.006	0.668
ΔGDP per capita	0.078	-0.286	-0.244	-0.341	0.086	-0.468	0.740	0.916	-0.243	0.454
ΔTemperature 99-88	0.140	0.275	0.185	-0.224	0.440	-0.091	0.316	0.165	0.097	0.190
ΔPrecipitation 99-88	0.538	0.117	0.348	-0.440	0.846	0.378	-0.322	-0.135	0.263	0.099
ΔEvaporation 99-88	0.207	0.080	0.299	0.384	-0.071	0.173	-0.822	-0.647	0.391	-0.169

Note: The changes in environmental elements are derived from the change detection for the period 1987-1999 and the evolution in socio-economic elements are calculated from the Statistical Yearbooks of Ningxia for the period 1988-1999 (see Chapter IV).

Table A2-2: Pearson correlation matrix for the cross-sectional analysis in North Ningxia

Socio-economic element in 1999	Environmental elements in 1999										
	Urban	Village	Farmland	Forest	Sandy grassland	Water-body	River	Bare land	Saline land	Coal residue	Marsh
Total population	0.922	0.319	0.304	0.473	-0.260	0.047	-0.332	-0.153	0.117	0.087	0.050
Urban population	0.981	-0.003	-0.069	0.194	-0.252	-0.227	-0.254	-0.152	-0.140	0.007	-0.222
Rural population	-0.114	0.850	0.978	0.742	-0.031	0.713	-0.216	-0.010	0.673	0.210	0.707
Rural labour force	-0.197	0.803	0.966	0.732	-0.079	0.706	-0.260	-0.039	0.675	0.201	0.692
Total sown area	-0.317	0.853	0.911	0.647	0.015	0.856	-0.081	0.235	0.819	0.378	0.823
Food area	-0.355	0.792	0.905	0.646	-0.009	0.794	-0.137	0.159	0.768	0.345	0.773
Food product	-0.336	0.698	0.916	0.676	-0.087	0.638	-0.282	-0.105	0.608	0.145	0.630
Vegetable oil	-0.297	0.506	0.242	0.023	0.000	0.727	0.228	0.767	0.745	0.601	0.587
Meat product	0.087	0.972	0.951	0.782	0.022	0.872	-0.065	0.242	0.827	0.391	0.851
Chemical fertiliser used	-0.105	0.914	0.971	0.779	0.012	0.862	-0.106	0.184	0.821	0.372	0.850
Agricultural output	0.011	0.829	0.970	0.780	-0.081	0.638	-0.271	-0.176	0.570	0.037	0.625
Industrial output	0.982	0.000	-0.050	0.202	-0.296	-0.227	-0.303	-0.163	-0.126	0.021	-0.230
GDP	0.928	0.167	0.119	0.340	-0.176	-0.108	-0.220	-0.241	-0.088	-0.105	-0.093
GDP per capita	0.936	-0.116	-0.145	0.111	-0.318	-0.348	-0.321	-0.283	-0.264	-0.134	-0.358
Mean temperature	0.515	-0.431	-0.332	-0.137	-0.664	-0.355	-0.610	0.079	-0.018	0.470	-0.422
Total precipitation	0.498	0.738	0.664	0.600	0.276	0.396	0.102	-0.013	0.291	0.039	0.476
Total evaporation	-0.250	-0.476	-0.583	-0.666	-0.442	-0.196	-0.171	0.381	0.001	0.306	-0.380

(Data source: see Chapter IV)

Table A2-3: Pearson correlation matrix for the panel analysis in North Shaanxi/Mu Us

Evolution of socio-economic elements from 1984 to 2000	Change in environmental elements from 1986 to 2000						
	ΔFarmland	ΔWater-body	ΔVegetation	ΔUrban	ΔRural built-up	ΔTotal built-up	ΔCoal residue
ΔTotal population	0.643	0.161	-0.660	0.844	0.593	0.790	0.527
ΔUrban population	0.640	-0.070	-0.464	0.939	0.696	0.897	0.525
ΔRural population	0.613	0.573	-0.651	0.704	0.511	0.676	0.483
ΔRural labour force	-0.358	0.121	-0.020	-0.307	0.914	0.709	0.995
ΔCultivated area	0.234	-0.750	0.662	-0.016	-0.337	-0.206	-0.724
ΔFood product	0.993	-0.108	-0.419	0.717	0.115	0.420	-0.218
ΔAgricultural output	0.851	-0.268	0.127	0.528	0.237	0.508	-0.367

(Data source: see Chapter V)

ANNEXE III : LISTE DES PUBLICATIONS DE L'AUTEUR

- Weicheng Wu, Marie-Françoise Courel and Jeannine Le Rhun, Application of Remote Sensing to the Urban Expansion Analysis for Nouakchott, Mauritania, *Geocarto International*, Vol.18, No.1, p. 17-24, 2003.
- Weicheng Wu, Wenfeng Zhang, Present land use and cover patterns and their potential development in North Ningxia, China, *Journal of Geographical Sciences*, Vol. 13, No.1, p.54-62, 2003.
- Weicheng Wu, Land use and cover changes in the critical areas in northwestern China, In: *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing 2003*, SPIE Vol. 5232, Paper No. 5232-27, p.245-256, Barcelona, Spain, Sept. 8-12, 2003.
- Weicheng Wu, Evaluation of land use and cover changes in North Shaanxi, China, *Photo Interpretation*, Vol.39, No.2, p.15-29, plates p.35-45, 2003.
- Weicheng Wu, Marie-Françoise Courel and Jeannine Le Rhun, Coastal geomorphological change monitoring by remote sensing techniques in Nouakchott, Mauritania, *Proceedings of the 9th International Symposium on Remote Sensing*, Vol. 4886, p. 667-679, Agia, Pelagia, Crete, Greece, Sept. 22-27, 2002.
- Weicheng Wu, Design of a dynamic monitoring system of land use and cover change for the critical areas in Northwest China, presented in the Final workshop of the Sino-Belgian cooperation project, Beijing, China, June 3-5, 2002.
- Weicheng Wu, Eric Lambin and Marie-Françoise Courel, Land use and cover change detection and modeling in North Ningxia, China, In: *Proceedings of Map Asia 2002*, Bangkok, Thailand, Aug.7-9, 2002.
<http://www.gisdevelopment.net/application/environment/overview/envo0008.htm>
- Weicheng Wu, Eric F. Lambin, Land cover change dynamics in Yinchuan Plain, North Ningxia, an abstract for the *International Conference of LUCCD*, Beijing, China, Aug., 2001.
- Weicheng Wu, The prospects of the tidal energy development in the Pacific ocean countries, *Proceedings of the International Digital Earth Conference*, Beijing, Nov., 1999.
<http://www.digitalearth.net.cn/readingroom/Class-3/Weicheng%20Wu.doc>
- Weicheng Wu, Discussions on the Species of Uranium and its Migration and Precipitation Mechanism in the Tectono-hydrothermal Solutions from a View of Thermo-dynamics (in Chinese with English abstract), *Uranium Geology*, Atomic Energy Press, Vol.12, No.5, 1996.
Note: This article was awarded Excellent Paper in the 3rd Academic Conference of the Young Geologists in Jiangxi Province, Dec., 1994.
- Lihua Le, Weicheng Wu, Dissipative Structure in Metallogenetic System, taking uranium gathering processes for an example, *Proceedings of the 10th National Conference on Non-equilibrium Statistic Physics*, Xi'an, China, Oct., 1996.

- Weicheng Wu, Zili Kang, Tectono-Geochemistry of the Interlayer Faults and their Uranium Ore Metallogenesis, *Geotectonica et Metallogenia*, Vol.20, No.1-2, 1996, for the 30th IGC, Beijing, Aug., 1996.
- Zili Kang, Weicheng Wu, Metallogenic Regularity of Uranium Ore Deposits in Southeast China, *Geotectonica et Metallogenia*, Vol.20, No.1-2, 1996, Dedicated to the 30th IGC, Beijing, Aug., 1996.
- Weicheng Wu, Tectonogeochemistry of Tsukiyoshi Fault — a case study of nuclide migration in Tono Uranium Deposit, Tono, Japan, Research Report for PNC, Oct. 1995.
- Weicheng Wu, Zili Kang, Early Precambrian Continental Crust Basement And Its Compositional Features in South China (in Chinese with English abstract), *Uranium Geology*, Atomic Energy Press. Vol.11, No.6, 1995.
Note: This article was awarded First Prize by Jiangxi Geological Society, May, 1996.
- Weicheng Wu, Guigeng Ai, Risk Assessment of Natural Disasters in the Course of Selection of Nuclear Waste Disposal (in Chinese with English abstract), *Journal of East China Geological Institute*, Vol.18, No.3, 1995.
- Weicheng Wu, Zili Kang, Tectono-Geochemical Features of the Interlayer Fracture, Controlling and Mineralizing Processes of Uranium Deposits, *Collection of the 4th Tectono-Geochemical Symposium of China*, Guizhou Science and Technology Publishing House, Oct., 1995.
- Zili Kang, Weicheng Wu, Minqiang Zhu, The Division and Characteristics of the Uranium Metallogenetic Belts in Southeast Geodepression (Diwa) Region of China, *Geotectonica et Metallogenia*, Vol.18, No.3-4, 1994, Detail Abstract for the 9th IAGOD Symposium, Beijing, China, Aug.1994.
- Zili Kang, Haiying Liu, Weicheng Wu, On the Tectono-magmatic Activation and Formation of Polygenetic Compound Uranium Ore Deposits in South China, *Geotectonica et Metallogenia*, Vol.18, No.3-4, 1994, Abstract for the 9th IAGOD Symposium, Beijing, China, Aug., 1994.
- Zili Kang, Jinrui Shen, Weicheng Wu and Xinyi Yu, Rifts and Uranium Mineralization in Hunan-Guangxi and their Adjacent Areas, *Mineral Resources and Geology*, Vol.8, No.2, 1994.
Note: This article was awarded First Prize by Jiangxi Geological Society in 1996.
- Weicheng Wu, Yanhui Ding, Jinyu Kang, Application of the Stable Isotopic Elements in the Environmental Geoscience (in Chinese), *Progress in Isotopic Hydrogeology in China*, Published by Tianjin University Press, Sep.9, 1993.
- Weicheng Wu, Geological Characteristics of the Epithermal Gold Deposits in Chile (in Chinese), *Geology and Technology of Gold*, Vol.12, No. 6, 1992.
- Weicheng Wu, The minerogenetic Characteristics of the Epithermal Gold Deposits in the Circum-pacific Minerogenic Belt during the Diwa Developing Stage (in Chinese), *Geotectonica et Metallogenia*, Science Press, Vol.16, No.2, 1992.
- Weicheng Wu, Tectonic Rotation Model along its Vertical Axis (in Chinese), *Journal of East China Geological Institute*, Vol.14, No. 4, 1991.
- Zili Kang, Weicheng Wu, Minqiang Zhu, The Tectono-geochemical Characteristics of Xinzi Fracture Zone (in Chinese with English abstract), *Uranium Geology*, Atomic Energy Press, Vol.7, No.3, 1991.

LISTE DES FIGURES EN ANGLAIS

CHAPTER I

Figure I-1: Distribution of the arid zones	p. 4
Figure I-2: Dust storm in east China	p. 9
Figure I-3: Dust storm over the Atlantic Ocean from the Sahara	p. 10
Figure I-4: Location of the region of Nouakchott	p. 13
Figure I-5: Location of the study areas and the major meteorological stations in northwestern China	p. 15
Figure I-6: Evolution of the climatic parameters in the recent 40 years in Nouakchott	p. 18
Figure I-7: Climate evolution in northwest China — annual rainfall fluctuation	p. 19
Figure I-8: Climate evolution in northwest China — annual mean temperature change	p. 20

CHAPTER II

Figure II-1: Atmospheric windows	p. 28
Figure II-2: Spectral reflectance characteristics of common earth materials in the visible bands	p. 29
Figure II-3: Atmospheric effect on remote sensing	p. 32
Figure II-4: Strong interband correlation in the landsat TM and ETM + images	p. 41
Figure II-5: Crop trajectories in Landsat MSS space, having the appearance of a Tasseled Cap	p. 43
Figure II-6: Approximate locations of important scene classes in TM Tasseled Cap space	p. 44
Figure II-7: Spectral development of cultivated crop in TM Tasseled Cap space	p. 45
Figure II-8: Thresholding to determine the change pixels	p. 48
Figure II-9: Change vector analysis	p. 50
Figure II-10: An example of GIS and its analysis procedure	p. 53
Figure II-11: Analysis on the human-environment interaction by regression models	p. 61
Figure II-12: Methodology adopted in the researches	p. 67

CHAPTER III

Figure III-1: Location of the study area — Nouakchott, Mauritania in northwest Africa	p. 73
Figure III-2: Urban extension map of Nouakchott from 1989-1999	p. 77
Figure III-3: Relationships between the urban expansion and population growth in Nouakchott	p. 80
Figure III-4: Zones exposed to flooding risk between the coastal sandbar and Nouakchott	p. 83
Figure III-5: Coastal changes around the Port de l'Amitié in Nouakchott from 1989 to 2001	p. 88
Figure III-6: Propagation of the waves observed in the images SPOT XS dated Nov.3, 1989	p. 91
Figure III-7: Wave direction in the SPOT PAN image 1995 (a) and air photos (b, c)	p. 92
Figure III-8: Potential coastline evolution around the harbour in the near future	p. 96

CHAPTER IV

Figure IV-1: Location, administrative and geomorphologic units of the study area — North Ningxia in China	p. 103
Figure IV-2: Procedure chart followed in this case study	p. 104
Figure IV-3: Histograms of the Tasseled Cap features after atmospheric correction and normalised to the range 0-255	p.107
Figure IV-4: Thresholding to determine the change and no-change	p.108
Figure IV-5: General change map derived from thresholding on ΔB	p.109
Figure IV-6: Land use change around the Ephedra Farm and Vineyard	p.110
Figure IV-7: Land use change around the Nanliang Farm	p.111
Figure IV-8: Land use change in the salinsed area in Pingluo, Yinchuan Plain	p.113
Figure IV-9: Classification of the salinsed zones using TM bands 147 dated 1987 and 1999	p.113
Figure IV-10: Land use change near Shanghaimiao in west Mu Us	p.114
Figure IV-11: Land use change along the coal mining belts in the Helan Mts	p.115
Figure IV-12: Urban extension around the old district of Yinchuan City	p.116
Figure IV-13: Supervised classification of the old urban district and its suburb areas	p.117
Figure IV-14: County-level land use and cover changes in North Ningxia from 1987 to 1999	p.119
Figure IV-15: Percentage of each change type with respect to the total change	p.120
Figure IV-16: County-level land use change graphs	p.121
Figure IV-17: Zoom showing the change of the Yellow River course	p.122
Figure IV-18: Present land use and cover pattern in North Ningxia	p.127
Figure IV-19: Actual land cover composition in North Ningxia	p.129
Figure IV-20: Population and labour force changes in North Ningxia from 1988 to 1999	p.132
Figure IV-21: Difference between the detected farmland extension and increase in the published total sown and food areas	p.133
Figure IV-22: Relationships between the GDP growth and urban population growth (a) and industrial output increase (b) in North Ningxia from 1988 to 1999	p.134
Figure IV-23: Precipitation fluctuation in the Yinchuan Plain	p.135
Figure IV-24: Decrease in annual precipitation and increase in annual evaporation from 1988 to 1999 in North Ningxia	p.136
Figure IV-25: Relationships between the environmental changes and their socio-economic driving forces	p.138
Figure IV-26: Spatial determinants of the actual environmental components in North Ningxia	p.140
Figure IV-27: Monthly rainfall in the region of Yinchuan in 1987 and 1999	p.144
Figure IV-28: A view of the monitoring system established for North Ningxia	p.146

CHAPTER V

Figure V-1: Location, administrative and geomorphologic units of the study area — North Shaanxi in China	p.152
Figure V-2: Methodology adopted in the study	p.153
Figure V-3: Thresholding to determine the positive and negative changes	p.156
Figure V-4: Land use and cover changes in North Shaanxi /Mu Us from 1986 to 2000	p.158
Figure V-5: Percentage of each change type to the total change	p.159
Figure V-6: Zoom 1 showing the vegetation degradation in the Loess Plateau	p.161
Figure V-7: Zoom 2 revealing the surface decrease of water-bodies in the Mu Us Sandy Land	p.162
Figure V-8: Zoom 3 illustrating the conversion of the Yellow River course into land in the past 14 years	p.163
Figure V-9: Actual land use and cover patterns in North Shaanxi/Mu Us	p.165
Figure V-10: Present environmental composition in North Shaanxi/Mu Us	p.166
Figure V-11: Landform types in the Loess Plateau in North Shaanxi	p.170
Figure V-12: (a) Human endeavours to control soil loss and (b) exploitation of the natural resources in the Mu Us Sandy Land	p.174

LISTE DES TABLEAUX EN ANGLAIS

CHAPTER II:

Table 2-1: Spectral characteristics of Landsat MSS, TM, ETM+ and SPOT images	p. 30
Table 2-2: Multiplication factors to predict haze values for Landsat TM bands	p. 34
Table 2-3: Tasseled Cap transformation matrix for Landsat MSS	p. 43
Table 2-4: TM Tasseled Cap transformation coefficients	p. 45

CHAPTER III:

Table 3-1: Satellite images and their corresponding tidal height data	p. 75
Table 3-2: Urban extension in Nouakchott from 1989 to 1999	p. 78
Table 3-3: Urban surface corresponding to the population growth	p. 79
Table 3-4: Relative moisture division of the coastal depression in Nouakchott by unsupervised classification	p. 82
Table 3-5: Littoral changes around the harbour — Port de l'Amitié	p. 89
Table 3-6: Erosion at the different observation points on the down-drift side of the harbour	p. 94
Table 3-7: Accretion on the up-drift side of the harbour	p. 95

CHAPTER IV:

Table 4-1: Classification result of the salinised zone in Pingluo County	p.114
Table 4-2: Four clusters derived from a supervised classification on the old urban district	p.119
Table 4-3: County-level land use and cover change data from 1987 to 1999	p.120
Table 4-4: Actual land use and cover patterns data in North Ningxia	p.128
Table 4-5: Major land use and cover patterns in North Ningxia	p.129
Table 4-6: Development in socio-economic elements from 1988 to 1999 in North Ningxia	p.132
Table 4-7: Population indexes in North Ningxia in 1999	p.133
Table 4-8: GDP composition and its growth from 1988 to 1999	p.135
Table 4-9: Meteorological changes in North Ningxia between 1999 and 1988	p.136
Table 4-10: Relationships between human activities and environmental changes	p.137
Table 4-11: County-level socio-economic and meteorological data in 1999	p.139
Table 4-12: Spatial determinants of the actual environmental components	p.139

CHAPTER V:

Table 5-1: Parameters for thresholding test	p.157
---	-------

Table 5-2: County-level land use and cover change data between 2000 and 1986	p.159
Table 5-3: Present land use and cover data in county-level	p.164
Table 5-4: Evolution in the socio-economic elements from 1984 to 2000	p.167
Table 5-5: Land use and cover change driving forces in North shaanxi/Mu Us	p.167
Table 5-6: Parameters used in the vegetation degradation and soil erosion linking analysis	p.171

ARID ENVIRONMENTAL DYNAMIC MONITORING BY GEOMATICS

— Taking the region of Nouakchott in Mauritania, North Ningxia and North Shaanxi in northwestern China for examples

ABSTRACT

This dissertation is focused on a research on the arid environmental change monitoring and modelling with application of geoinformatics (e.g., remote sensing, GIS, GPS) and geostatistic techniques taking the region of Nouakchott in Mauritania, North Ningxia and North Shaanxi in northwest China for examples. The objectives of the study were to monitor the urban and littoral environmental changes in Nouakchott, rural environment evolution in the two critical areas in northwest China in the past decades, to model the human-environment relationships and to understand the causes of the changes observed. Multi-temporal SPOT HRV images (for Nouakchott), Landsat TM and ETM+ images, county-level socio-economic data and meteorological data (for the sites in Northwest China) were used for these tasks. The methods and procedures adopted in this work were image registration, atmospheric correction, tasseled cap transformation, indicator differencing, change mapping and multivariate regression modelling.

The principal results from northwest China show that: not “advancing desert” was observed, however, signs of serious land degradation, e.g., vegetation degradation and soil salinisation, have apparently taken place due to cultivation practices, land reclamation and grazing. Some of these changes can be traced back to land use policies. Farmland extension is a remarkable rural environmental change in these sites and is associated with the increase in agricultural output. Taking up a small percentage of the total change, the urban extension is related to about 90% of the GDP growth and driven directly by the urban population and their socio-economic activities. Some river courses have been narrowing, owing partly to climate variability but mainly to the overuse of water in agriculture.

In Nouakchott, the urban has been extending outwards at a rate of 5.3% (or 3.6km²/yr) in response to the population growth. The rapid expansion in a narrow belt between the desert trail and ocean is *a heavy burden charged to an already overburdened infertile land*. The risk of seawater inundation in the urban and suburb area has been graded into three zones by spatial analysis. As well as the urban area, the littoral environment has also significantly evolved due to the construction of the Port de l’Amitié in 1987, the north beach has accreted at a rate of 0.08km²/yr and will reach its maximum limit in 13.4 ± 0.5 yr (2014-2015). The littoral drift will thereupon largely fill into the pool and the harbour will gradually reach the end of service if no measure is taken. The south beach has been in erosion at a rate of 0.12km²/yr with a maximum retreat of 362m in the period 1989-2001 and a potential of 322m is estimated for the period 2001-2011 due to the modifications of the wave direction and actions of the alongshore currents at a velocity of around 0.52-0.66m/s.

In brief, environmental change is deeply associated with human activities. Only having understood well such relationships and predicted the evolution tendency, can we make policies for better land use and environmental management.

Discipline : Geography **Speciality:** Geoinformatics

Keywords: Arid environment, geomatics, change monitoring and modelling, human-environmental relationship.

APPLICATION DE LA GEOMATIQUE AU SUIVI DE LA DYNAMIQUE ENVIRONNEMENTALE EN ZONES ARIDES

— Exemple de la région de Nouakchott en Mauritanie, du Ningxia nord et du Shaanxi nord en Chine du nord-ouest

RESUME

Le sujet de cette thèse est centré sur le suivi et la modélisation des changements environnementaux en zones arides en utilisant les outils de géomatique (par exemple, télédétection, GIS et GPS) et des techniques géostatistiques. La méthode est appliquée sur les régions de Nouakchott en Mauritanie, du Ningxia nord et du Shaanxi nord en Chine. Les objectifs de l'étude étaient de surveiller les changements environnementaux urbains et littoraux à Nouakchott, l'évolution rurale de l'environnement dans les deux sites pilotes en Chine du nord-ouest au cours des décennies passées, de modéliser les rapports homme-environnement et de comprendre les causes des changements observés. Le modèle intègre des images multi-temporelles de SPOT HRV (pour Nouakchott), de Landsat TM et ETM+, les données socio-économiques au niveau départemental (*county*) et les données météorologiques (pour les sites en Chine du nord-ouest). Les méthodes et les procédures adoptées dans ces travaux étaient l'enregistrement d'image, la correction atmosphérique, la transformation de chapeau à cône, la soustraction d'indicateur, la cartographie des changements et la modélisation par la régression multivariée.

Les principaux résultats en Chine montrent que l'invasion du désert n'a pas été observée; cependant, les signes d'une dégradation sérieuse du sol marquée par la dégradation de la végétation et la salinisation du sol, ont apparemment eu lieu en raison des pratiques culturelles intensives, de la mise en valeur des terrains pour l'agriculture et du surpâturage. Certains de ces changements peuvent être imputés aux politiques d'occupation du sol. L'extension des surfaces vivrières est un changement environnemental remarquable dans la zone rurale et elle est associée à l'augmentation du rendement agricole; Concernant un espace plus restreint, l'augmentation urbaine est liée à près de 90% de la croissance du PIB et résulte directement de l'augmentation de la population urbaine et ses activités socio-économiques. Le rétrécissement de certains fleuves est dû en partie à la variabilité du climat, mais aussi principalement à une irrigation excessive de l'agriculture.

A Nouakchott, la zone urbaine s'est étendue de 40% (à taux de 5.3% ou de 3.6 km²/an) en réponse à la croissance de population. L'expansion rapide dans une ceinture étroite située entre le désert et l'océan est un fardeau lourd pour une terre stérile déjà surchargée. Les risques d'inondation par l'eau de mer dans le secteur urbain ont été déterminés dans trois zones types par analyse spatiale. L'environnement littoral également a sensiblement évolué en raison de la construction du Port de l'Amitié en 1987 : la plage au nord a augmenté de 0.92km² (à un taux de 0.08 km²/an) et atteindra sa limite maximum en 13.4 ± 0.5an (estimation 2014-2015). La dérive littorale versera en grande partie dans la piscine et le port sera graduellement abandonné si aucune mesure n'est prise. La plage au sud a été érodée de 1.34km² (à un taux de 0.12km²/an) avec une retraite maximum de 362 m pendant la période 1989-2001 et un potentiel de 322 m est estimé pour la période 2001-2011, dû aux modifications de la direction des vagues et des actions des courants littoraux à une vitesse d'environ de 0.52-0.66 m/s.

En conclusion, le changement environnemental est profondément associé aux activités humaines. C'est seulement en comprenant parfaitement les rapports homme-environnement et en prévoyant les tendances évolutives, que nous pourrions définir les politiques pour une meilleure occupation du sol et gestion environnementale.

Discipline : Géographie **Option :** Géomatique

Mots clés : Environnement aride, géomatique, suivi et modélisation des changements, rapports homme-environnement.

Laboratoire d'accueil: PRODIG-UMR8586/CNRS

191 Rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France

Tél. : 01 44 32 14 81 Fax : 01 43 29 63 83

E-mail : prodig@univ-paris1.fr

