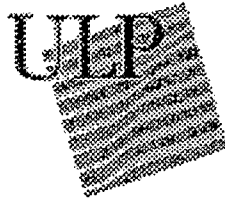




ENGEES
Ecole Nationale du Génie de
l'Eau et de l'Environnement
de Strasbourg

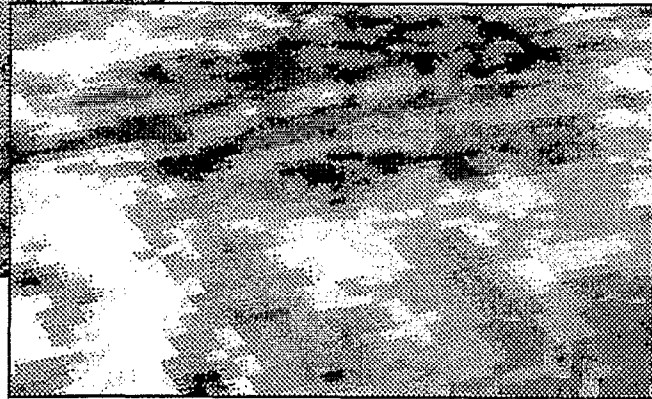


Université Louis Pasteur
U.F.R. de Géographie
Strasbourg



Institut Français de
Recherches Scientifiques
pour la Coopération en
Développement
Laboratoire d'Hydrologie
Montpellier

**INVENTAIRE DES MARES ET DES RAVINES PAR
TÉLÉDÉTECTION POUR L'ÉLABORATION D'UN MODÈLE
HYDROLOGIQUE EN ZONE SAHÉLIENNE
(Kori de Dantiandou, Niger)**



Mémoire de troisième année
Mémoire de D.E.A. Systèmes Spatiaux et Environnement



Présenté par Sylvain COSTE

le 25 septembre 1998

MH 73420

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: A x 16 224 Ex:

REMERCIEMENTS

Mon stage s'est déroulé dans d'excellentes conditions, matérielles bien sûr, mais surtout humaines. Je le dois à de nombreuses personnes dont seules quelques unes seront nommées dans cette page. Que les autres me pardonnent.

A tout chef, tout honneur, Christophe Peugeot fut un maître de stage émérite, formé à bonne école. Il m'a énormément soutenu et encouragé, mais je lui suis surtout reconnaissant de m'avoir proposé ce travail.

Puisque Christophe est le « C » d'ABC, il me faut donc remercier le « A », Ana Maïa, et le « B », Bernard Cappelaere. L'une a donné la vie et l'autre a « killé stage2 » de nombreuses fois, mais tous deux ont rendu mon séjour à l'ORSTOM agréable et instructif. Pour finir le tour de l'O.R.2., je remercie Christian Leduc de ne pas avoir pris de vacances en ce mois d'août bien désert, même si c'est sans doute le dernier de ses mérites.

Ce travail doit beaucoup à Christian Puech, mais s'il est beaucoup cité dans le corps du mémoire, il possède aussi une grande place dans cette page, pour sa disponibilité, sa bonne humeur, et ses conseils forcément avisés. J'aimerais aussi remercier Bernard Mougenot, qui a eu bien de la patience, et Maud Loireau, que j'ai dérangée alors qu'elle finit sa thèse, pour les images satellites, les conseils et les mails sympathiques.

Puisque j'en suis aux correspondants électroniques, mes contacts par mails avec Steve Clamons, du « GRASS Research Group », à l'Université de Baylor (Etats Unis), Michel Mietton et Michel Würtz, qui ont suivi mon stage depuis Strasbourg, ont toujours été conviviaux. Je les en remercie.

Non moins conviviale a été l'ambiance de travail de la salle des stagiaires. Merci donc à Sarra, Cathy, Héry, Mathilde, Mayu, Matthew, Stéphane, Laurent et Philippe, le tout dans le désordre, les deux numéros complémentaires étant ibériques : David et Wenceslao.

Enfin, j'aurais aimé remercier nominativement chacune des personnes du laboratoire d'hydrologie, mais la liste serait trop longue. J'aurais trop peur d'en oublier un seul, alors que je crois les avoir tous dérangés pour des motifs divers, et avoir toujours été bien reçu.

Que tous ces noms ne fassent pas croire à ma famille et à mes amis de longue date que je les oublie et que j'oublie leur soutien pendant ces six mois.

Et...

Merci Annabelle.

RÉSUMÉ

INVENTAIRE DES MARES ET DES RAVINES PAR TÉLÉDÉTECTION POUR L'ÉLABORATION D'UN MODÈLE HYDROLOGIQUE EN ZONE SAHÉLIENNE (KORI DE DANTIANDOU, NIGER)

L'ORSTOM, via le programme CATCH (Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique), s'intéresse aux impacts climatiques et environnementaux sur le cycle hydrologique en Afrique de l'Ouest. Pour l'axe sahélien, au Niger occidental, la modélisation hydrologique d'un bassin-versant pilote de 2 km² est bien avancée. L'objectif est de coupler cette modélisation au fonctionnement de la nappe, puis à des scénarios de précipitations sur une zone cible de 1 500 km².

L'extension spatiale du modèle hydrologique passe donc par le découpage du paysage en unités hydrologiques. Celles-ci sont des petits bassins endoréiques, où le ruissellement se concentre dans des ravines avant de former des mares temporaires dans des dépressions fermées.

La première approche du problème, que relate ce mémoire, consiste en l'inventaire des mares et des ravines principales.

L'inventaire des mares a été effectué sur la base d'images SPOT-XS, au moyen du néo-canal NDVI (indice de végétation normalisé). Cette extraction a été réalisée sur trois scènes de 1992, puis dans un deuxième temps sur une scène de 1996. L'intervention du contexte paysager et d'études cas par cas des zones litigieuses ont permis de retenir 191 mares. Les capacités du Système d'Informations Géographiques GRASS, ainsi que le recours à la carte topographique ont permis la caractérisation de ces mares.

Cet inventaire est validé sur une petite zone où un inventaire sur le terrain avait été effectué. Contrairement aux mares de plateau, les mares situées dans l'ancien réseau hydrographique dégradé, et celles situées sur les versants ont été particulièrement bien inventoriées. Il s'agit des deux types de mares les plus importants, en termes de surface, mais aussi en termes de recharge de la nappe.

L'extraction des ravines n'a pu qu'être ébauchée, mais des premiers tests, et surtout l'acquisition de nouvelles données (couvertures aériennes) sont très prometteurs pour la suite du travail.

ABSTRACT

AN INVENTORY OF PONDS AND GULLIES BY REMOTE SENSING FOR THE DEVELOPMENT OF A HYDROLOGICAL MODEL IN THE SAHEL (KORI DE DANTIANDOU, NIGER)

The aim of the ORSTOM programme CATCH (Coupling of Tropical Atmosphere and Hydrological Cycle) is the identification of climatic and environmental impacts on the hydrological cycle in West Africa. Concerning one axis of CATCH in western Niger, significant work has been done for hydraulic modelling at small scale (2 km² catchment). Further effort will concern the modelling of aquifer recharge by precipitation at a larger scale (catchment of 1,500 km²).

Large scale modelling requires that the countryside is divided into uniform hydrological units, in particular small endoreic watersheds must be identified: Surface runoff is channelled in gullies into temporary ponds in closed depressions.

This document states the initial aspects of the model extension: an inventory of ponds and gullies.

The pond inventory was performed on NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) maps, built from SPOT-XS images. Firstly, 3 images from 1992 were used for the identification of the ponds. Where these images were unsatisfactory for the identification, an image from 1996 was used in addition. Analysis of the topography was required for the validation and selection of 191 ponds. The identification of the ponds characteristics was undertaken using the Geographical Information System abilities of GRASS and topographic maps.

This inventory was validated on a small area where ground truth data was available. This validation illustrated that although the remote sensing was unsuitable for the identification of ponds on the plateaux, it was accurate for the ponds in the lying fossil drainage network and for the ponds located on the slopes. These two pond types are more important due to both the size of their surface area and their role in watertable recharge.

The identification of gullies initiated in this work is still in the initial stages. First tests and new aerial covers are very promising.

SOMMAIRE

Remerciements	i
RÉSUMÉ	ii
ABSTRACT	iii
SOMMAIRE	iv
Liste des figures et des tableaux	vii
INTRODUCTION	1

CHAPITRE 1 : Contextes et objectifs

1. LA ZONE D'ÉTUDE : EN PLEIN DOMAINE SAHÉLIEN.....	3
1.1. Localisation géographique de l'étude.....	3
1.2. Climat	5
1.3. Le paysage organisé en une toposéquence caractéristique.....	8
1.4. Hydrologie et hydrogéologie.....	9
2. LE PROGRAMME CATCH	11
2.1. Problématique générale.....	11
2.2. L'axe « Variabilité de la ressource en eau en zone sahélienne ».....	12
3. LES OBJECTIFS DU STAGE.....	14
3.1. A long terme.....	14
3.2. Initialisation.....	14

CHAPITRE 2 : Synthèse bibliographique

1. TÉLÉDÉTECTION ET MODÈLES HYDROLOGIQUES	18
1.1. Interfaces.....	18
1.2. Exploitations actuelles de la télédétection en hydrologie.....	21
1.3. Perspectives.....	21
2. L'IDENTIFICATION DES SURFACES EN EAUX.....	23
2.1. Champ d'application des micro-ondes	23
2.2. L'eau boueuse des mares sahéliennes	23
2.3. D'autres aides possibles.....	25
3. LE RÉSEAU DE RAVINES.....	27
3.1. Diverses approches	27
3.2. Les opérateurs morphologiques	29

CHAPITRE 3 : Choix des données et de la méthode

1. CHOIX DES DONNÉES	34
1.1. Quel support ?.....	34
1.2. Quel capteur ?	37
1.3. Quelles dates ?.....	38
1.4. Procédure de rectification.....	40

2. CHOIX DE LA MÉTHODE.....	43
2.1. Les méthodes « classiques »	43
2.2. Un problème simple en théorie	44
2.3. Les premières difficultés pratiques	47

CHAPITRE 4 : Inventaire et caractérisation des mares

1. APPLICATION DE LA MÉTHODE.....	50
1.1. Détermination du seuil	50
1.2. Etapes de l'extraction.....	54
1.3. L'obtention des dernières mares	57
1.4. Synthèse.....	60
2. CARACTÉRISATION DES MARES	61
2.1. Les paramètres calculés	61
2.2. Les paramètres manuels.....	63

CHAPITRE 5 : Résultats, validation, discussion

1. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET VALIDATION	66
1.1. Différentes sorties.....	66
1.2. Validation.....	68
2. DISCUSSION	74
2.1. Représentativité des paramètres calculés	74
2.2. Les hypothèses de l'hétérogénéité de la distribution.....	76

CHAPITRE 6 : Ravines et perspectives

1. L'ÉBAUCHE DE DÉTECTION DES RAVINES.....	80
1.1. Pertinence de la carte topographique.....	80
1.2. Les premiers tests de complémentarité des informations	81
1.3. Recommandations.....	83
2. PERSPECTIVES	83
2.1. La campagne de terrain d'août 1998.....	83
2.2. Deux étapes.....	84

CONCLUSION.....	87
-----------------	----

BIBLIOGRAPHIE	89
---------------------	----

ANNEXES	93
---------------	----

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

COUVERTURE : Parallèle entre une photographie prise d'avion par J.C.DESCONNETS et une fausse vue en 3 dimensions de la composition colorée SPOT-XS du 5 octobre 1992.

Chapitre 1 : Contextes et objectifs

<u>Figure 1.1.</u> :	Localisation géographique de l'étude.....	p.4
<u>Figure 1.2.</u> :	Pluie moyenne annuelle (1951-1989) sur la région sahélienne avec la position du degré-carré (DESCONNETS, 1994)	p.6
<u>Figure 1.3.</u> :	Bilan climatique.....	p.7
<u>Figure 1.4.</u> :	Schéma représentatif de la toposéquence (COURAULT <i>et al.</i> , 1990)	p.8
<u>Figure 1.5.</u> :	Comparaison de la couverture des photographies aériennes NASA et de la zone d'étude.....	p.15

Chapitre 2 : Synthèse bibliographique

<u>Figure 2.1.</u> :	Obtention des paramètres hydrologiques à partir des images satellitaires (PUECH, 1995).	p.18
<u>Tableau 2.2.</u> :	Nombres de Melton (0,694 en réalité) en fonction du critère de seuil de surface drainée pour trois résolutions de MNT (ELSHEIKH et GUERCIO, 1997)	p.20
<u>Figure 2.3.</u> :	Construction théorique des signatures spectrales des différents corps du milieu sahélien, d'après PUECH (1994).....	p.24
<u>Figure 2.4.</u> :	Schémas de passage des objets à une grille raster.....	p.25
<u>Figure 2.5.</u> :	Principe de l'opération « fonds-de-vallée »	p.30
<u>Tableau 2.6.</u> :	Les trois procédures utilisées par DEBAINE <i>et al.</i> (1988).....	p.31
<u>Figure 2.7.</u> :	Parcelle imaginaire et schématique.....	p.32

Chapitre 3 : Choix des données et de la méthode

<u>Figure 3.1.</u> :	Comparaison des trois supports par simple visualisation	p.35
<u>Figure 3.2.</u> :	Pluies à Wakama et scènes SPOT-XS disponibles.....	p.39
<u>Figure 3.3.</u> :	Erreurs de localisation en mètres dans (noir) et hors(blanc) de la zone d'étude pour la scène du 25 septembre 1992	p.42
<u>Figure 3.4.</u> :	Diagramme XS2-XS3 de quatre catégories d'objets (scène du 25/09/92)..	p.45
<u>Figure 3.5.</u> :	Signatures radiométriques (scènes du 25/09/92)	p.46
<u>Figure 3.6.</u> :	Figure 3.4. avec un nouvel objet (scène du 25/09/92)	p.47

Chapitre 4 : Inventaire et caractérisation des mares

<u>Figure 4.1.</u> :	Construction des droites des sols nus des trois scènes.....	p.51
<u>Figure 4.2.</u> :	Exemple d'approche de la valeur-seuil du NDVI à l'aide de la palette de couleurs, région du méandre de Kollo Djogonome.....	p.52
<u>Figure 4.3.</u> :	Histogrammes de répartition du NDVI entre 0,100 et 0,120 sur les trois scènes	p.53
<u>Figure 4.4.</u> :	Extraction des pixels remplissant la condition $NDVI \leq 0,112$ sur deux scènes différentes au moins.....	p.54
<u>Tableau 4.5.</u> :	Modes d'obtention des 138 mares	p.56
<u>Figure 4.6.et 4.7.</u> :	Isohyètes des cumuls pluviométriques saisonniers (mm) aux dates des prises de vue.....	p.57
<u>Figure 4.8.</u> :	Courbes de répartition des valeurs dans le canal XS3 pour les scènes du 3 novembre 1996 et du 20 août 1992 (sur la zone d'étude).....	p.58
<u>Tableau 4.9.</u> :	Résumé de la méthode d'inventaire des mares	p.60
<u>Tableau 4.10:</u>	Exemple sur 6 mares du passage des valeurs extraites à chaque date à un indice concis.....	p.63
<u>Tableau 4.11:</u>	Répartition des mares par type	p.64

Chapitre 5 : Résultats, validation, discussion

<u>Figure 5.1. et 5.2.</u> :	Extraits des deux possibilités de cartographie des mares aux alentours de Wankama.....	p.67
<u>Tableau 5.3.</u> :	Liste des mares de Kori dont l'indice de persistance vaut 0001	p.68
<u>Figure 5.4.</u> :	Recoupements globaux des mares sur les trois supports.....	p.69
<u>Figure 5.5.</u> :	Recoupement pour les mares de Kori	p.69
<u>Figure 5.6.</u> :	Recoupement pour les mares de Versant	p.69
<u>Figure 5.7.</u> :	Recoupement pour les mares de Plateau	p.69
<u>Figure 5.8.</u> :	Surfaces moyennes et Indices de Forme moyens par type de mare	p.72
<u>Figure 5.9.</u> :	Répartition en classes de taille des mares de Kori et des mares de Plateau.	p.73
<u>Tableau 5.10:</u>	Répartition des mares en fonction du nombre de scènes où elles apparaissent	p.75
<u>Tableau 5.11:</u>	Nombre de mares présentes sur chaque scène utilisée	p.75

Chapitre 6 : Ravines et perspectives

<u>Figure 6.1.</u> :	Juxtaposition d'un extrait d'une photographie aérienne et du tracé d'une ravine extraite de la carte au 1/50 000 ^{ème} numérisée	p.81
<u>Figure 6.2.</u> :	Concordance entre le résultat du calcul de l'écart-type sur un carré de 25m de côté (en fond) et le tracé des ravines sur la carte (en bleu).....	p.82

ANNEXES : Mare de Kori, Photographie numérique prise par M.GUENGANT lors de la campagne sur le terrain fin juillet 1998.

INTRODUCTION

Au Niger occidental, une zone fait l'objet d'observations et de recherches depuis le début des années 90. Située en zone sahélienne, elle est soumise à de fortes pressions sous l'action conjuguée de l'homme et du climat.

A l'ORSTOM, l'Institut Français de Recherches Scientifiques pour le Développement en Coopération, le programme « Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique » (CATCH), vise à évaluer l'impact du climat sur le cycle hydrologique, en Afrique de l'Ouest.

L'un des axes de ce programme, « Variabilité de la ressource en eau en zone sahélienne » se concentre sur la zone nigérienne, où la connaissance du milieu commence à être importante. Cet axe s'intéresse au cycle de la ressource en eau depuis la composante climatique jusqu'à la composante hydrogéologique, sur un bassin-versant endoréique de 1 500 km².

L'hydrologie de la zone commence à être modélisée. Un bassin-versant pilote de 2 km² sert à préciser les processus en jeu et à caler la modélisation. Elle sera étendue à la zone cible de 1 500 km² dans le but de la coupler avec les précipitations et la nappe phréatique.

Le passage de la zone pilote à la zone cible pour la modélisation doit donc passer par un découpage du paysage en unités hydrologiques. La première approche de ce découpage consiste à inventorier les mares et les ravines principales.

En effet, il n'y a pas de réseau hydrographique actif, le ruissellement se concentre en ravines qui débouchent dans des dépressions fermées où se forment des mares temporaires. L'endoréisme, terme qui décrit ce phénomène, est fréquent au Sahel. Les mares et les ravines sont de plus le lieu d'une importante infiltration et les mares sont considérées comme la principale source de recharge de la nappe.

Ce mémoire expose le travail d'initialisation du découpage du paysage hydrologique dans la région considérée : l'inventaire des mares et des ravines principales. Il débute par quelques précisions sur les contextes et les objectifs de ce travail. Ensuite, une synthèse bibliographique précède l'inventaire des mares par télédétection. Cet inventaire constitue le gros du travail, il sera donc détaillé, et les résultats seront discutés. Enfin, l'extraction du tracé des ravines n'a pu aboutir que sur des tests d'une méthode qui demande à être précisée avant sa mise en application.

Ce travail s'est déroulé de mars à septembre 1998, au laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM à Montpellier.

Chapitre 1 :

Contextes et objectifs

Le stage s'inscrit dans plusieurs contextes qui ont conditionné de manière forte son déroulement. En premier lieu, la forte spécificité de la zone d'étude appelle une présentation des principaux facteurs physiques et sociaux qui la caractérisent. L'intégration à l'ORSTOM s'est faite dans le cadre d'un programme de recherches, d'une équipe, de volontés sans lesquels notre travail n'aurait pas eu de raison d'être. Il convient d'en détailler l'essentiel. Enfin, les objectifs et les grandes lignes du travail à réaliser, qui découlent naturellement du contexte, seront précisés.

1 LA ZONE D'ÉTUDE : EN PLEIN DOMAINE SAHÉLIEN

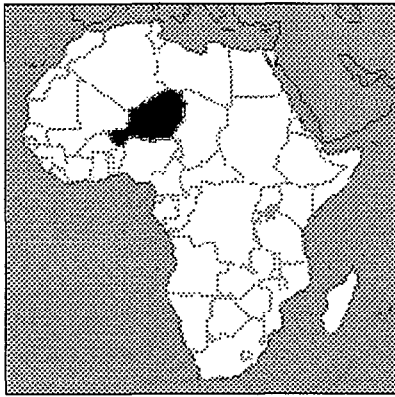
Le Sahel est la région de transition entre le Sud-Sahara et l'Afrique humide. Cette définition vague en amène plusieurs autres qui dépendent du domaine scientifique auquel on s'intéresse : météorologie, phytogéographie, hydrologie, géomorphologie... Dans tous les cas, la zone d'étude, qui se situe au Niger occidental, entre 50 et 100 km à l'est de Niamey, est comprise dans les étendues géographiques correspondant à ces définitions.

1.1 Localisation géographique de l'étude

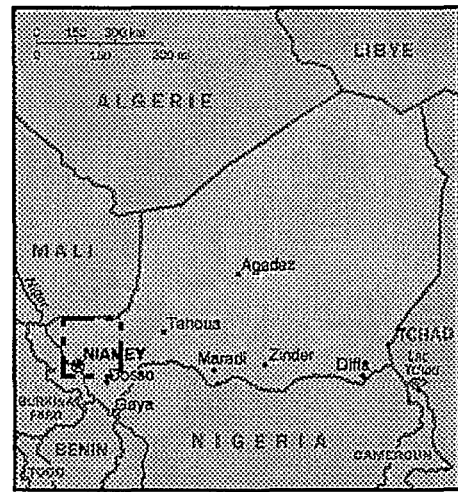
Les cartes de la figure 1.1., page suivante, situent l'étude qui se fera selon des limites géographiques, longitude et latitude, mais à l'intérieur desquelles nous considérerons plus particulièrement une unité thématique qui est le bassin versant du Kori de Dantiandou. "Kori" est le nom Zarma du lit d'un cours d'eau intermittent. Ce Kori correspond à la dégradation d'un réseau hydrographique ancien (cf. § 1.4.1).

Cette zone se situe au Niger occidental. A 50 km à l'ouest se trouve Niamey, la capitale nigérienne où coule le fleuve Niger. Elle est bordée à l'est par le Dallol Bosso, vaste vallée humide, relique d'un vaste cours d'eau qui descendait du massif de l'Air (Sahara), aux époques plus humides du Quaternaire.

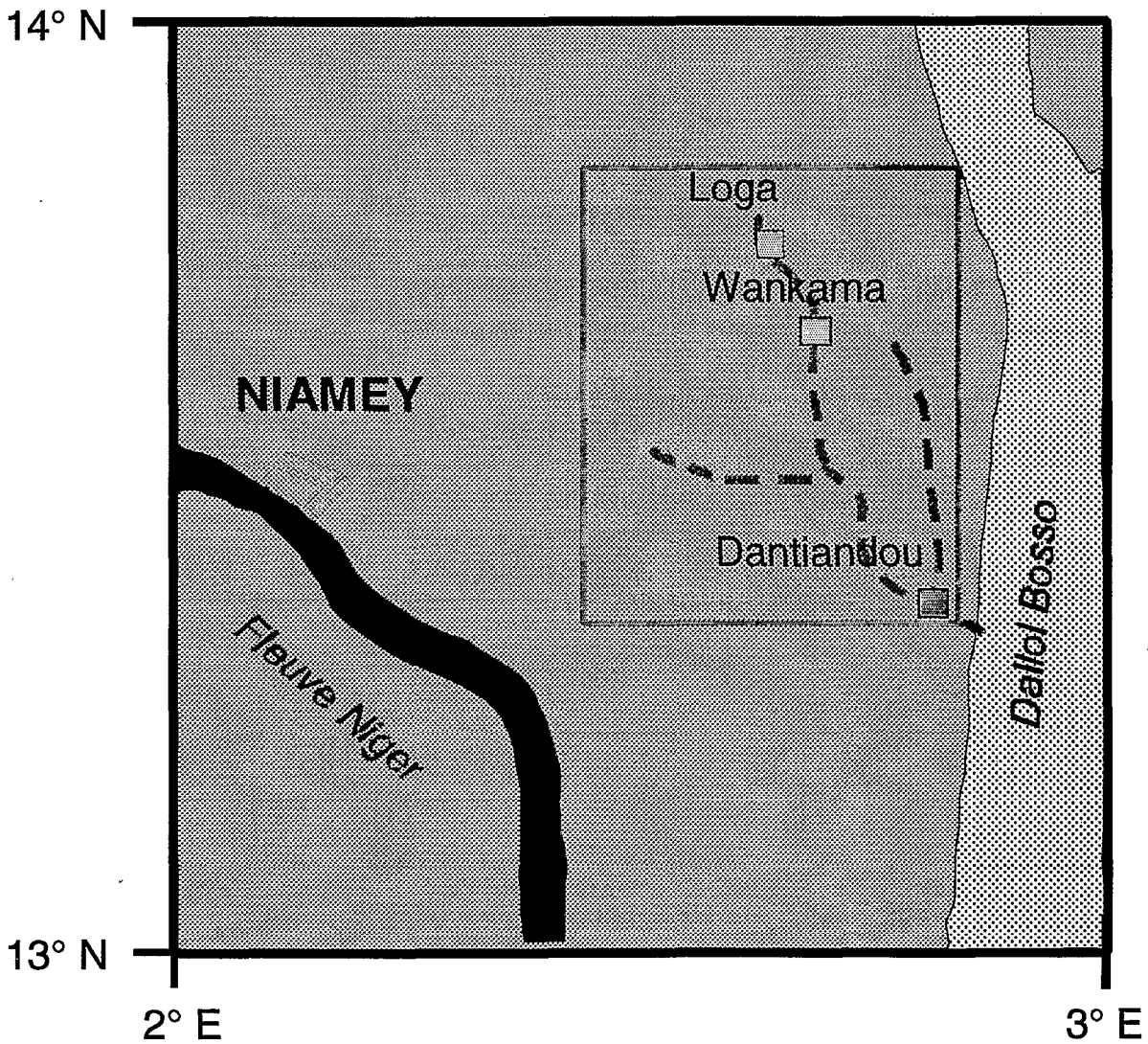
Le climat, qui doit être présenté à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, nous permettra de préciser les limites du Sahel, après quoi nous nous attacherons aux caractéristiques plus précises de la région sur laquelle porte l'étude.



Localisation du Niger sur le continent africain



Pays voisins et Principales villes du Niger



Position de la zone d'étude (en rouge) dans le cadre du degré-carré

Figure 1.1. : Localisation géographique de l'étude

1.2 Climat

1.2.1 la circulation atmosphérique

Elle gouverne les composantes majeures du climat de l'Afrique de l'Ouest selon l'affrontement de deux masses d'air. Le Front Inter-Tropical (FIT) marque en effet la limite entre une zone de convergence active très propice aux précipitations, la Zone Inter-Tropicale de Convergence (ZITC), et une zone de subsidence liée à l'anticyclone du Sahara.

Ce front connaît une forte variation nord-sud au cours de l'année. En Janvier-Février il borde le Golfe de Guinée, alors qu'il peut remonter jusqu'à 20° de latitude nord au mois d'août. Le système binaire des masses d'air entraîne donc une alternance saison sèche-saison humide, la remontée du FIT annonçant les premières pluies.

La saison des pluies peut connaître de grandes variations d'une année sur l'autre suivant la vitesse de remontée du FIT et la latitude atteinte à son paroxysme.

1.2.2 La distribution pluviométrique et sa variabilité

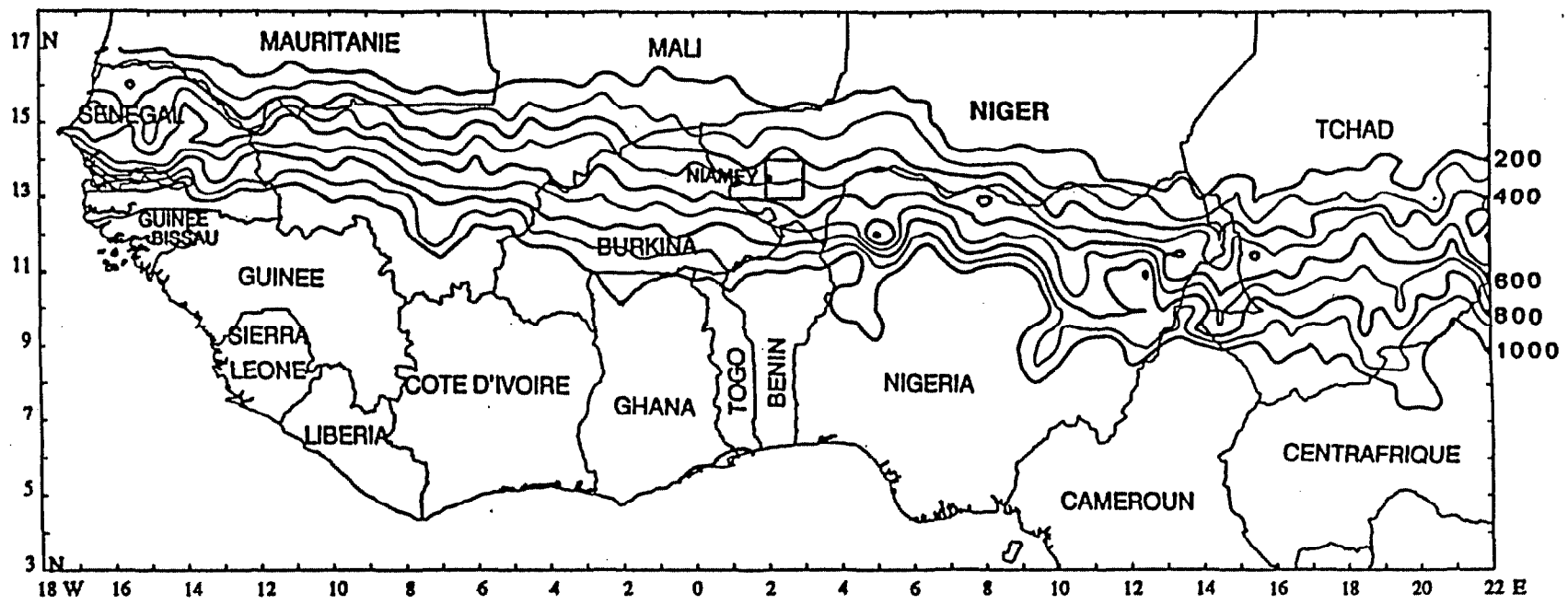
Selon ce système de masses d'air, il devient évident que la répartition pluviométrique se fera selon un gradient nord-sud. La carte de la figure 1.2. en page suivante montre bien cette répartition. Les isohyètes 200 et 700 mm forment la définition pluviométrique du Sahel. La répartition pluviométrique plus précise pour le Niger occidental se trouve en annexe 1.1.

Cette carte illustre aussi la notion de zone de transition qu'est le Sahel entre l'Afrique désertique et l'Afrique humide. Mais la répartition spatiale ne rend pas compte de la répartition temporelle. La distribution mensuelle des pluies permet en effet d'opposer une courte saison des pluies à une longue saison sèche puisque la majorité des pluies se concentre de juillet à septembre (cf. figure 1.3., § 1.2.3).

La variabilité de ces résultats se rencontre à tous les niveaux. La paléoclimatologie a pu démontrer des alternances de périodes sèches et humides, mais l'échelle humaine permet aussi de se rendre compte de ces fluctuations. L'étude des cumuls annuels au cours du vingtième siècle permet notamment de mettre en évidence un déficit important depuis les années 60.

La variabilité spatiale, et nous aurons l'occasion de l'illustrer dans cette étude, est essentiellement liée à la nature des systèmes précipitants. En effet, des "lignes de grains" sont à l'origine des pluies très intenses, très agressives, mais aussi très localisées. Elles sont suivies d'un ciel de traîne qui donne lieu à des précipitations plus longues mais moins intenses.

Les expériences EPSAT-Niger (estimation des pluies par satellite au Niger, TAUPIN *et al.*, 1993, TAUPIN et ROBIN, 1997), puis HAPEX-Sahel (cf. § 2.1.1) sont à l'origine de l'installation et de la maintenance d'un réseau très dense de pluviographes. Le dépouillement de ces données renvoie encore une fois à l'extrême variabilité des phénomènes climatiques. Ainsi, la zonation nord-sud des pluies ne peut apparaître qu'en moyennant plusieurs années, le gradient latitudinal n'apparaissant pas au pas de temps de l'année, et quelques averses peuvent déterminer la structure des cumuls saisonniers.



PRECIPITATIONS EN ANNEE MOYENNE (MM)

PERIODE 1951-1989


 degré carré d'HAPEX-Sahel

Figure 1.2. : Pluie moyenne annuelle (1951-1989) sur la région sahélienne avec la position du degré-carré (DESCONNETS, 1994)

1.2.3 Autres caractéristiques climatiques

En premier lieu, si nous avons d'abord développé la pluviométrie à cause de son importance pour mon travail, il convient de rappeler, et la figure 1.3. le montre implicitement, que l'évaporation est ici le terme le plus important du bilan hydrologique.

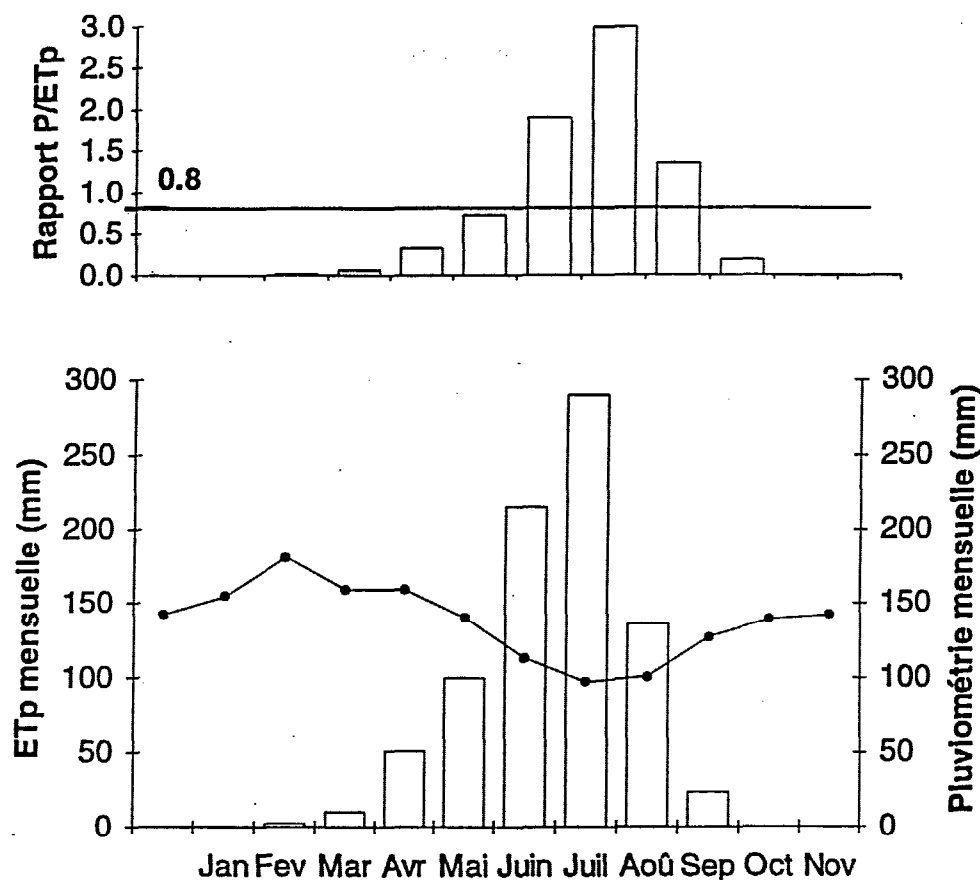


Figure 1.3. : Bilan climatique

Les données climatiques de la station de Niamey présentées à l'annexe 1.2. sont représentatives de la zone de l'étude. L'alternance saison sèche-saison humide y est à nouveau illustrée. Ainsi, la saison des pluies est caractérisée par une baisse relative de la température et de l'évaporation, mais aussi par la hausse de l'humidité relative de l'air et la baisse de l'ensoleillement. Le début de la saison sèche révèle le phénomène inverse, à ceci près que la température redescend en novembre-décembre. Le début de l'année civile est marqué par l'importance de l'harmattan (vent sec saharien), qui comporte une forte composante de transport solide. La température peut atteindre 45°C dans l'attente de la saison des pluies.

Le Sahel connaît dans son intégralité un déficit de la hauteur des précipitations par rapport à la tranche d'eau évaporée. Et ce déficit est maximal en région centrale sahélienne (Mali, Tchad et surtout Niger), dans laquelle se trouve la zone de l'étude.

1.3 Le paysage organisé en une toposéquence caractéristique

Il s'agit ici de faire un rapide exposé des différentes composantes du milieu. En préambule, rappelons, que les habitants de cette région sont les Zarma, essentiellement agriculteurs et sédentaires, et les Peuls, au contraire pasteurs et nomades.

Le Sahel en général, mais la zone d'étude en particulier, sont des régions où l'horizontalité prédomine. Dans la région étudiée, les différents éléments du paysage peuvent être décrits par une toposéquence entre les points hauts (240-220 m d'altitude), que sont les plateaux à brousse tigrée (nom tiré de l'organisation des amas de végétation sur les plateaux, semblables aux motifs d'une peau de tigre), et les points bas (200 m).

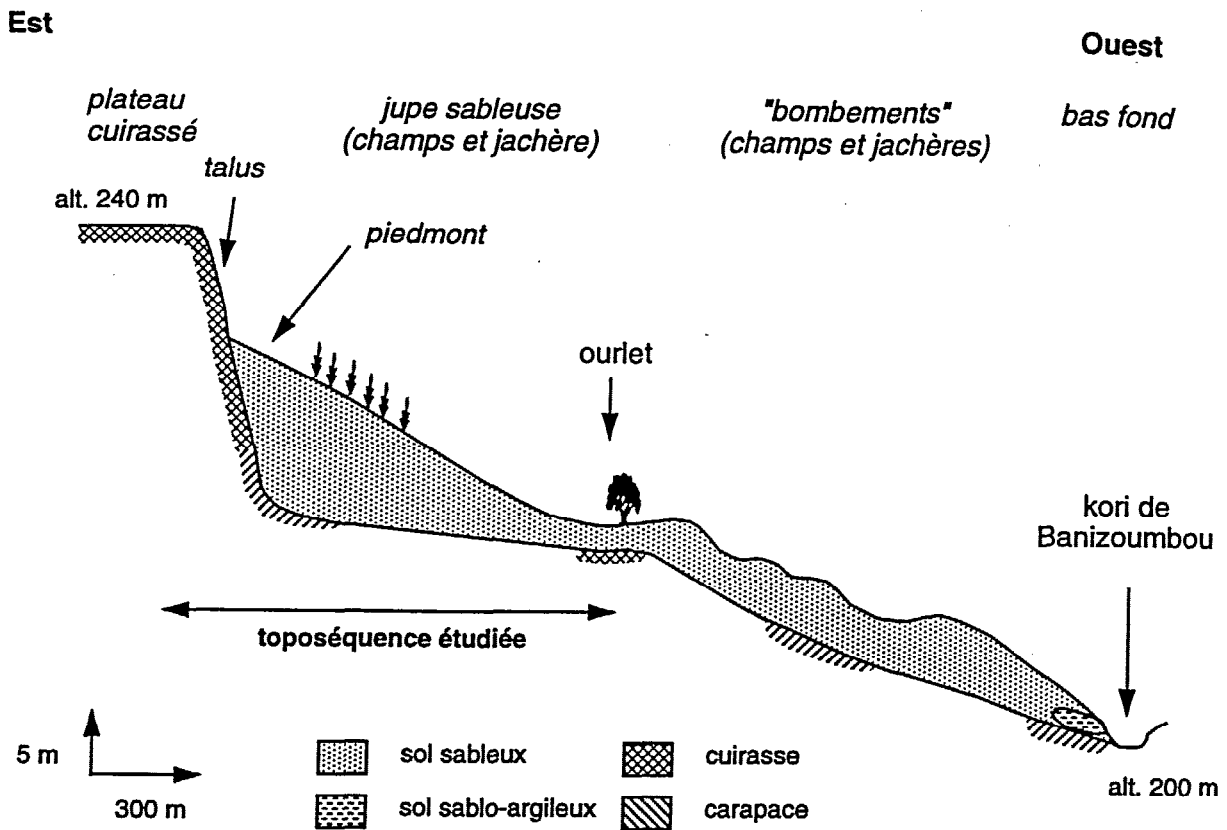


Figure 1.4. : Schéma représentatif de la toposéquence (COURAULT *et al.*, 1990)

Les plateaux sont les reliques du Continental Terminal, ensemble sédimentaire composé de grès argileux et recouvert d'une cuirasse ferrugineuse, mis en place au début de l'ère Tertiaire. Ils se caractérisent facilement en télédétection (photographies aériennes aussi bien que scènes satellites) par l'alternance de bandes de sols nus et d'arcs de végétation dense qui leur donne le nom de brousse tigrée. Les espèces ligneuses régionales composent ces bandes de végétation : *Guiera*, *Combretum*, *Acacia*, *Croton*, etc... L'activité humaine y est réduite et les cultures absentes : les troupeaux s'abreuvent aux petites mares de ces plateaux et les arbustes sont exploités pour le bois de feu.

L'entaillement de ces plateaux par les cours d'eaux pendant les périodes plus humides Quaternaire, puis plusieurs périodes d'ensablement éolien sont à l'origine du paysage actuel. Des placages sableux, adossés aux talus des plateaux raccordent les plateaux aux points bas en formant des vastes vallées : c'est le lieu des cultures de mil et de sorgho, et des jachères. Les points bas du paysage sont occupés par le lit des cours d'eau fossiles. Dans toute cette

zone « hors-plateau », il y a donc de l'activité agricole, essentiellement de la polyculture vivrière et extensive. La végétation suit le rythme des saisons, un tapis d'herbacées se développant fortement durant la saison des pluies, alors que les arbustes dominants sont *Guiera senegalensis* et *Commiphora africana*.

Les ravines entaillant les versants sableux sont très fréquemment interrompues à mi-versant à la faveur d'une rupture locale de la pente, dans des zones appelées usuellement « zones d'épandages ». Elles jouent un rôle hydrologique fondamental puisqu'elles provoquent l'épandage de l'eau véhiculée par les ravines et sa quasi totale infiltration à cet endroit. Il en résulte une discontinuité spatiale du ruissellement, les eaux provenant des parties amont des versants n'atteignant pas, en général, le fond des vallées. L'existence de telles zones pourrait être liée à la présence d'un niveau cuirassé sub-horizontale, enfoui sous les versants mais provoquant à l'affleurement une réduction de la pente du versant.

Les deux tendances majeures de l'évolution de ce paysage sont d'origine humaine et climatique. En effet, l'accroissement de la pression démographique tend à réduire les jachères et la végétation naturelle en général, induisant une augmentation de l'érosion, qui, combinée à des conditions climatiques très agressives, font prédominer la morphogénèse sur une pédogénèse plus discrète.

1.4 Hydrologie et Hydrogéologie

Nous insisterons ici sur les caractéristiques hydrologiques et hydrogéologiques de la zone d'étude, compte tenu de leur importance pour notre travail.

1.4.1 Hydrologie

Le Sahel et le Niger occidental sont des régions où l'endoréisme prédomine. L'endoréisme caractérise des bassins versants fermés, semblables à des "cuvettes" dont l'exutoire est un point bas. Dans la région de Niamey, seul le fleuve Niger fait exception. L'endoréisme est généré, dans la zone étudiée, principalement par la dégradation du réseau hydrographique ancien. En effet, les dépôts sableux présents dans le lit ne peuvent être évacués par des débits trop faibles. Ils constituent des verrous qui délimitent une série de dépressions. En saison des pluies, le Kori présente alors l'aspect d'un chapelet de mares, sans écoulement vers l'aval, qui permet de situer le lit de l'ancien cours d'eau.

Le paysage hydrologique se présente donc comme une juxtaposition aux limites floues de petits bassins endoréiques (entre quelques dizaines d'hectares et quelques kilomètres-carrés). Dans ce contexte, la zone d'étude est définie, thématiquement, comme l'ensemble des surfaces drainant vers tous les points du Kori compris entre la tête du bassin (Kollo Loga) et Dantiandou (raccordement du Kori au Dallol Bosso).

Une partie de l'eau de pluie s'infiltré sur les versants, dans les ravines et les zones d'épandages, la fraction restante parvenant jusqu'aux mares via les ravines. La notion d'"état de surface", qui décrit les propriétés de la surface du sol (porosité, rugosité, végétation) est un bon indicateur de l'aptitude au ruissellement du sol (CASENAVE et VALENTIN, 1989). L'importance de l'infiltration dans les ravines dans les zones d'épandages est relatée dans la thèse de PEUGEOT (1995).

Le Kori n'est pas le seul endroit du paysage où l'on peut observer des mares. DESCONNETS (1994) présente une typologie des mares et de leur bassin-versant. Trois types sont retenus : "mares de cours d'eau" (Kori), "mares de vallée fermée" et "mares de plateaux". Un quatrième type, dont il ne sera pas tenu compte dans l'étude, désigne les "mares de route",

mares occupant les zones d'excavation de matériaux ayant servi au remblai des routes ou pistes.

Nous précisons que les mares étudiées ici ne sont pas des flaques, mais désignent bel et bien “ *des lacs peu profonds et d'étendue réduite qui sont généralement temporaires à l'échelle d'une année* ” (DESCONNETS, 1994).

1.4.2 Hydrogéologie

Trois aquifères sont présents dans la série du Continental Terminal dans la région : deux nappes captives, à 120 et 90 m de profondeur, et une nappe phréatique (CT3), qui est affectée par des variations de niveau conséquentes. Elle est limitée à l'ouest par le fleuve Niger et se prolonge au-delà du Dallol Bosso (cf. § 1.1). Elle se rencontre à des profondeurs variant de 20 à 40 m sous les vallées sableuses à plus de 70 m sous certains plateaux.

Il n'existe pas de direction privilégiée d'écoulement souterrain à l'échelle régionale. L'observation des niveaux piézométriques met par contre en évidence des bombements et des dépressions. Une telle dépression est observée parallèlement au Kori de Dantiandou. L'explication actuelle de cette dépression met en cause la faible perméabilité des terrains, alliée à l'évaporation directe de la nappe, qui même faible (quelques mm par an) est significative. En effet, les transferts latéraux, “ freinés ” par le terrain, et la recharge par infiltration ne suffisent pas à contrer la reprise évaporatoire (LEDUC et DESCONNETS, 1994).

Les observations hydrologiques et hydrogéologiques, qui se poursuivent actuellement sur la zone d'étude, font ressortir le rôle prédominant des mares temporaires dans la recharge de cette nappe (DESCONNETS, 1994). Ces mares sont situées préférentiellement dans le Kori, parallèlement à la dépression piézométrique. Les observations mettent en évidence une remontée de l'ensemble du niveau de la nappe sur les quarante dernières années (LEDUC et FAVREAU, 1998). En apparence contradiction avec une réduction des cumuls pluviométriques sur la même période, cette remontée peut s'expliquer par l'augmentation du ruissellement des bassins, liée à la dégradation du couvert végétal naturel et à l'érosion, sous une pression anthropique croissante (LEDUC et LOIREAU, 1997).

Toute cette partie de présentation est largement inspirée des thèses de DESCONNETS (1994) et PEUGEOT (1995). De plus amples références bibliographiques y sont citées et compléteront très avantageusement ce rapide tour des caractéristiques du milieu.

Ces résultats se fondent sur un suivi et une quantité de données exceptionnels sur la zone. Le cadre scientifique que nous présentons dans la partie suivante éclaire les raisons de cette abondance.

2 LE PROGRAMME CATCH

Le travail présenté ici s'inscrit dans le cadre du programme CATCH, acronyme de "Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique". Il est partie intégrante de l'unité de recherches "Variabilité Climatique" de l'ORSTOM. L'objectif majeur du programme est l'étude des interactions entre l'atmosphère et le cycle hydrologique continental en zone tropicale. Dans une perspective de changement climatique, il s'agit d'étudier l'impact du climat et des ses évolutions (essentiellement les pluies) sur les processus hydrologiques, et par conséquent sur les ressources en eau, en zone tropicale sèche.

2.1 Problématique générale

Les Modèles de Circulation Générale Atmosphérique (MCGA), basés sur des mailles de calcul de l'ordre de 100 x 100 km², sont handicapés par la difficulté d'identifier les paramètres utilisés dans les modèles. Si la modélisation océan-atmosphère fonctionne de manière satisfaisante, les processus d'interactions continent-atmosphère sont loin d'atteindre le même niveau de résultats.

En climat tempéré, les jeux de données sont assez complets et satisfaisants. Par contre, le milieu tropical est mal connu. De plus, les modifications actuelles du milieu et notamment la régression de la végétation, une des composantes principales de l'interaction continent-atmosphère, font de l'Afrique de l'Ouest une zone sensible dont l'étude sur ce problème permettrait de bonnes avancées. Dans ce but, l'expérience internationale HAPEX-Sahel a été organisée en zone tropicale sèche.

2.1.1 L'expérience HAPEX-Sahel (HOEPFFNER et al., 1990, GOUTORBE et al., 1997)

HAPEX-Sahel est l'acronyme de Hydrologic and Atmospheric Pilot EXperiment in the Sahel (Expérience pilote sur l'hydrologie et l'atmosphère au Sahel). Elle s'est déroulée de 1991 à 1993 sous l'égide du Programme Mondial de Recherches sur le Climat (PMRC). Le site choisi correspond à un degré-carré (2° à 3° Est et 13° à 14° Nord) qui comprend Niamey. A cette latitude, les dimensions de ce degré-carré sont d'environ 110 x 110 km². Plus de 300 personnes, issues d'équipes internationales représentant des disciplines variées ont été mobilisées pendant la période d'observation intensive en 1992, mais ce sont essentiellement les chercheurs de l'ORSTOM qui ont assuré le suivi à long terme, qui se poursuit actuellement.

De nombreuses expériences (FIFE, EFEDA, HAPEX-Mobilhy et HAPEX-Sahel) ont visé à améliorer les MCGA via une meilleure modélisation des interactions entre la surface continentale et l'atmosphère. HAPEX-Sahel fut la première à effectuer le travail d'analyse de la variabilité intra-maille sous un climat tropical.

2.1.2 Contenu et Objectifs de CATCH

Le programme CATCH a été défini à la suite de l'opération HAPEX. Il est structuré en trois axes, selon un découpage thématique et géographique.

Le premier axe concerne le volet « atmosphère » du programme. Son objectif est de caractériser le cycle de vie des systèmes convectifs tropicaux, leur interaction avec la

circulation générale atmosphérique, et leur impact pluviométrique. Ces processus sont étudiés à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest.

Le second axe, intitulé « Variabilité de la ressource en eau en zone sahélienne » est localisé sur le degré-carré d'HAPEX-Sahel au Niger occidental. Il s'agit de faire le lien entre l'hydrologie de surface et le fonctionnement de la nappe phréatique, avec le but de pouvoir modéliser l'impact des variations climatiques sur la ressource en eau.

Le troisième axe vise à étudier et modéliser la sensibilité des systèmes hydrologiques d'échelle moyenne (1 000 à 50 000 km²) aux fluctuations interannuelles et décennales du climat soudanien. Il s'attache à un bassin-versant au nord du Bénin.

Les deux derniers axes étudient le même type de problématique, mais le passage du Sahel à la zone soudanienne induit plusieurs différences à l'origine de la séparation organisationnelle de ceux-ci. Les différences principales concernent la pluviométrie (900 mm au nord Bénin), et l'organisation des réseaux hydrographiques (arborescences en zone soudanienne, endoréisme au Sahel). A noter que les travaux concernant troisième axe n'ont commencé qu'en 1996, alors qu'une masse importante de connaissances est déjà disponible sur le degré-carré d'HAPEX-Sahel.

Notre travail de stage s'insère dans le second axe. La zone de l'étude correspond en effet l'un des sites d'observation intensif d'HAPEX-Sahel pour lequel de nombreuses données sont disponibles. Les principaux objectifs en sont décrits ci-dessous

2.2 L'axe « Variabilité de la ressource en eau en zone sahélienne »

Cet axe de recherche comporte une composante « hydrologie de surface » et une composante « hydrogéologie ». Il vise à comprendre et à modéliser l'infiltration et le ruissellement des eaux sur les versants, leur concentration dans les ravines et le remplissage des mares. D'autre part, il s'agit de comprendre la dynamique de l'aquifère, et, les mares permettant la recharge de la nappe, d'appréhender le mécanisme de la recharge.

Nous insisterons plus sur les aspects « hydrologie de surface », puisque c'est au sein de cette équipe que le travail a été réalisé. Les études qui y sont développées font appel à la modélisation hydrologique. Il s'agit de mettre au point des outils capables, à partir d'un signal pluviométrique, de modéliser la redistribution de l'eau sur les bassins-versants. Les modèles utilisés sont de type spatialisé et à bases physiques.

La zone étudiée est le bassin versant du kori de Dantiandou (cf. § 1.1), d'une surface de 1500 km² environ. Rappelons qu'il s'agit de la réunion d'un chapelet de bassins endoréiques (cf. § 1.4). Un bassin versant pilote de 2 km² (Wankama), inclus dans le grand bassin, a fait l'objet d'un suivi intensif depuis 1993. Il permet l'étude fine des processus, à l'échelle locale, pour préparer la généralisation de la modélisation hydrologique à l'ensemble du bassin de 1500 km².

Nous allons tenter de retracer ici un bref historique et descriptif de ce travail de modélisation. Le lecteur peut se reporter à la synthèse bibliographique qui consacre une partie à la modélisation hydrologique (cf Chap. 2, § 1).

2.2.1 *r.water.fea, un modèle couplé à GRASS.*

Dans le cadre d'une collaboration avec l'université d'Oklahoma (USA), le modèle *r.water.fea* (VIEUX et GAUER, 1994) développé à l'origine pour simuler les réponses des bassins-versants montagneux des Etats-Unis à des événements orageux, a été adapté au cas sahélien. Il est interfacé au SIG GRASS et fonctionne avec des unités hydrologiques de la taille définie par la grille raster du S.I.G. La description des propriétés hydrologiques dans le modèle, issue de scènes SPOT-XS, utilise une grille de 30 x 30 m². Il a été utilisé pour la modélisation à échelle fine des processus sur un bassin test bien instrumenté (bassin de Wankama, 2 km²).

2.2.2 *Développement d'un modèle découplé d'un S.I.G.*

Dans la perspective de la modélisation hydrologique sur la zone-cible de 1500 km² (bassin du kori de Dantiandou), le modèle *r.water.fea* présente certains inconvénients, dont les principaux sont sa lourdeur de mise en oeuvre à grande échelle et sa faible performance en termes de temps de calcul, liées au grand nombre de mailles nécessaires.

L'équipe de CATCH-Niger a pour cela développé un modèle simplifié, fondé sur les mêmes équations que *r.water.fea*, mais utilisant une représentation simplifiée de l'espace (panneaux trapézoïdaux pour les versants, chenaux rectilignes pour les drains). Une étude récente (CAPPELAERE et al., 1998) montre que ce mode de représentation ne dégrade pas les performances du modèle sur les bassins pilote de Wankama.

Le modèle a été développé de manière à coupler les fonctions de production et de transfert, via la possible réinfiltration d'eau lors du ruissellement. Les données issues de GRASS seront importées au moyen d'une interface, et le modèle possède un programme qui lui permet de tourner en parallèle sur plusieurs processeurs de calcul (gain de rapidité).

La mise en oeuvre du modèle sur 1500 km² requiert un mode de représentation de l'espace physique intelligible pour le modèle, et la définition des paramètres hydrologique associés à chaque unité représentée.

C'est dans ce contexte que s'insère le travail exposé dans ce mémoire.

3 LES OBJECTIFS DU STAGE

Le travail consistait en effet à initier la description de l'espace au sens hydrologique afin d'établir les bases du modèle sur les 1500 km² du bassin-versant du Kori de Dantiandou. En particulier, il s'agissait de dresser un inventaire des mares des ravines principales de la zone. La durée du stage impliquait une certaine limitation des objectifs mais il s'agissait tout de même de faire un travail cohérent avec ces objectifs à long terme.

3.1 A long terme

3.1.1 Problématique

A long terme, structurer le paysage afin de l'intégrer au modèle demande une connaissance de ce paysage la plus complète et détaillée possible. La modélisation du bassin-versant de la mare de Wankama se base sur une connaissance très complète de ce bassin par des levés topographiques, des relevés des états de surface et par les mesures hydrologiques. Cependant, cette connaissance expérimentale extensive n'est pas disponible pour l'ensemble de la zone de 1500 km².

3.1.2 Réflexion à mener

Il s'agit donc de bâtir une description du milieu, cohérente avec la réalité, et pertinente pour le modèle. Plus précisément, il convient d'identifier et de localiser les principaux objets hydrologiques de la zone, tels que sont les mares et les ravines principales. Pour ce faire, tous les supports d'information disponibles (photographies aériennes, images satellitales, cartes) seront utiles pour générer, par recoupement, les informations attendues.

3.1.3 Deux étapes

Deux étapes ressortent clairement pour l'élaboration d'une description hydrologique du milieu. D'abord, il faudra découper le paysage en ensembles (bassin-versants) puis en sous-ensembles (ravines, versants...) jusqu'à obtenir les zones homogènes.

Des caractéristiques dimensionnelles (cf. § 2.2.2) devront ensuite être associés à ces zones. Leur détermination ne sera pas forcément triviale (longueur d'un versant ?). De même, les paramètres hydrologiques liés aux sols pourront faire l'objet d'une détermination complexe.

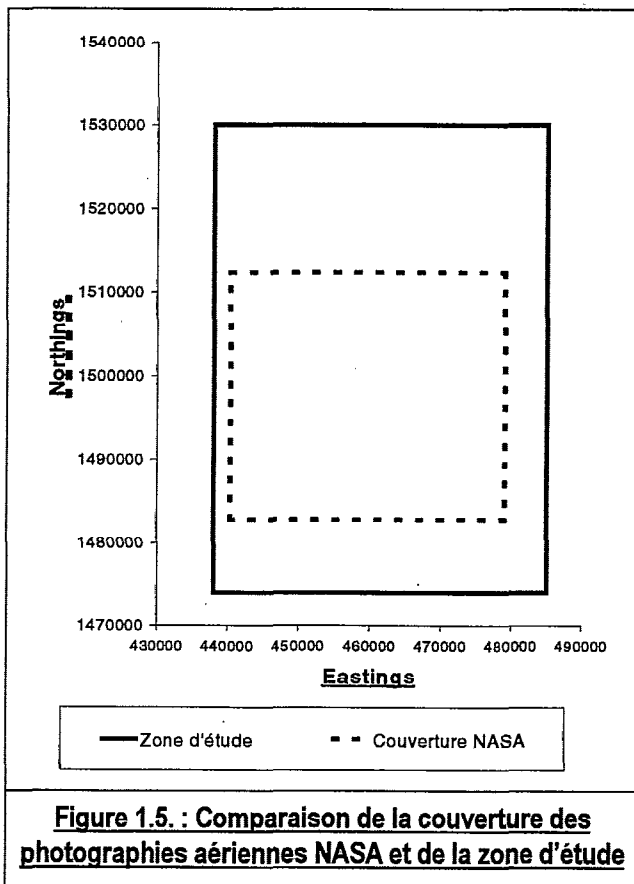
3.2 Initialisation

Notre travail ne présente qu'une première approche du problème. Les limitations sont nombreuses, qu'elles soient la conséquence de choix ou plus simplement de la limite de temps. Cependant, peu après l'arrivée au laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM, quelques grandes lignes sont rapidement apparues.

3.2.1 Données disponibles

Même si l'acquisition de nouvelles données n'était pas un problème insurmontable, un grand jeu de données sur divers supports était disponible à mon arrivée au laboratoire (cf.

annexe 2). Il comprenait des cartes topographiques au 1/50 000ème et au 1/200 000ème, des scènes SPOT et toute la base incluse sous GRASS.



Le problème majeur de ce point de départ résidait dans le fait que la plupart de ces données étaient limitées à une zone plus petite que la zone d'étude.

La figure 1.5. ci-contre montre la zone couverte par les photographies aériennes. Toute la zone d'étude n'est pas couverte, seul le supersite central d'HAPEX-Sahel a été photographié.

Pour illustrer ce problème, nous pouvons dire que la surface la plus grande où tous les types d'informations sont présents couvre seulement 800 km² sur les 2 400 km² de la zone.

La partie Nord de notre zone, à la limite de l'intérêt de l'étude, est dépourvue de couvertures aériennes et de données sous GRASS.

Cela est essentiellement dû à la définition du supersite central est d'HAPEX-Sahel où les données sont abondantes mais limitées à cette étendue.

3.2.2 *Quels supports ?*

Nous avons fait le tour des supports de données spatialisées disponibles : cartes topographiques, photographies aériennes et images satellites. Le premier travail à effectuer a été la comparaison des différents supports, et l'évaluation de leurs avantages respectifs, de l'exactitude, de la précision et de la quantité des informations (essentiellement hydrologiques) qu'ils contenaient.

Sur 600 km², nous possédions aussi le résultat d'un inventaire sur le terrain réalisé par DESCONNETS (1994).

3.2.3 *Outils de travail*

Le S.I.G. utilisé n'était pas obligatoirement GRASS (Geographic Resources Analysis Support System, v.4.1., 1993). En effet, cela s'est avéré un choix pratique et consensuel, mais si ses possibilités, en matière de télédétection, s'était avérées trop limitées, j'aurais pu trouver un autre logiciel, notamment ceux utilisés à la Maison de la Télédétection.

GRASS est un SIG du domaine publique, développé initialement par l'armée américaine (U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories (USA-CERL)). Il fonctionne sur station de travail, mais sera bientôt disponible sous Windows.

La version 4.2. est disponible actuellement et elle était celle que j'ai utilisée, mais la version 5 est en cours de développement. L'évolutivité et des commandes de bases fortement paramétrables sont d'ailleurs des avantages de ce logiciel. Actuellement, le suivi et le développement de GRASS est assuré par le Centre de recherche géographique et spatiale appliquée, à l'université de Baylor, Etats-Unis.

GRASS fonctionne sur une base raster, mais ses fonctionnalités vecteur sont très étendues. Il exécute des lignes de commandes. Son apprentissage est donc très empirique puisque le manuel ne fait qu'énoncer chaque commande, et son mode d'emploi, l'une après l'autre.

3.2.4 *Les mares et les ravines*

Une stratégie semi-agrégative a été préférée à une déconstruction du paysage : le principal objectif du travail stage concernait un inventaire et une caractérisation des mares et des ravines principales.

L'inventaire des mares est donc le premier point de mon travail, et ce, pour plusieurs raisons. Dans l'optique de la liaison avec l'hydrogéologie de la région, la recharge de la nappe phréatique se fait majoritairement à l'aplomb des mares. De plus, une mare est le résultat de la concentration du ruissellement sur un bassin versant. L'inventaire des mares constitue donc une ébauche de l'inventaire des bassins endoréiques.

Enfin, en oubliant le modèle hydrologique, les mares sont des points importants de la vie de la région. Il s'agit d'une source d'eau, malheureusement souvent temporaire, pour l'alimentation et pour le bétail. Cet inventaire peut donc avoir d'autres applications que la détermination de la structure hydrologique de la zone.

Le contexte géographique et scientifique nous ont permis de poser le problème. Les thèmes et les objectifs du travail ont fait l'objet d'un travail bibliographique élargi. Le chapitre 2 représente la synthèse de ce travail.

Chapitre 2 :

Synthèse bibliographique

La rencontre de la télédétection et de l'hydrologie s'est faite naturellement via les possibilités d'études spatialisées du milieu naturel qu'offre la télédétection. Il s'agit ici de voir les potentiels et les contraintes de cette rencontre aussi bien dans un cadre général que dans les cadres particuliers de l'inventaire des mares et de la caractérisation des ravines.

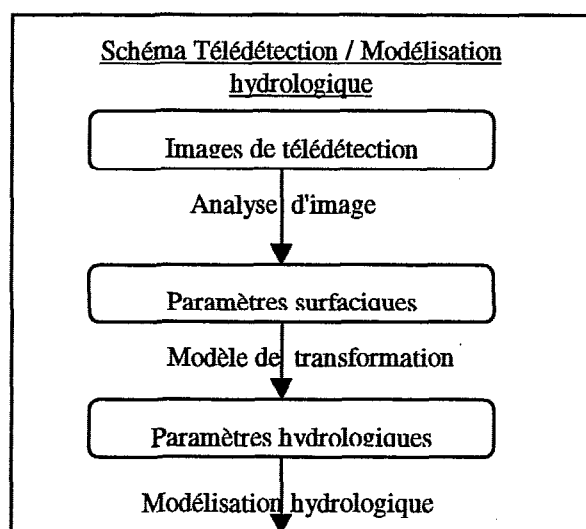
1 TÉLÉDÉTECTION ET MODÈLES HYDROLOGIQUES

Les modèles hydrologiques ont été développés bien avant l'essor des données télédétectées. L'utilisation de la télédétection en hydrologie doit donc passer par un certain nombre d'adaptations. Nous verrons donc les problèmes qui se posent aux interfaces, les utilisations traditionnelles et les perspectives de la télédétection en hydrologie.

1.1 Interfaces

1.1.1 Passage de l'image aux données hydrologiques

Le problème de l'adéquation entre les logiques de l'hydrologie et de la télédétection est exposé par PUECH (1995). Il s'agit d'une vue générale de l'utilisation de la télédétection appliquée à la modélisation hydrologique. La figure 2.1. rappelle que les données hydrologiques ne sont pas directement obtenues à partir des images de télédétection.



❖ Les **paramètres surfaciques**, tels que l'occupation du sol, les indices de végétation, température de surface... sont les paramètres directement cartographiables à partir d'une image.

❖ Le **modèle de transformation** pourra être statistique, empirique ou théorique, mais devra délivrer des paramètres directement utilisables par la modélisation. Cette transformation constitue la première difficulté.

❖ La seconde difficulté est d'obtenir des **paramètres hydrologiques** qui ont une cohérence d'échelle avec le modèle, alors qu'ils sont issus d'une échelle dépendante de la télédétection.

Figure 2.1. : Obtention des paramètres hydrologiques à partir des images satellitaires (PUECH, 1995)

Le problème de cette cohérence est vu par PUECH sous l'angle du requis par l'hydrologie, et du disponible par la télédétection. Le requis dépend principalement du choix et des possibilités des modélisateurs. Ce requis est décliné suivant le type de modèle : global ou distribué. Ce changement d'approche s'accompagne d'une évolution des processus à décrire : alors que les modèles globaux «se contentent» de paramètres moyens (de pluies par exemple) qui sont utilisés par des fonctions de production / fonctions de transfert, les modèles finement distribués font intervenir des paramètres spatialisés dans des processus plus élémentaires.

Pour ce qui est du disponible, la télédétection comprend deux échelles élémentaires : l'une spatiale et l'autre temporelle.

L'échelle spatiale est limitée par la taille de la cellule d'échantillonnage du capteur. Cette échelle est donnée par la taille réelle du terrain correspondant. Par exemple, SPOT-XS a une résolution de 20 x 20 m². Sur cette surface, le capteur moyenne la réponse radiométrique.

Cette résolution élémentaire correspond donc à une discrétisation de l'espace, et par conséquent, les modèles distribués fortement liés à la télédétection ne pourront décrire l'espace plus finement que le satellite. C'est notamment le cas de r.water.fea (VIEUX et GAUER, 1994, cf. Chap. 1 § 2.2.1) et du modèle de BEN ASHER et HUMBORG (1992).

Pour l'échelle temporelle, c'est moins évident, mais il faut se rappeler que c'est étroitement lié à la résolution spatiale. En effet, les satellites ayant une orbite éloignée (ex : NOAA) peuvent produire des scènes très fréquemment (tous les jours pour NOAA) ; mais étant plus éloignés de la terre, ils ne peuvent avoir la même résolution que les satellites plus proches. Ces derniers, en effet, atteignent des résolutions de 10 m (SPOT panchromatique) mais ne peuvent produire des scènes d'une même région qu'à intervalles de temps variables (cf. annexe 3). C'est ce genre de considérations qui a conduit VERDIN (1996) à utiliser la plateforme NOAA pour suivre à haute fréquence les plans d'eau au Niger.

Ce sont donc deux « disponibilités » de base de la télédétection, qui ne possèdent pas d'optimum, mais qui devront conduire à un choix. Les modèles globaux pourront s'intéresser ainsi aux variations rapides des paramètres, alors que les modèles distribués favoriseront la résolution spatiale au détriment de la fréquence des observations.

A ce propos, nous rappelons ici rapidement que la distribution, si elle apporte un indéniable plus en matière de compréhension des processus et de possibilités de tests de scénarios, n'apporte rien en revanche à la validation des résultats. BEVEN (1989) est ainsi très critique par rapport à l'utilisation ou aux conclusions parfois abusives des modèles distribués à base physique.

De manière un peu étrange, les résolutions spectrales des capteurs entrent peu en ligne de compte dans le choix des scènes. Sauf dans le cas de recherches de paramètres hydrologiques particuliers, les capteurs classiques seront choisis en fonction des deux paramètres spatiaux et temporels, et souvent dans des termes décisifs de disponibilité.

PUECH signale aussi la forte dépendance d'échelle de ces travaux. Mais pour l'explicitier, nous pouvons aussi nous reporter à l'exemple suivant parlant de la sensibilité d'un modèle hydrologique par rapport à ce phénomène.

1.1.2 Un exemple de dépendance d'échelle.

ELSHEIKH et GUERCIO (1997) ont étudié l'influence de la résolution du M.N.T. (Modèle Numérique de Terrain) employé et de la définition du critère de seuil de surface drainée. Ils ont donc établi des formules pour étudier les variations des vitesses, du temps de

concentration, du nombre de Melton (densité du réseau hydrographique), etc.... selon ces deux paramètres.

Le tableau ci-dessous illustre bien le fait que le phénomène de dépendance d'échelle est extrêmement complexe, et n'a en tous cas rien de linéaire. La résolution du MNT va modifier les pentes, gommer ou accentuer certains aspects de la topographie. Toutes ces modifications seront en fait répercutées de manière très importante à travers les équations du modèle, d'où des résultats très différents.

Je reproduis donc ici un de leurs tableaux de résultats à titre d'exemple. Ainsi, pour chacune des résolutions du MNT, l'obtention d'un nombre de Melton le plus proche de la réalité (0,694) conduit à choisir différentes valeurs du critère de seuil de surface drainée.

Seuil de surface drainée (m ²)	MNT 30m	MNT 50m	MNT 70m
4500	0.713	0.694	0.693
9000	0.747	0.695	0.730
18000	0.714	0.745	0.697
27000	0.750	0.675	0.692
36000	0.692	0.679	0.671
45000	0.698	0.695	0.681
54000	0.691	0.685	0.748
63000	0.693	0.728	0.763
76500	0.721	0.738	0.805

Tableau 2.2.. : Nombres de Melton (0.694 en réalité) en fonction du critère de seuil de surface drainée pour trois résolutions de MNT (ELSHEIKH et GUERCIO, 1997)

Ce phénomène affectera aussi bien un modèle global qu'un modèle distribué. Cependant, PUECH (1995) considère qu'il s'agit principalement d'une limitation à l'approche distribuée. En effet, les variables sont affectées, mais PUECH rappelle que les processus peuvent eux aussi être décrits de manière très différente selon l'échelle. BEVEN (1989) développe aussi cette idée selon le terme de « saut conceptuel » entre l'équation de la zone homogène et bien connue en laboratoire et la réalité naturelle.

1.1.3 L'intégration à un Système d'Informations Géographiques (S.I.G.)

Elle est systématique aujourd'hui. En effet, la télédétection comme la modélisation hydrologique distribuée nécessitent de manipuler et de traiter un grand nombre de données spatiales.

Ne serait-ce que pour déterminer la surface d'une mare à partir d'images SPOT, OUSMANE (1994) explore les différentes possibilités : planimétrie, photo-interprétation assistée, décomposition du pixel, statistique après une opération morphologique et statistique par création d'une fenêtre polygonale. Ces opérations décrivent un besoin croissant de S.I.G. : la planimétrie est ancienne et peut être faite manuellement, sans aucun support informatique. Au contraire, pour délimiter une zone autour d'une mare, étudier la distribution des réflectances dans cette zone, faire un traitement statistique, et fournir des résultats par mare, l'utilisation d'un S.I.G. est pour le moins intéressante ! De plus, OUSMANE conclut à la supériorité de cette méthode sur les autres : les S.I.G. sont non seulement des outils pratiques mais permettent une amélioration des résultats par leurs nouvelles possibilités.

Un S.I.G. peut aussi être considéré comme une « base de données spatialisées ». DESCONNETS *et al.* (1996) ont conçu le S.I.G. HAPEX-Sahel comme une base de données

potentiellement utilisables dans leur projet de modélisation hydrologique de la zone. Il comprend principalement des données hydrologiques (précipitations, niveaux piézométriques...), des cartes thématiques (topographie, sols, végétations...), des images SPOT et des photographies aériennes. La réalisation de cette base sous GRASS permet ensuite d'utiliser r.water.fea (VIEUX et GAUER, 1994).

BAUMGARTNER et APFL (1996) notent que la synergie entre la télédétection, les S.I.G. et les modèles hydrologiques n'aboutira que si une approche intégrée est faite pour relier les différents modules actuellement nécessaires : traitement d'images, S.I.G., Système de Gestion de Base de Données, modèles hydrologiques et sorties graphiques. Sans parler de la facilité d'utilisation qui serait induite, le temps et la perte d'information et de précision lors des opérations d'import/export des données justifie à elle seule ce souhait. Par contre, cette approche rencontre les limites du logiciel développé.

1.2 Exploitations actuelles de la télédétection en hydrologie

KITE et PIETRONIRO (1996) voient l'intervention de la télédétection pour le paramétrage d'un modèle hydrologique selon trois niveaux : identification directe d'objets (plaques de neige par exemple), cartographie d'occupation des sols ou de végétation après des opérations du type classification et enfin, données obtenues par corrélations directes avec la réflectance mesurée (précipitations, humidité du sol).

Ils font ensuite le tour des données réellement disponibles à partir d'images satellites actuellement : précipitations, neige, occupation du sol, végétation, évapotranspiration et niveaux des retenues de barrages sont des éléments fréquemment cités dans les articles traitant de l'utilisation de la télédétection en hydrologie.

Pour ce qui est de la liaison avec les modèles, l'exemple de r.water.fea (VIEUX et GAUER, 1994) rend bien compte des possibilités et des limites de l'approche pixel. En effet, bien que l'intégration de la télédétection et des S.I.G. soit parfaite, l'approche hydrologique ou algorithmique peut poser d'autres problèmes : adaptation à différentes régions, temps de calcul et hypothèses de base non vérifiées. ASCAS (BAUMGARTNER et APFL, 1996) ne répond quant à lui qu'aux problèmes de formats et d'interface avec l'utilisateur.

Enfin, EL HADANI (1997) et BABAN (1997) présentent la télédétection et les S.I.G. dans l'optique de la gestion de la ressource en eau dans les régions où celle-ci se fait rare. Les applications deviennent alors des problématiques d'implantations de forages, de contrôle des surfaces en eaux, de cartographie des inondations et de gestion des périmètres irrigués. La télédétection présente alors l'avantage d'un coût réduit d'acquisition des données dans des zones où les surfaces couvertes sont très importantes et l'accès difficile.

1.3 Perspectives

Il semble que les développements actuels tendent à considérer les limitations de la télédétection.

Un premier exemple est l'apparition de modèles hydrologiques fondés sur les données facilement disponibles par télédétection : VINE *et al.* (1997) réussissent ainsi à modéliser le fonctionnement de bassins sahéliens au Burkina Faso en utilisant les notions de zones homogènes, couplées à la notion de zone contributive, et les indices de végétations, à la place des états de surface. Ils sont donc partis des possibilités de la télédétection pour approcher les notions hydrologiques. Traditionnellement, les hydrologues avaient tendance à vouloir obtenir

directement des paramètres hydrologiques à partir d'une image. Les étapes (cf. figure 2.1. § 1.1.1.) Analyse d'image et Modèle de transformation étaient couplées. Vine *et al.* réduisent la part de la télédétection à l'obtention des paramètres surfaciques. La modélisation doit alors modifier son fonctionnement afin d'intégrer des paramètres surfaciques.

A ce propos, STEWART *et al.* (1998) ont une vision assez large de la télédétection et de l'hydrologie en 1998. Plusieurs points de leur résumé nous donnent des indices sur le futur de la télédétection en hydrologie :

✓ Ils analysent d'abord les problèmes de l'hydrologie de bassin. Le besoin accru de modèles hydrologiques et météorologiques est reconnu, mais les modèles ne sont pas conçus pour accueillir les données issues de la télédétection. Si ces données sont potentiellement fiables à grande échelle, le double problème des résolutions spatiales et temporelles reste posé.

✓ Les précipitations, l'hydrologie des sols, et les études des bilans radiatifs sont trois autres points prometteurs de la télédétection mais qui sont encore appelés à se développer.

✓ De nombreux développements sont nécessaires pour au moins estimer les erreurs liées aux phénomènes d'échelle. Notamment, il est impensable d'utiliser la télédétection comme outil d'étude de grandes étendues si de nombreux progrès ne sont pas faits en ce domaine.

✓ Enfin, ils recommandent de se pencher sur les données déjà existantes et complètes. Des acquisitions nouvelles ne sont pas souhaitables tant que les outils ne permettent pas de tirer le meilleur des bases de données. Il faut donc rendre disponibles ces bases, notamment celles issues de grands programmes comme HAPEX (dont c'est déjà le cas) et étudier les propagations d'erreurs depuis l'acquisition des données jusqu'aux sorties des modèles.

En conclusion de cette première partie assez générale, nous pouvons dire que si une image satellite ne donne pas des réponses ou des données toutes faites, cela reste néanmoins un outil majeur par ses capacités d'acquisition intensive sur de grandes surfaces. Son coût relativement faible et le développement des études à des niveaux de plus en plus globaux favorisent de plus ses utilisations futures.

2 L'IDENTIFICATION DES SURFACES EN EAUX

En télédétection, l'eau n'est pas normalement un facteur de problématiques compliquées ou de mises au point fastidieuses : un simple seuillage sur un canal proche infrarouge (SPOT-XS3 ou LANDSAT-TM4 par exemple) suffit normalement à la faire ressortir de façon nette. Mais, dans notre cas, des particularités font que l'identification des surfaces en eaux n'est pas aussi aisée que nous pouvions le penser auparavant.

2.1 Champ d'application des micro-ondes

Les données acquises lors de HAPEX-Sahel ne sont pas nécessairement les plus adaptées à l'inventaire des surfaces en eaux. Pour l'essentiel, il s'agit de photographies aériennes et de scènes SPOT-XS.

Les micro-ondes réagissent de manière très sensible à l'eau. Il semblait donc naturel d'explorer ses applications pour étudier l'éventuelle utilité d'un capteur radar pour l'inventaire des surfaces en eaux.

L'application actuelle de cette sensibilité reste la teneur en eau des sols. BROWN *et al.* (1993) font état des futures applications de RADARSAT. Or si l'eau est omniprésente, c'est pour l'étude des cultures, de la teneur en eau des sols, de la neige ou d'événements ponctuels. De même, à l'instar de nombreux autres articles, MATTIKALLI et ENGMAN (1997) ne considèrent l'application du radar que pour l'étude des sols et principalement leur teneur en eau. Ils vont même jusqu'à pouvoir définir la structure des sols.

KITE et PIETRONIRO (1996) font cependant état du suivi des niveaux des lacs par altimètres radar. Mais il s'agit de lacs de grande surface, dont les méthodes de suivi sont encore considérées comme peu fiables et coûteuses.

Il semble donc que les satellites plus conventionnels : LANDSAT, NOAA ou SPOT, soient ceux parmi lesquels le choix devra se faire.

2.2 L'eau boueuse des mares sahéliennes

2.2.1 Les signatures spectrales et le NDVI

La forte charge en limons des mares constitue la source de difficulté de leur extraction d'une image satellite. C'est ce que note PUECH (1994) dans son étude des capacités d'évaluation des plans d'eau sahéliens avec des images SPOT. Les signatures spectrales le démontrent d'ailleurs assez bien.

La figure 2.3. montre les réponses des différents éléments du paysage en fonction de la longueur d'onde. Alors que l'eau se détache nettement des autres corps, l'eau boueuse, elle, se comporte de manière plus banale. Il s'agit en fait d'un mélange entre l'eau et les sols clairs. Sa réponse spectrale est donc intermédiaire.

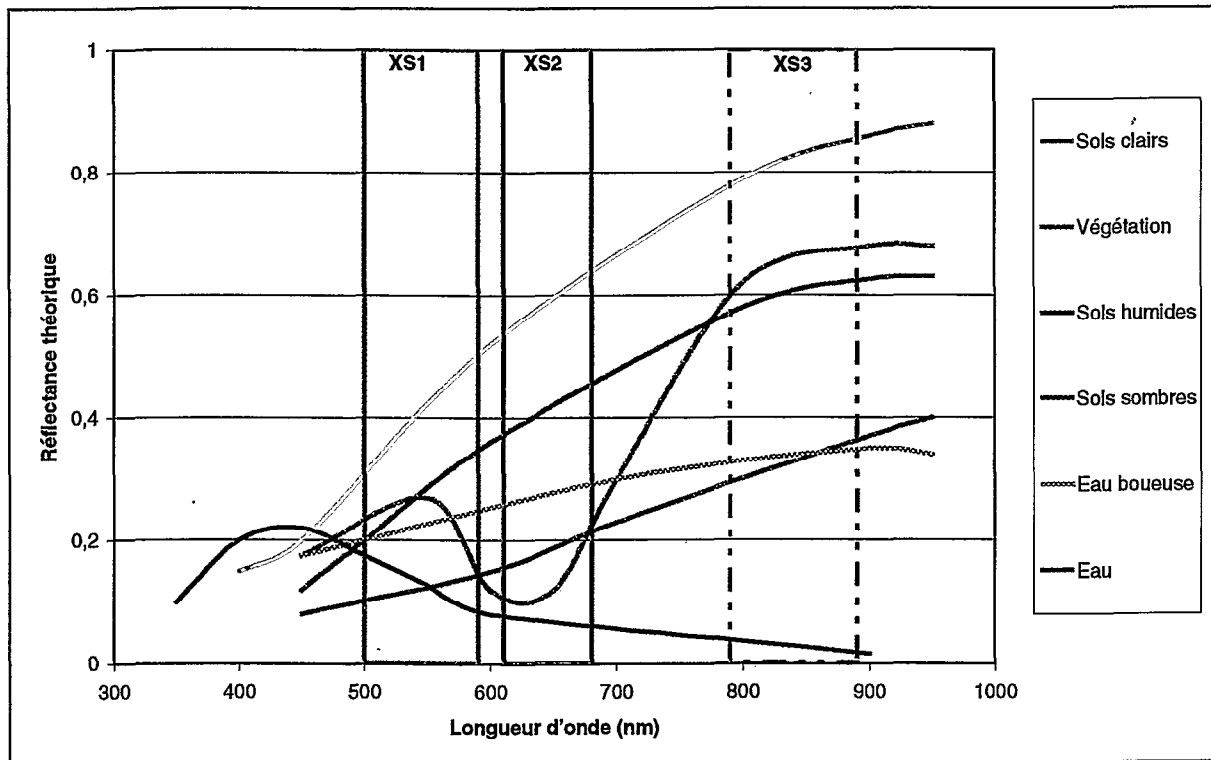


Figure 2.3. : Construction théorique des signatures spectrales des différents corps du milieu sahélien, d'après PUECH (1994)

Cette figure est essentielle pour la suite du mémoire. La figuration des trois canaux XS SPOT permettra de comprendre l'échec des méthodes traditionnelles et le fondement de la méthode utilisée.

SEGUIS (1993) a mis en évidence les caractéristiques spectrales des eaux de crues dans la région de Podor, sur le fleuve Sénégal. La charge en limons est telle que la distinction entre l'eau et la bordure des mares ne se fait que difficilement. De plus, les ordres de grandeur de la turbidité sont édifiants : le disque SECCHI disparaît à des profondeurs de 10 cm pour certaines mares (40 cm pour les mares les moins turbides de la région).

Or PUECH (1994) estime que les mares du Niger ont un degré de turbidité élevé qui les rapproche plus des 10 cm trouvés par SEGUIS à la mare de Figo. Il est alors difficile dans ces conditions de séparer les mares des sols sombres comme les cuirasses latéritiques, même dans les canaux PIR.

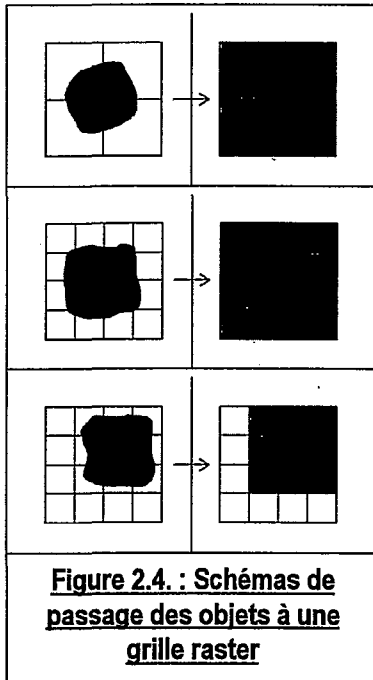
L'inventaire de PUECH se fonde donc sur un néo-canal : l'indice de végétation NDVI (Indice de végétation normalisé) s'est en effet trouvé être un bon discriminant des mares sur la zone qu'il étudie. Rappelons que l'indice NDVI est calculé avec les canaux SPOT de la manière suivante :

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR} - R}{\text{PIR} + R} = \frac{\text{XS3} - \text{XS2}}{\text{XS3} + \text{XS2}}$$

Ce mode de calcul explique donc le caractère discriminant du NDVI : toutes les signatures spectrales de l'eau (boueuse ou non) présentent peu de différence de réflectance entre XS2 et XS3, au contraire de tous les autres objets.

2.2.2 Le seuil de détection spatiale

Il reste le problème du seuil de détection spatiale. Nous illustrons ci-dessous quelques concepts de détection satellitaire qui ont conduit PUECH à considérer que toutes les mares de plus de 0,25 ha étaient détectées.



Ce schéma illustre le fait qu'un objet de la taille d'un pixel peut ne pas apparaître sur un pixel entier. La détection en sera rendue plus difficile sinon impossible.

Ici, l'objet est détecté parfaitement puisque la grille est presque alignée aux contours de l'objet, c'est une situation idéale, où, de plus, le nombre de cellules bleues à droite rend bien compte de la taille de l'objet bleu à gauche.

Enfin, un objet de la même taille ne sera rendu que par une seule cellule bleue. C'est le « pixel pur ». Mais il s'agit du plus mauvais cas rencontré pour un objet de cette taille. Un objet qui fait donc au moins deux cellules de large et au moins deux cellules de long donnera lieu à l'obtention d'au moins un pixel « pur » détectable.

Cette illustration est simple et schématique, mais elle permet de préciser les choses quant au seuil de détection des objets en fonction de leur taille et de la résolution spatiale du capteur. Le seuil de détection lié à la résolution spatiale du capteur sera donc un élément déterminant dans le choix du capteur.

Une marge de sécurité en l'absence de contrôle du terrain est cependant nécessaire. PUECH (1994) ne disposait pas de ce contrôle, c'est pourquoi il préfère présenter un seuil de 0,25 ha. Nous nous conformerons à cette valeur, en essayant cependant de la contrôler et de la discuter.

Cette méthode servira donc de base théorique et pratique à l'inventaire des mares. Mais des améliorations sont toujours envisageables.

2.3 D'autres aides possibles

2.3.1 Les possibilités étudiées avec NOAA

Les scènes NOAA-AVHRR sont utilisées par VERDIN (1996) pour le suivi d'étendues en eau dans la région de Tillabéri au Niger. Les raisons de ce choix sont principalement des facilités d'obtention des données auprès du programme AGRHYMET et la fréquence des prises de vue. De plus, l'AGRHYMET Regional Center (A.R.C.) produit régulièrement des « Greenness maps », soit des cartes de l'indice de végétation normalisé (NDVI). L'étude, soutenue par l'A.R.C., consiste à mettre en place un indice hydrologique comparable à un indice de végétation, donc avec une facilité du traitement entraînant une grande fréquence de production. Mais ils ne s'intéressent qu'aux étendues de grande surface, et en effet, la résolution de NOAA (1,1 x 1,1 km²) est pour nous rédhibitoire.

Cependant, VERDIN met au point une méthode dont les fondements théoriques auraient pu nous servir. En effet, il a exploré un bon nombre de possibilités que nous pourrions ainsi éliminer ou regretter de ne pas pouvoir appliquer.

NOAA-AVHRR possède une large gamme de canaux. Parmi ceux-ci, VERDIN rejette, après essais, le canal 2 (PIR) et le canal 1 (visible). Il essaye évidemment l'indice de végétation NDVI (calculé ici à partir des canaux 1 et 2 de NOAA-AVHRR), mais ne le trouve pas meilleur que le canal PIR. Nous ne pourrions explorer la piste du moyen infrarouge (TM 5 ou ici, AVHRR 4 - AVHRR 3, mais absente de SPOT), mais VERDIN la trouve aussi peu satisfaisante.

Il a finalement choisi la bande 5 de NOAA-AVHRR, ce qui représente l'infrarouge thermique (IRT) : en effet, sa ségrégation est basée sur la température relativement plus basse de l'eau par rapport au terrain environnant. Il s'agit là aussi d'une possibilité qui n'est pas offerte par SPOT. Mais la résolution spatiale de NOAA nous en interdit de toutes façons l'utilisation. Quant à LANDSAT-TM, qui possède aussi un canal dans l'IRT, nous verrons plus loin pourquoi nous ne le sélectionnerons pas.

2.3.2 *La correction contextuelle*

Puisque le problème majeur est de différencier les cuirasses latéritiques de l'eau fortement chargée, nous pourrions éliminer les zones de plateau et de bordure de plateau où la cuirasse affleure.

GROOM *et al.* (1996) ont procédé d'une manière similaire pour la cartographie thématique de la Grande-Bretagne. Ainsi, ils réalisent une première classification de manière tout à fait classique (maximum de vraisemblance), puis ils corrigent cette classification en créant des masques de zones où l'occupation des sols est forcément différente. Il s'agit de distinguer la zone intertidale des zones exondées, les hauts-plateaux des basses-terres ou plus simplement l'urbain et le reste. Cette création de contextes leur permet d'obtenir des classifications cohérentes et homogènes.

L'application de cette méthode à notre problématique n'est pas directe, mais le fait de créer un masque sur les plateaux pour améliorer une classification me semble une piste intéressante.

2.3.3 *La diachronie*

Multiplier les sources de données est une nécessité pour espérer avoir de bons résultats. Cependant, nous pouvons étudier l'exemple de TURNER et CONGALTON (1998) qui axent leur étude sur la diachronie.

La diachronie consiste à étudier l'évolution des objets sur des scènes à des dates différentes. Ils cherchent en effet à étudier les champs de riz dans le delta du Niger au Mali. Leur méthode de classification est assez complexe et peu transposable. Cependant, une grande partie de leur classification est basée sur l'évolution de ces champs avant et juste après le début de la saison des pluies. C'est plus cette évolution qu'une réponse à un instant donné qui guide leur discrimination.

Les mares sont évidemment appelées à connaître de grandes variations au cours des saisons sahéliennes. Nous possédons des scènes SPOT à différentes dates. Il en résulte donc que la connaissance basique des variations de surface ou d'état au cours de la saison aurait pu être un de nos axes de recherche. Nous attirons l'attention sur le fait que nous utiliserons dans

notre inventaire plusieurs scènes à des dates différentes, mais il ne s'agit pas pour autant d'une mise en application d'une étude diachronique (cf. Chap. 3 § 1.3).

2.3.4 Une clef d'interprétation

GNOUMOU *et al.* (1993) interprètent des compositions colorées LANDSAT-TM à l'œil nu sur tirages papier. Un aspect de leur méthodologie peut nous intéresser. Ils ont en effet mis au point pour le Burkina Faso, une clef de détermination qui permet au photo-interpréteur de discriminer plus facilement les mares. La position topographique, la présence ou l'absence de végétation alentour, l'évolution temporelle sont autant d'entrées de la clef qui augmentent ou diminuent la probabilité que l'objet visé soit une mare.

Cette caractérisation des phénomènes naturels liés à une mare, ou à ce qui peut être confondu avec une mare d'ailleurs, nous permettrait peut-être d'explorer de nouvelles pistes ou de valider certains des points vus précédemment.

Les mares constituent donc la base de notre caractérisation hydrologique. Il s'agit de mettre au point un schéma de détermination, si ce n'est une méthode fixe et fiable, pour réaliser un inventaire qui est la base du travail. Ensuite, il faudra déterminer et caractériser le réseau endoréique propre à chaque mare.

3 LE RÉSEAU DE RAVINES

En l'absence de cartes topographiques fiables, il peut être intéressant de développer des méthodes d'extraction de formes naturelles. Heureusement ce cas de figure tend à se raréfier pour une grande partie de la surface du globe, mais il en résulte que la littérature est pauvre en exemples.

La morphologie mathématique, quant à elle, voit son champ d'application se réduire considérablement. Alors que ses opérateurs semblaient promis à une large gamme d'utilisation, la pratique les qualifie de difficile à utiliser pour des résultats trop peu probants. Les longues manœuvres de nettoyage des bruits des images obtenues en sont la cause principale.

3.1 Diverses approches

Cette partie fait état d'abord d'un moyen éventuel de mesures altimétriques aéroportées. Ensuite, il s'agit de voir comment dans la pratique, des méthodes ou des considérations simples permettent une meilleure distinction des formes linéaires

3.1.1 L'altimètre laser

RITCHIE et SEYFRIED (1997) ont testé l'utilisation d'un laser aéroporté. Leur but est d'avoir un moyen de mesurer la rugosité du sol pour de grandes surfaces. Mais ils observent que les profils obtenus avec un pas de mesure de 5 cm permettent de nettement distinguer les ravines.

Il ne s'agit malheureusement que de profils topographiques, dont le nombre nécessaire pour notre zone serait gigantesque. Le sens de passage pourrait aussi gommer certaines ravines. Cette méthode n'est donc pas applicable à notre cas, mais le développement des altimètres en télédétection semble prometteur (voir aussi l'altimètre Radar, § 2.1.).

3.1.2 Deux exemples

BELHADJ-AISSA et SMARA (1993) cherchent à mettre en évidence le réseau hydrographique et les phénomènes associés sur le piémont sud de l'Atlas saharien algérien. Ils utilisent des scènes LANDSAT-TM. Les réseaux qu'ils mettent en évidence sont donc déjà assez importants, sur une zone de piémont particulière. La transposition d'une méthode qu'ils auraient appliqué est donc peu probable, mais il est intéressant de voir comment ils ont procédé.

↳ Leur première remarque concerne les conditions de prises de vue. En effet, un faible angle d'élévation du soleil accentue les phénomènes liés à la topographie, et donc la visibilité du réseau. Les scènes d'hiver sont donc préférées aux scènes d'été.

↳ L'analyse en composantes principales (A.C.P.) permet de réarranger l'information contenue dans les canaux. Ainsi, leur deuxième canal issu d'une A.C.P. fait nettement ressortir les structures linéaires. Cependant, le réarrangement issu d'une A.C.P. varie d'une image à l'autre, et encore plus d'un capteur à un autre.

↳ Ce canal (A.C.P.-2) subit l'application d'un filtre de taille 3 x 3 avec la matrice suivante :

-1	0	-1
0	5	0
-1	0	-1

L'image issue de ce traitement présente une grande netteté au niveau du réseau de drainage. En effet, ce traitement vise à faire ressortir les pixels qui ont une valeur différente de leurs voisins (en diagonale).

↳ Le calcul d'indices produit aussi des images où il peut être plus facile de distinguer les formes hydrographiques. Les indices utilisés sont l'indice de végétation normalisé NDVI et un « indice de végétation » calculé à partir des néo-canaux issus de l'Analyse en Composantes principales :

$$IV(ACP) = \frac{CP1 - CP2}{CP1 + CP2}$$

Ces indices ne mettent en valeur les formes hydrographiques qu'indirectement par la présence de végétation et donc d'humidité.

↳ Enfin, l'utilisation de compositions colorées permet de faire ressortir certains oueds. Ici, un filtre 3 x 3 moyen a d'abord été appliqué sur les canaux TM 4, 5 et 6 qui ont servi à faire cette composition.

Ils ont donc testé toute une gamme de méthodes plus ou moins empiriques, sans en valider une de façon certaine. Nous ne ferons évidemment pas les mêmes procédures, pas à pas, mais de nombreuses pistes s'ouvrent quand même à nous. D'un autre côté, cela rend encore plus improbable la possibilité d'une méthode « miracle » qui donnerait des résultats sans ambiguïté.

BIEMI *et al.* (1995) qui ont cherché à mettre en évidence d'autres formes linéaires naturelles, les failles géologiques, adoptent le même genre de démarche. Ils travaillent aussi sur des scènes LANDSAT-TM. Ils cherchent les canaux les plus intéressants en premier lieu (TM 3, 4, 5, 6 et 7), puis testent une série de méthodes de rehaussement des linéaments. A.C.P. tout d'abord, mais aussi indices (différents de ceux de BELHADJ-AISSA et SMARA), additions de canaux (TM 6 et 7), et filtres directionnels de taille 7 x 7 sont ces méthodes qui une fois encore permettent une meilleure distinction des formes linéaires, sans que les résultats soit pour autant exempts d'interprétation humaine.

On voit donc que le rehaussement de certains aspects des images satellites doivent se faire de manière tout à fait empirique. Les exemples précédents utilisent des filtres directionnels, mais pas d'autres opérateurs. Pourtant, ces opérateurs ont été développés pour ce genre d'application.

3.2 Les opérateurs morphologiques

3.2.1 Présentation des opérateurs morphologiques

FLOUZAT (1988) fait une synthèse des apports de la morphologie mathématique dans l'extraction d'informations d'une image de télédétection. Sa présentation des opérateurs est tout à fait stricte et exacte mathématiquement. Ce serait peut-être un peu aride à retranscrire ici et notre objectif est différent, c'est pourquoi nous allons en faire un bref résumé.

Ce formalisme s'explique par la notion de base de la morphologie mathématique qui est la notion d'interprétation analytique. Elle s'oppose à la méthode traditionnelle de photo-interprétation.

En effet, la photo-interprétation fait appel à des connaissances externes à l'image et la diversité des paramètres pris en compte inconsciemment (forme, couleur, texture, contraste avec le paysage) forme un tout dans l'esprit de la personne qui interprète l'image. Ces paramètres sont rarement formalisés (voir la clef d'interprétation, § 2.3.4.). L'interprétation analytique se propose d'interpréter les images comme des espaces où la distribution des valeurs (niveaux de gris) permet l'interprétation directe.

En pratique, cela consiste à déplacer un élément structurant sur l'image de forme et de taille définis par l'utilisateur. Cette « sonde » géométrique permet de calculer de nouvelles valeurs, que l'on affectera généralement au centre de la fenêtre, à partir des valeurs contenues dans toute l'étendue de cette fenêtre. Dans un S.I.G.-raster, il s'agit très généralement d'un carré de taille $n \times n$ pixels. Mais il peut en être autrement et les résultats sont fortement tributaires de la forme et de la taille choisie.

La figure 2.4. page suivante présente l'opération « fonds de vallée ». Cette opération assez complexe, mais composée de phases très simples, permet d'appréhender la morphologie mathématique. Nous avons donc une image initiale, avec des 0 et des 1 qui forment des zones homogènes, ou non. Nous cherchons à extraire la zone de 0 qui est linéaire et qui traverse la zone de gauche à droite : cela pourrait être une ravine par exemple.

La première étape consiste à dilater : à chaque pixel, nous attribuons une nouvelle valeur correspondant au maximum rencontré sur la fenêtre 3 x 3 entourant ce pixel. Tous les 0 au voisinage d'un 1 sont donc remplacés par un 1. L'opération suivante, l'érosion est l'opération inverse : cette fois-ci, c'est le minimum rencontré au voisinage du pixel central qui

donne la nouvelle valeur. L'image initiale n'est pas retrouvée, car il y a eu une perte d'information : toute la zone 0 linéaire et étroite a disparu. Il suffit donc de comparer, par soustraction, l'image obtenue à l'image initiale pour faire ressortir la zone « gommée » qui nous intéresse.

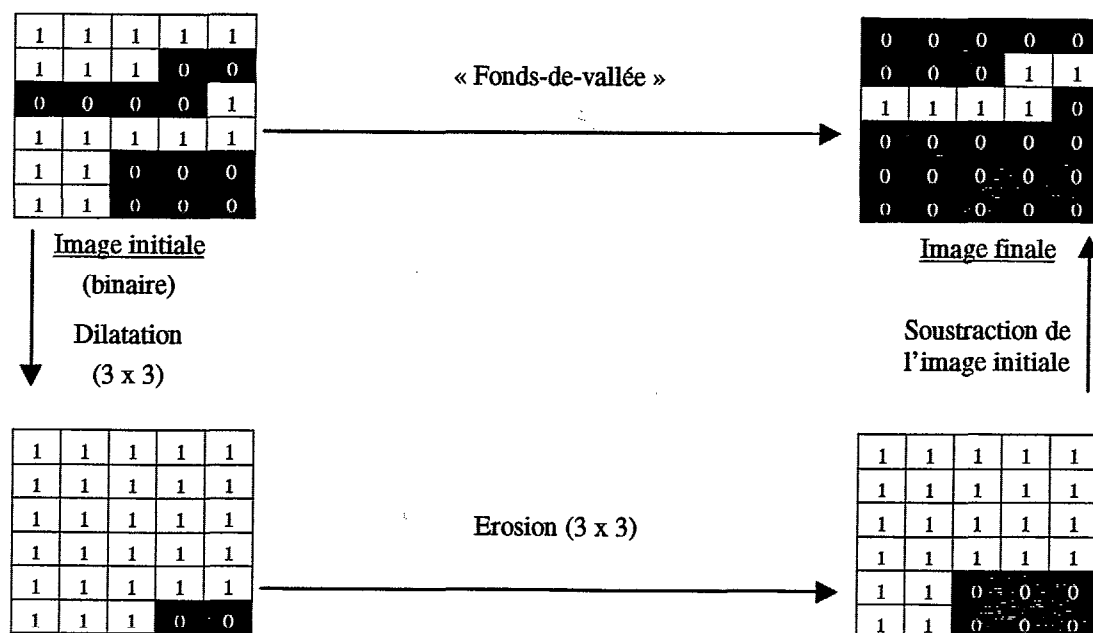


Figure 2.5 : Principe de l'opération « fonds-de-vallée »

Le schéma présente une situation idyllique et l'application sur des niveaux de gris d'une part, et sur une image naturelle d'autre part ne parviennent pas à des résultats aussi nets.

Cependant, cette opération illustre quelques points importants de la morphologie mathématique. L'application de la fenêtre (dont la taille est le paramètre essentiel) peut se faire avec des opérateurs aussi bien mathématiques que logiques ou statistiques. Les opérations dilatation et érosion sont des opérations de bases, qui, composées, donnent l'ouverture et la fermeture. FLOUZAT recense aussi les filtres morphologiques, les opérateurs d'amincissement, de squelettisation et enfin les variogrammes.

FLOUZAT conclut par les points à retenir pour les apports de l'analyse morphologique.

- Les opérateurs agissent de manière spatiale, selon l'élément structurant, mais avec peu ou pas de rapport avec les caractéristiques spectrales et temporelles.
- Ces opérateurs ne doivent pas être isolés d'autres connaissances ou principes possibles.
- Le résultat obtenu sera d'autant meilleur que la méthode fera appel à plusieurs opérateurs aux paramètres et aux propriétés bien déterminés et bien connus.

Ces principes peuvent paraître assez généraux mais il faut noter que la morphologie mathématique requiert particulièrement de la rigueur et une longue période de mise au point.

3.2.2 Extractions de formes linéaires avec ces opérateurs

DEBAINE *et al.* (1988) travaillent sur une scène LANDSAT MSS en Inde, sur une zone où ils possèdent peu d'informations sur le terrain. Ils parviennent, à l'aide de trois

procédures, à mettre en relief deux réseaux différents : un canal d'irrigation et une rivière. Je reprends en page suivante leur tableau de procédures.

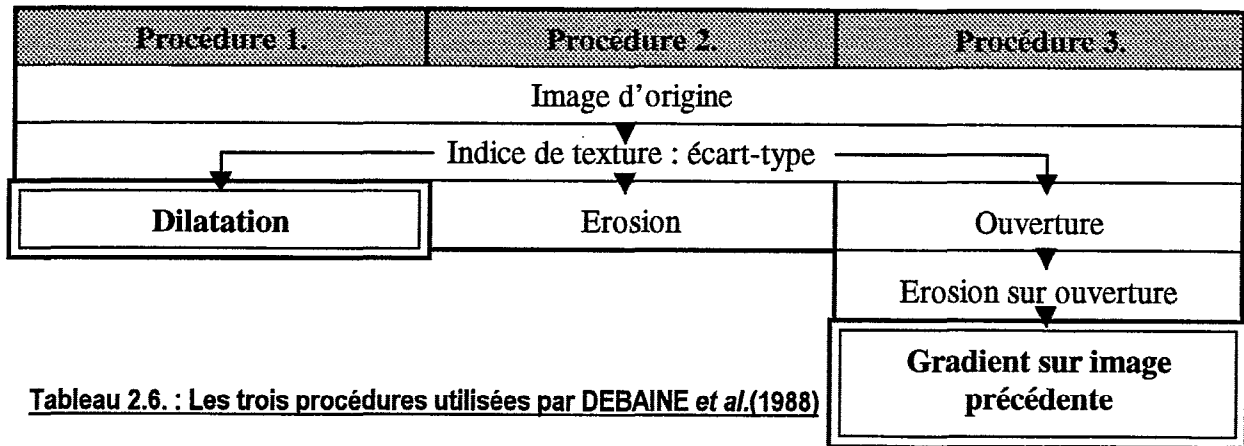


Tableau 2.6. : Les trois procédures utilisées par DEBAINE *et al.*(1988)

Les procédures 1 et 3 donnent les meilleures images. La validation de ces images s'est faite à la fois sur le détachement des réseaux par rapport au fond de carte, mais aussi selon la distinction entre les deux réseaux. Nous pouvons encore voir, illustrés par cet exemple, les tâtonnements induits par l'utilisation de la morphologie mathématique.

Un deuxième exemple présente une thématique humaine (villes, routes) mais il est intéressant par l'utilisation de scènes SPOT. DESTIVAL (1988) présente ses travaux en deux parties : l'extraction et le traitement du bruit.

L'extraction est faite par des opérateurs du type « chapeau haut-de-forme » plus ou moins modifiés. Il s'agit de l'opération contraire de « fonds-de-vallée », les routes étant plus brillantes que les champs alentours. Nous ne l'explicitons donc pas d'avantage. Par contre la partie traitement du bruit est intéressante à plus d'un titre.

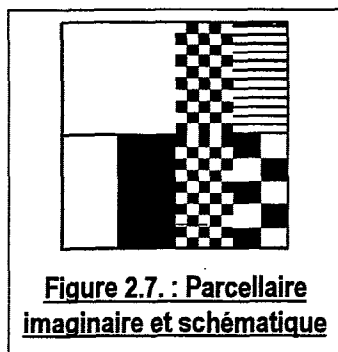
Tout d'abord, le bruit représente un des inconvénients majeurs de ces opérateurs. Une phase de nettoyage est donc indispensable. DESTIVAL présente une suite d'opérateurs. Seuillage pour le plus simple, graphe perceptuel (dilatation puis squelettisation pour des réseaux qui sont apparus par intermittence), squelettisation simple, ébarbulage et raccordements « intelligents ».

DESTIVAL présente volontairement, et cela se ressent aussi au niveau de cette synthèse bibliographique, une « boîte à outils ». Pour l'instant, il n'existe pas de procédure type, et les pistes données devront être fortement adaptées aux images et à la recherche de ravines.

3.2.3 Problèmes du milieu naturel

Enfin PUECH (com. pers.) considère les limites de la morphologie mathématique liées à la notion d'interprétation analytique. En effet, l'esprit humain est beaucoup plus capable d'extraire des formes ou des objets sur une image que ne le peut n'importe quel algorithme à ce jour. Quand l'œil détecte un linéaire, cela ne correspond en effet pas forcément à un pic radiométrique, ou à un passage d'une zone homogène à une autre zone homogène.

Sur la figure 2.5., l'œil parvient sans peine à déterminer des zones homogènes, des limites, bref « un parcellaire ». Cependant, la diversité de nature des limites pose déjà un sérieux problème en terme d'interprétation analytique.



La différence de texture ne suffit pas, d'autres opérateurs donneront vite la limite noir/blanc qui ne convient pas non plus...

C'est un exemple un peu simple et des opérateurs morphologiques bien programmés parviendraient sans doute à un résultat correct.

Mais, sur une photographie aérienne ou satellite, il ne s'agit pas de codage binaire, et la répartition est beaucoup chaotique. Les formes naturelles (comme les ravines) ont aussi un parcours erratique qui complique l'application de ces outils.

L'extraction d'un linéaire dans la bibliographie apparaît un peu comme un recensement d'outils aux noms et propriétés peut-être mal-connus. Les ravines posent donc un problème et en pratique, il faudra choisir soigneusement le support de base, les améliorations possibles et les places respectives de l'extraction automatique et de l'interprétation humaine.

Le travail de synthèse bibliographique ayant été fait, l'inventaire des mares peut commencer avec d'abord le choix des données et de la méthode.

Chapitre 3 :

Choix des données et de la
méthode

Avant de pouvoir présenter et discuter des résultats, il est absolument nécessaire de connaître tous les paramètres qui ont conduit à leur production. L'exposé du travail d'inventaire est donc l'objet de ce chapitre.

Nous verrons ce qui a conduit à choisir les données et la méthode de travail. Ensuite, la mise en œuvre pratique fut loin de correspondre à un idéal théorique, nous décrirons donc ses différentes étapes. Enfin, il est apparu nécessaire d'appuyer l'inventaire par des descripteurs des mares détectées. Le mode d'obtention de ces descripteurs sera précisé.

1 CHOIX DES DONNÉES

Par souci de clarté, le choix des données et celui de la méthode sont dissociés dans ce mémoire. Il va de soi que les deux choix sont liés. Les données, principalement par leur disponibilité, mais aussi par leur pertinence, ont été choisies de façon légèrement antérieure et décisive par rapport au choix de la méthode. C'est pourquoi nous les dissociations en privilégiant d'abord les données.

1.1 Quel support ?

Trois supports étaient disponibles et envisageables pour cet inventaire. Il s'agit de cartes topographiques, de photographies aériennes et d'images satellites (cf. annexes 2). Une simple visualisation va donner de précieuses indications. Chaque support sera ensuite envisagé et discuté.

1.1.1 Visualisation

Une première étape, simple mais instructive consiste à simplement regarder les trois supports envisagés. Nous reproduisons donc page suivante, sur une zone de 900 m x 1200 m comprenant la mare de Wankama (dont le bassin-versant sert au calage du modèle hydrologique) :

- Un extrait de la carte topographique au 1/50 000^{ème} numérisée (Ed. 1997).
- Une photographie aérienne de 1992.
- Une composition colorée de la scène SPOT-XS du 20 août 1992.

Cet extrait comporte trois mares, une route (R.N.25) et le village de Wankama. Comment les présenter et les identifier sur ces trois extraits ?

Pour la route et le village, n'importe lequel des trois supports suffira. En effet, la route est similaire dans les trois extraits, c'est la ligne droite de direction O-S-O - E-N-E qui coupe les trois images dans leur moitié supérieure (rouge sur la carte, gris foncé sur la photographie aérienne et discontinuité bleutée sur la composition colorée). Le village est entouré d'une limite rouge sur la carte et se présente sous la forme d'un amas hétérogène de pixels très contrastés, du noir au blanc sur la photographie aérienne, et du rouge au kaki pour la composition colorée.

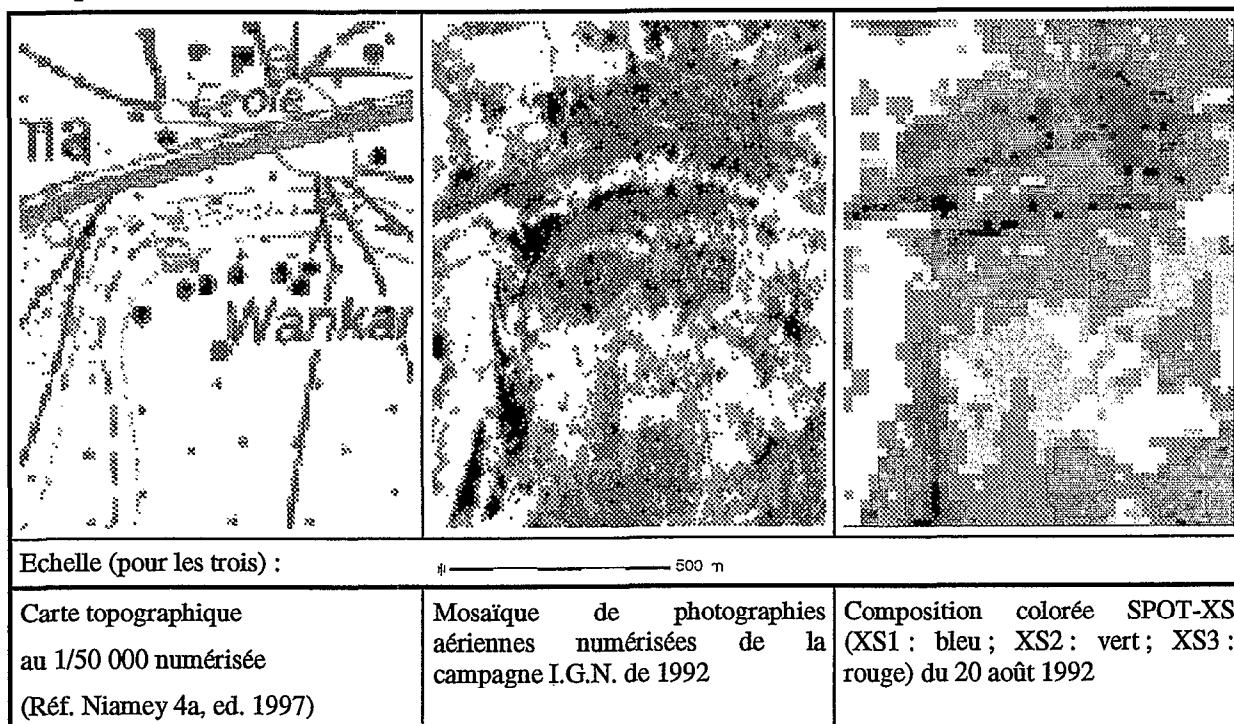


Figure 3.1. : Comparaison des trois supports par simple visualisation

Pour les mares, par contre, il est préférable d'utiliser la composition colorée où nous pouvons voir les trois mares comme des zones homogènes de couleur bleues-vertes. La mare de Wankama étudiée est celle située le plus au sud et a une forme allongée Nord-Sud. Sur la photographie aérienne, elle apparaît indistinctement comme une zone sombre. Sur la carte topographique, le tireté bleu renvoie en légende à un cours d'eau intermittent.

La mare « du village », au sud de celui-ci et de forme allongée d'est en ouest, est présente sur les trois supports : zone sombre avec une tache plus claire sur la photographie aérienne, et points bleus sur la carte renvoyant à la légende « étang, mare temporaire, zone humide ».

La dernière mare est une mare de route, à savoir une mare d'accumulation dans un creusement dont les déblais ont servi à remblayer la route proche. Elle est située à l'ouest du village et au nord de la route. De forme ronde, elle se voit très bien sur la composition colorée, alors que sur la photographie aérienne, le blanc prédomine, et qu'il n'y rien de particulier sur la carte topographique.

Bien sûr, les mares de routes sont peu intéressantes, cet extrait n'est pas forcément très représentatif, une composition colorée ne résume pas forcément toutes les possibilités de la télédétection satellitaire et il existe une certaine complémentarité entre les trois supports.

Mais dans l'optique de sélectionner une seule source comme base de travail d'inventaire des mares, l'utilisation du satellite se démarque déjà. Quelques considérations supplémentaires générales sur les trois supports permettent de le confirmer.

1.1.2 Cartes topographiques

La cartographie de la zone est disponible sous la forme d'une carte au 1/200 000^{ème}, éditée en 1980 qui couvre le degré-carré d'HAPEX-Sahel (cf. Chap. 1 § 2.1.1), donc largement suffisant pour notre zone, et de cartes au 1/50 000^{ème} qui forment une mosaïque couvrant, elle-aussi, l'ensemble de la zone. Les cartes sont disponibles sur support papier uniquement, à l'exception d'une zone de 1 100 km² couvrant une partie de l'est de la zone. En effet, sur cette zone, un assemblage de quelques cartes au 1/50 000^{ème} est disponible sous forme numérique, dans la base de données SIG-HAPEX sous GRASS.

Les cartes au 1/50 000^{ème} sont issues de différentes éditions depuis 1964 jusqu'aux plus récentes. Sans avoir besoin d'étudier précisément la précision et la pertinence des informations de ce support, un simple constat l'a éliminé d'office comme source principale d'informations pour l'inventaire. En effet, le Kori de Dantiandou y est symbolisé comme un cours d'eau temporaire (tirets bleus) sur quasiment toute sa longueur. Les mares, si elles sont nettement dessinées sur les plateaux, ne sont donc pas inventoriées dans le Kori. Or, les mares de Kori sont les plus importantes en terme de recharge de la nappe, et les plus « recherchées » pour cet inventaire. C'est le cas par exemple de la mare très suivie de Wankama (cf. § précédent).

De plus, ce sont des cartes topographiques et la thématique hydrologique n'y est que secondaire, et ne correspond pas toujours à des critères de repérage topographique.

1.1.3 Photographies aériennes

Les photographies aériennes ne couvrent qu'une partie de la zone et coûtent cher à l'acquisition. Elles ne pouvaient donc que servir d'auxiliaires à l'inventaire. Cependant, même si nous avons eu accès à l'ensemble de notre zone sur ce support, ses qualités n'en font pas un outil très performant pour la détection des mares.

En effet, les photographies aériennes sur papier datent de 1975. L'information qu'elles contiennent est donc susceptible d'avoir changé depuis. Quant à la couverture NASA réalisée à l'occasion d'HAPEX-Sahel, en 1992, elle est de mauvaise qualité notamment par les grandes déformations de chaque prise de vue.

De plus, la détermination des mares sur ces photographies est très difficile : parfois éclairées par le soleil et donc brillantes, parfois encaissées et donc très sombres, nous avons seulement réussi à retrouver des mares que nous connaissions par ailleurs.

Il en résulte qu'une extraction un tant soit peu automatisée des objets « mares » à partir de ce support présente des difficultés importantes, voire insurmontables.

1.1.4 Images satellites

Le Sahel est un milieu qui se prête extrêmement bien à la télédétection satellitaire. La quasi-absence de relief, ainsi qu'une végétation peu diversifiée dans ses formes expliquent ce constat.

Une caractéristique favorable plus sujette à caution est l'absence de nébulosité une grande partie de l'année. Nous aurons l'occasion d'y revenir, mais la saison des pluies est

malheureusement souvent la plus intéressante : la végétation, l'occupation des sols, et évidemment l'hydrologie sont des thématiques liées à la saison des pluies. La nature des précipitations (ciel de traîne, cf. § 1.2.2) donne lieu à une nébulosité suffisamment importante mais surtout persistante pour gêner les observations.

Si les capacités satellitaires peuvent être remises en question pour le problème de découpage du paysage et de détection des linéaires, les connaissances et les précédents bibliographiques (utilisation du NDVI, cf. Chap. 2 §2.2.1) pour les questions d'inventaires de surfaces en eau font état d'une efficacité au moins satisfaisante.

La télédétection satellitaire servira donc de base à l'inventaire des mares. Cependant, la disponibilité immédiate de scènes SPOT-XS de 1992 n'imposait pas forcément ce capteur. En effet, sa pertinence ainsi que celle de l'acquisition de données issues d'autres capteurs font l'objet du paragraphe suivant.

1.2 Quel capteur ?

Ce paragraphe complète la réflexion engagée dans la synthèse bibliographique. Celle-ci avait en effet déjà presque conclu en faveur de SPOT-XS. Nous nous attacherons ici plus à la pertinence du capteur par rapport à l'objet mare.

1.2.1 Résolution spatiale

Le premier critère est de taille, puisqu'il s'agit de la superficie des mares recherchées. PUECH (1994) considère qu'à l'aide de SPOT-XS, toutes les mares de plus de 0,25 ha sont détectées puisque le capteur de résolution 20 x 20 m² obtiendra au moins un pixel pur.

DESCONNETS (1994) dans son inventaire partiel sur le terrain relève des superficies de mare de l'ordre de 0,5 ha à 30 ha. Mais les mares ne sont pas forcément circulaires. Elles sont même plutôt de forme allongée dans le lit du Kori. Etant donné que toutes les mares sont intéressantes pour le modèle, la résolution spatiale de SPOT-XS apparaît donc comme un minimum. Les satellites à orbite lointaine sont d'office éliminés, NOAA-AVHRR en premier avec sa résolution de 1,1 x 1,1 km². La résolution de LANDSAT-TM (30 x 30 m²) reste raisonnable : selon le même raisonnement que PUECH, toutes les mares de plus de 0,5 ha seraient alors détectées, à condition qu'elles fassent plus de 70 m de large.

1.2.2 Résolution spectrale

LANDSAT-TM possède 7 canaux contre 3 seulement pour SPOT-XS (sauf SPOT-4 qui aura un canal Moyen-Infra-Rouge supplémentaire à partir de 1999). L'avantage est donc net pour LANDSAT-TM. Cette abondance est-elle nécessaire pour l'inventaire des mares ?

S'il est sûr qu'un plus grand nombre de canaux permet de tester plus de moyens de discrimination de l'objet recherché, une seule méthode efficace nous suffit. Or, la bibliographie nous a fourni une méthode performante pour SPOT-XS.

En fait, le choix se fait en fonction de ce que l'on veut privilégier. Si les mares avaient été des objets plus grands, nous aurions sans doute favorisé la résolution spectrale. Mais celle-ci ne justifie pas l'abandon des mares les plus petites, alors qu'elles sont détectables a priori avec SPOT-XS.

1.2.3 Disponibilité

Le dernier point qui a fortement fait pencher la balance en faveur de SPOT-XS est sa disponibilité. L'expérience HAPEX-Sahel a en effet rendu immédiatement disponible des scènes SPOT-XS couvrant la zone datant de 1992. Or, la disponibilité de ces scènes se traduit évidemment en terme de coût, mais aussi en terme de temps.

La durée du stage était relativement limité. En cas d'acquisition de nouvelles données, le temps que ces données arrivent au laboratoire et soient importées dans GRASS aurait été un sérieux handicap. De plus, les scènes SPOT possédaient un niveau de qualité et de correction (1B et atmosphérique, cf. annexe 3) qui les rendaient beaucoup plus rapidement opérationnelles que des données brutes.

La disponibilité et le choix de favoriser la résolution spatiale par rapport à la résolution spectrale ont donc conduit à sélectionner les scènes SPOT-XS acquises lors de l'expérience HAPEX-Sahel.

Sur la zone, plusieurs dates couvrant la saison 1992 étaient disponibles. Nous avons donc dû faire une sélection.

1.3 Quelles dates ?

1.3.1 Le disponible et le requis

Les scènes disponibles se trouvaient sur le serveur Web d'HAPEX¹ pour y trouver les images inventoriées dans l'annexe 2.2. Pour le KJ 062-323 (code de la « région SPOT » correspondant à la zone), sept dates depuis le 18 juin jusqu'au 21 novembre 1992 composaient l'éventail dans lequel le choix devait être fait.

Quant au requis, nous aurions pu ne traiter qu'une scène. Cependant, des considérations supplémentaires nous ont fait choisir trois scènes comme base de travail. D'abord, l'espace disque pour enregistrer ces scènes était sinon infini du moins largement suffisant. Il n'y avait donc pas de restrictions de ce côté-là.

Ensuite, les mares varient beaucoup dans le temps par le jeu de l'infiltration, de l'évaporation et des précipitations. De plus, pour les mares de petite taille, l'application de la grille d'échantillonnage du capteur change d'une date à la suivante. Une mare pouvait donc être absente d'une scène et présente à une date différente.

Enfin, l'opposition majeure à une extraction aisée des mares venait du fait que le capteur pouvait confondre les mares et les cuirasses latéritiques. Or celles-ci pouvaient aussi changer d'aspect d'une scène à l'autre, principalement selon leur humidité.

Nous avons donc choisi de sélectionner trois scènes sur les sept possibles en 1992. Nous ne cherchions pas à faire une étude diachronique, au sens où j'aurais extrait les mares selon des critères d'évolution temporelle. Mais l'acquisition de ces trois scènes correspondait plutôt au nombre suffisant pour pouvoir recouper les informations.

1.3.2 Dates de prise de vue et saison des pluies

Pour choisir trois dates, et en accord avec les arguments du paragraphe précédent, nous nous sommes basés sur la pluviométrie de 1992. Une synthèse et le détail de tous les

¹ <http://www.orstom.fr/hapex/>

événements observés sur le degré-carré d'HAPEX (10 000 km²; 111 pluviographes) sont fournis par TAUPIN *et al.* (1993) à l'occasion du programme EPSAT-Niger.

Nous avons utilisé les données relatives au bassin-versant de Wankama qui se situe dans la zone. En effet, TAUPIN *et al.* font état d'événements qui n'ont pas affecté la zone d'étude. Ils recensent 50 épisodes (pour un cumul annuel moyen estimé de 513 mm) dont le premier date du 10 avril. Alors que le pluviomètre du bassin-versant de Wankama n'enregistre que 21 événements (cumul : 491 mm) et le premier enregistrement date du 23 juin.

La distribution temporelle des pluies enregistrées à Wankama est mise en correspondance avec les dates de prise de vue SPOT sur la figure 3.2. ci-dessous. Nous recherchons le moment où les mares sont le plus visibles. La date de la dernière pluie avant la prise de vue conduira donc notre choix.

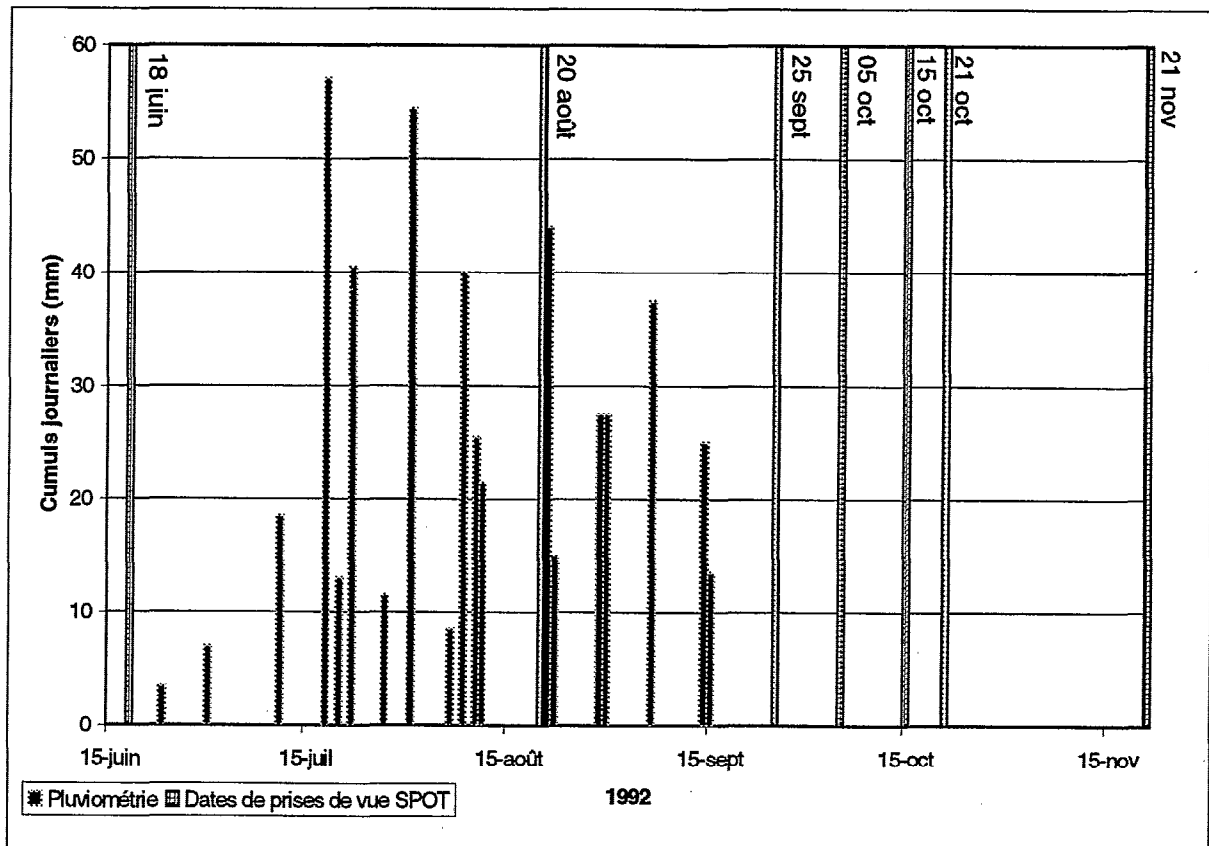


Figure 3.2. : Pluies à Wankama et scènes SPOT-XS disponibles

La scène du 18 juin précède la saison des pluies. Sachant que les mares les plus persistantes sont en eau seulement jusqu'au mois de janvier, cette date est exclue d'office. A l'opposé, la scène du 20 août est à prendre en priorité. C'est la seule à être prise durant la saison des pluies et de plus, c'est la scène la plus proche d'un événement (11 août).

La scène du 25 septembre présente des avantages similaires, mais moindres. Le dernier événement de la saison des pluies a lieu le 15 septembre et n'est pas bien important. En revanche, le fait d'avoir la première scène après la saison de pluies permettra peut-être d'obtenir uniquement des mares importantes et non tous les lieux de concentration de ruissellement très temporaires.

Il reste une scène à choisir parmi celles qui sont prises relativement longtemps après la dernière pluie. Il faut alors considérer quelques arguments supplémentaires.

1.3.3 Restriction finale

D'abord, les différentes scènes ne couvrent pas la même étendue. Le centre et la taille de l'image changent à chaque prise de vue. Certaines scènes sont donc plus appropriées que d'autres de ce point de vue. Il s'agit des dates du 5 octobre et du 15 octobre. En revanche, la scène du 21 novembre est trop décalée vers le sud.

Ensuite, nous nous appuyons sur la méthode de traitement envisagée. Nous avons étudié la forme des histogrammes de répartition des valeurs du NDVI pour différentes scènes. Il en ressort que cet histogramme se ressert particulièrement rapidement après la saison des pluies. La carte NDVI devient donc pauvre en informations et la discrimination en sera rendue plus dure.

A l'aide de ces nouvelles considérations, nous avons donc fini par sélectionner la date du 5 octobre comme ultime scène. Nous avons donc privilégié le fait de pouvoir multiplier la « même » information plutôt que d'avoir une évolution à long terme qui semble pauvre d'enseignements.

Enfin, les autres dates restent disponibles et nous pouvons toujours choisir d'y recourir si nous estimons que c'est nécessaire. Le seul frein à de nouvelles acquisitions concerne la difficile et peu efficace procédure de correction et de géoréférencement qui est explicitée dans le paragraphe suivant.

1.4 Procédure de rectification

Les images disponibles ne sont pas correctement géoréférencées, une étape de rectification géométrique est donc nécessaire, mais de grandes imprécisions en découlent.

1.4.1 Constat

L'annexe 2.3 donne les détails du niveau de qualité des images initiales. Il est relativement élevé, mais ne suffit pas. Le niveau 1B correspond en effet à des corrections radiométriques, à la prise en considération des conditions de prise de vue (angle, position du satellite...) mais pas aux corrections géométriques nécessaires à l'application de l'image dans une projection cartographique. Si le centre de l'image était correctement géoréférencé, toute l'image n'était pas dans ce cas et cela de manière de plus en plus remarquable vers les bords.

Deux inconvénients majeurs découlent de cet état de fait et ont d'ailleurs permis de le détecter. D'abord, l'intégration à la base SIG-HAPEX ne se faisait pas bien. La comparaison avec les photographies aériennes ou avec la carte au 1/50 000^{ème} numérisées mettait en évidence des décalages parfois importants (jusqu'à plusieurs centaines de mètres).

Ensuite, la juxtaposition de deux scènes différentes ne permettait pas de faire coïncider des pixels ou des zones de pixels de toute évidence semblables.

Il fallait donc corriger la géométrie de ces images.

1.4.2 La procédure de rectification sous GRASS

Deux commandes permettent de réaliser cette opération. Elles servent en principe à passer d'un système de coordonnées à un autre. La première, *i.points*, est relativement simple. Il s'agit de désigner un point sur l'image à corriger et de donner les coordonnées correctes ou de pointer le point correspondant sur une image bien géoréférencée. Une matrice de transformation est ainsi créée avec *n* points.

Ensuite, il faut déterminer l'ordre des polynômes de transformation. Pour prendre l'exemple le plus simple, les équations de rectification linéaire se présentent sous la forme :

$$\begin{cases} x' = ax + by + c \\ y' = Ax + By + C \end{cases}$$

avec $\{x', y'\}$: nouvelles coordonnées
 $\{x, y\}$: anciennes coordonnées
 (a, b, c, A, B, C) : coefficients déterminés par *i.rectify* ou *i.rectify2*.

En théorie, le nombre de points requis dépend de l'ordre des polynômes de transformation : 3 pour une transformation linéaire, 6 pour l'ordre 2. Mais dans la pratique, ce nombre doit être dépassé pour obtenir de meilleurs résultats. Ainsi, l'aide de GRASS conseille 15 points pour l'ordre 1. Si une transformation linéaire est peu précise, elle effectue une correction semblable sur l'ensemble d'une scène. Par contre, une transformation avec des polynômes d'ordre supérieur augmente les risques de surcorrection, notamment en bordure d'image ou dans des zones pauvres en points de repères.

1.4.3 La stratégie de rectification

Le problème majeur qui s'opposait a priori à une bonne correction de ces scènes provient du fait que la base de données correctement géoréférencées ne couvrait qu'une partie de la zone et donc qu'une faible partie des scènes SPOT (cf. annexe 2.4). Nous ne pouvions donc pas prendre des points de référence sur l'ensemble d'une scène.

D'autre part, la carte au 1/200 000ème était tracé selon une projection Clarke 1880. Alors que la base GRASS fonctionne selon la projection de Mercator Transverse Universelle (MTU ou UTM en anglais), zone 31. Il en résulte que la précision des coordonnées d'un point de la carte, relevé manuellement, puis converti dans une autre projection, ne satisfaisait pas aux exigences de la rectification.

Un autre aspect du problème concerne les objectifs de cette rectification. En effet, le but premier était de pouvoir travailler sur les trois scènes en superposition parfaite, pixel sur pixel.

Nous avons donc choisi de rectifier une première scène en nous servant de la base préexistante et correctement géoréférencée. Nous avons choisi celle qui couvrait la plus grande étendue : la scène du 5 octobre 1992. De plus, nous n'avons appliqué qu'une correction linéaire afin de ne pas déformer l'image en dehors de la zone du SIG-HAPEX.

Les deux autres scènes ont donc été rectifiées en prenant pour référence la scène du 5 octobre corrigée. Nous avons alors utilisé des polynômes d'ordre 2, après avoir rejeté les transformations linéaires insuffisantes.

1.4.4 De grandes imprécisions

Les rectifications sont loin d'être parfaites. Si *i.rectify* permet seulement d'appliquer une correction linéaire, il associe cependant une appréciation de l'erreur, via la production d'une RMSE : « Root Mean Square Error ». Ce n'est pas le cas d'*i.rectify2*, en l'absence d'un module, et nous avons donc dû parcourir nos points de référence pour apprécier les erreurs commises lors des corrections d'ordre 2.

Elles étaient inacceptables en l'état et nous avons donc choisi de privilégier la zone d'étude en ne prenant de points de référence que dans celle-ci. Les erreurs de localisation sont alors devenues de l'ordre du pixel avec des maximums à deux pixels (40 m) dans la zone d'étude et bien plus importantes en dehors.

La figure 3.3. montre bien les travers de l'application d'un polynôme d'ordre 2 pour la rectification. Cependant, si les points situés à l'extérieur de la zone d'étude avaient été pris en compte, les erreurs de localisation n'auraient plus été acceptables (jusqu'à 100 m). Nous pouvons cependant remarquer que le point qui se situe à 330 m de sa réelle localisation se situe dans le Dallol Bosso, soit à une altitude inférieure de 60 m par rapport au reste de la scène. Cela permet d'expliquer en partie un écart aussi important (la topographie influence beaucoup la géométrie et même la radiométrie des images satellites).

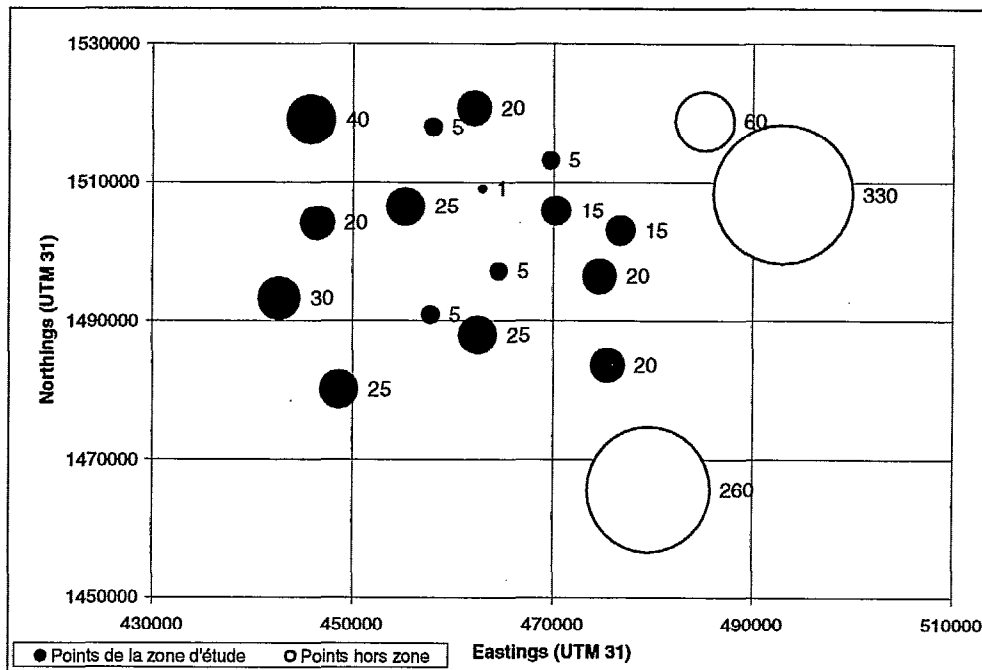


Figure 3.3. : Estimations des erreurs de localisation en mètres dans (noir) et hors (blanc) la zone d'étude pour la scène du 25 septembre 1992

Ces imprécisions dans la procédure de rectification auront évidemment des conséquences. La détection des mares les plus petites surtout s'en trouvera largement handicapée et il faudra y remédier dans la méthode d'extraction.

Trois scènes SPOT-XS serviront donc de base de travail. Ces données ont été choisies puisqu'elles étaient facilement disponibles, elles avaient une résolution spatiale excellente, et la résolution spectrale était suffisante pour appliquer une méthode trouvée dans la bibliographie. Par contre, la répartition temporelle de ces données, par rapport à la saison des pluies, ainsi que la procédure de rectification géométrique se sont révélées peu satisfaisantes et constituent de sérieux obstacles à la validation des résultats finaux.

La méthode qui restait à déterminer devait alors compenser ces problèmes.

2 CHOIX DE LA MÉTHODE

Avant de nous décider à employer l'indice de végétation NDVI, nous avons expérimenté quelques pistes ; des méthodes simples ou légèrement complexes mais normalement efficaces pour inventorier les surfaces en eau. De plus, une petite étude thématique et de vérification de la théorie sous-jacente à l'application du NDVI a précédé les premiers tests de pertinence du NDVI qui ont annoncé les premiers problèmes.

2.1 Les méthodes « classiques »

Il s'agit des essais, qui ont été faits avant même d'avoir complété la bibliographie. Nous n'exposerons pas longtemps la procédure des méthodes. Nous ne nous intéressons qu'à la base théorique et aux constats d'échec. Lorsque la synthèse bibliographique et les diagrammes XS2/XS3 ont été effectués, l'explication de l'échec de ces méthodes est devenu évident. Ces méthodes sont néanmoins exposées car elles ont constitué la première approche dans le choix de la méthode.

2.1.1 Le canal Proche Infra-Rouge (PIR)

C'est la méthode la plus simple. L'eau absorbe jusqu'à 80% du rayonnement du proche infrarouge. C'est une caractéristique unique pour les objets naturels. Le canal XS3 devrait rendre compte de cette anomalie et l'extraction des surfaces en eaux se fait facilement sous nos climats en sélectionnant les valeurs les plus faibles de ce canal.

Pendant, les valeurs les plus faibles de XS3 pour les trois scènes de travail correspondent aux mares connues, mais aussi à un grand nombre d'autres objets. Ainsi, les plateaux, et plus particulièrement leurs bordures, ont des valeurs égales à celles déterminées dans les mares connues.

La conclusion s'impose : le comportement radiométrique dans le PIR des mares diffère de celui de l'eau.

2.1.2 Les hyperboîtes

Si un seul canal radiométrique ne suffit pas à discriminer les mares, deux ou trois canaux, par combinaison de leurs informations, devraient y arriver. Cette méthode et la suivante s'appuient sur ce raisonnement.

La méthode des hyperboîtes consiste à fixer des valeurs repères pour chaque canal. Entre ces valeurs, il s'agit de l'objet recherché, en dehors, il s'agit d'autre chose. Dans l'espace à trois dimensions formé par les trois canaux, ces limites hautes et basses déterminent des parallélépipèdes, les « hyperboîtes ».

Le constat est le même que pour la première méthode : nous n'arrivons pas à déterminer des valeurs qui extraient les mares et seulement les mares. Les bordures de plateaux ont des valeurs similaires à celles des mares pour les 3 canaux SPOT.

2.1.3 Les classifications supervisées.

Elles consistent à échantillonner des zones thématiques de la scène (végétation, plateau, jachère, sol nu, bas-fond... et mares) afin d'en relever les signatures radiométriques. La deuxième étape est automatisée : un algorithme mesure la distance (l'équation dépend du

programme) entre chaque pixel et les différentes signatures. Les pixels sont ensuite affectés à la catégorie la plus « proche ».

En fait, cette dernière méthode de classification (avec l'algorithme maximum de vraisemblance) a servi à cartographier les états de surface sur une partie de notre zone. Or cette cartographie comportait une catégorie « eau libre ». L'examen des surfaces attachées à cette catégorie est mitigé. La plupart des mares connues sont bien cartographiées mais des anomalies (essentiellement, quelques pixels en bordure de plateau) et quelques lacunes sont apparues.

Cette cartographie ne visait pas de toute façon à inventorier les mares. Nous aurions pu réemployer cette méthode, avec des résultats sans doute comparables à ceux que nous avons obtenus. Mais sa mise en œuvre est longue et compliquée dans la mesure où l'échantillonnage doit être mené avec une grande précision et la meilleure connaissance du terrain possible. De plus, mais nous aurions pu y remédier si nécessaire, les commandes GRASS qui permettent d'effectuer ces cartographies sont particulièrement peu conviviales et inefficaces.

Ces méthodes pourraient aboutir au résultat. En effet, la séparation utilisant le NDVI pourrait aisément être simulée par une classification supervisée. Cependant, il s'agit alors d'une masse de travail inutile pour le but recherché puisque le NDVI est plus simple d'emploi et possède d'autres avantages que nous verrons par la suite.

La bibliographie doit cependant être vérifiée. La suite présente cette vérification en deux points : la vérification de l'idéal théorique et l'apparition des premiers problèmes.

2.2 Un problème simple en théorie

L'échec des méthodes « classiques » nous permet de lire de manière plus critique ce paragraphe. En effet, le travail relaté ici et les résultats donnent l'impression que le travail d'inventaire des mares se fera facilement.

Nous avons simplement regardé mes scènes SPOT et décrit la distribution des valeurs pour des objets largement apparents. Nous avons ainsi construit une distribution selon XS2 et XS3, puis nous en avons extrait des signatures radiométriques pour les comparer aux signatures spectrales trouvées dans la bibliographie.

2.2.1 Le diagramme XS2 / XS3

Pour construire ce diagramme, nous avons sélectionné sur la composition colorée de la scène du 25 septembre 1992 des zones homogènes où il était évident que tous les pixels appartenaient à une même catégorie. La nature du terrain associée à ces catégories est définie par la carte topographique (bordure de plateau, par exemple) ou par d'autres informations de connaissance du terrain (mares).

Le diagramme XS2 / XS3 est une construction très utile en télédétection dans la mesure où la majeure partie de l'information se retrouve ainsi contenue dans un seul graphique. En effet, les canaux XS1 et XS2 étant très corrélés, deux axes suffisent pour décrire les zones et envisager une discrimination.

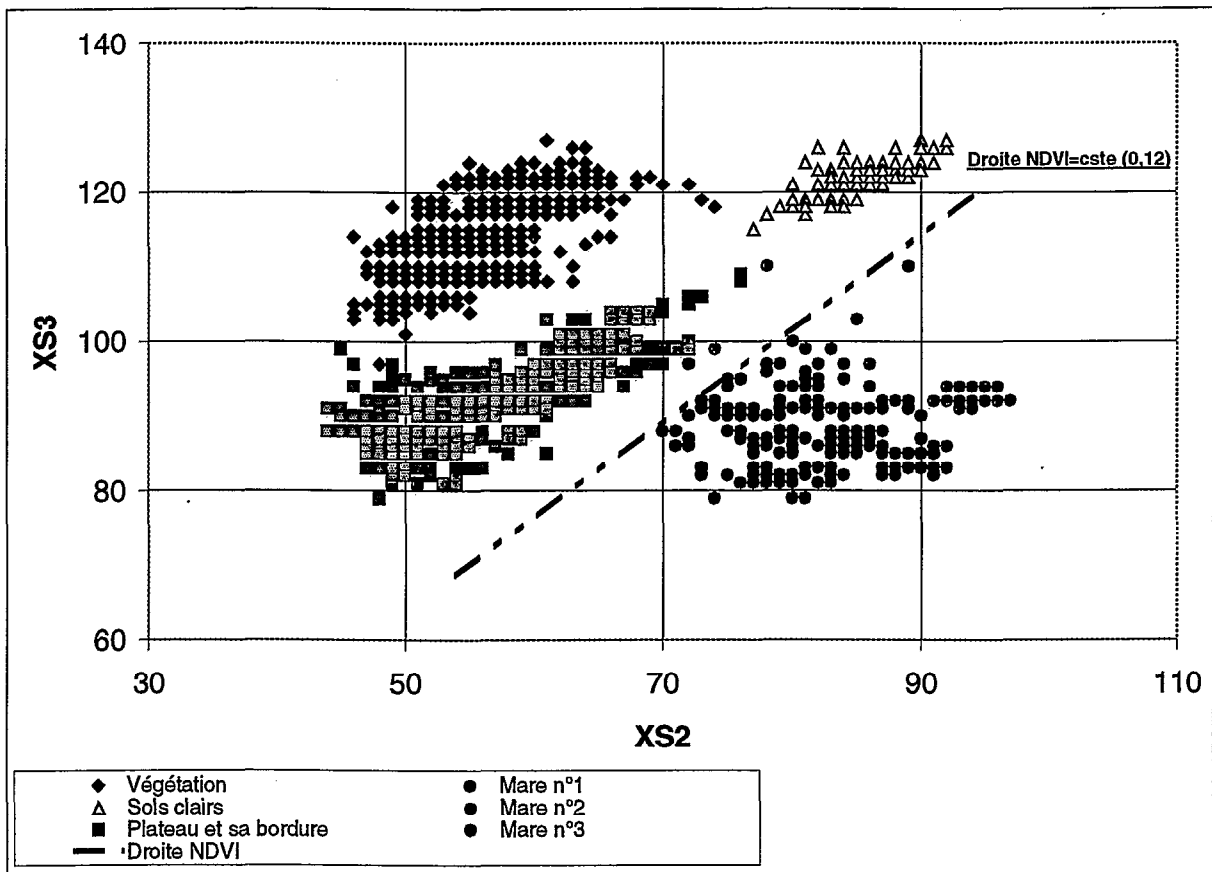


Figure 3.4. : Diagramme XS2/XS3 de quatre catégories d'objets (scène du 25 / 09 / 92)

Ce diagramme apparaît donc comme un cas de figure idéal, mais cet idéal doit beaucoup à la façon dont nous l'avons construit : les couleurs de la composition colorée sont directement issues des valeurs XS1, XS2 et XS3. Or, nous avons relevé les points de ce diagramme sur des zones de couleur semblable. Il est donc logique que les valeurs ainsi sélectionnées forment des groupes homogènes et bien distincts.

Il permet cependant de positionner la problématique de détection et de valider les hypothèses de PUECH (1994). En effet, nous pouvons remarquer plusieurs choses :

↳ Les mares ne peuvent être extraites selon le seul axe XS3. Par contre, elles se différencient nettement avec les deux axes.

↳ La limite entre les mares et les bordures de plateau et les sols clairs se tracerait en première approximation par une droite de pente positive. Or, un NDVI constant se représente sous la forme d'une telle droite :

$$\text{NDVI} = \frac{\text{XS3} - \text{XS2}}{\text{XS3} + \text{XS2}}$$

$$\text{d'où } \text{XS3} = \text{XS2} \left(\frac{1 + \text{NDVI}}{1 - \text{NDVI}} \right) = k \cdot \text{XS2}$$

avec k positif ($-1 < \text{NDVI} < 1$).

Nous avons donc représenté une telle droite sur ce diagramme. La valeur choisie est ici arbitraire, mais en fait nous avons utilisé une valeur proche de celle que nous utiliserons en pratique.

2.2.2 Les signatures radiométriques

Les signatures spectrales (cf. Chap.2 § 2.2.1) représentent les comportements des matériaux d'après des mesures complètes sur des matériaux « purs ». Les signatures radiométriques sont l'équivalent des signatures spectrales mais elles sont extraites de la scène étudiée. Les signatures radiométriques représentent donc le comportement spectral moyenné sur la largeur d'une bande (XS1, 2 ou 3). Il s'agit donc d'une discrétisation des signatures spectrales, mais qui permet quand même une comparaison et quelques conclusions.

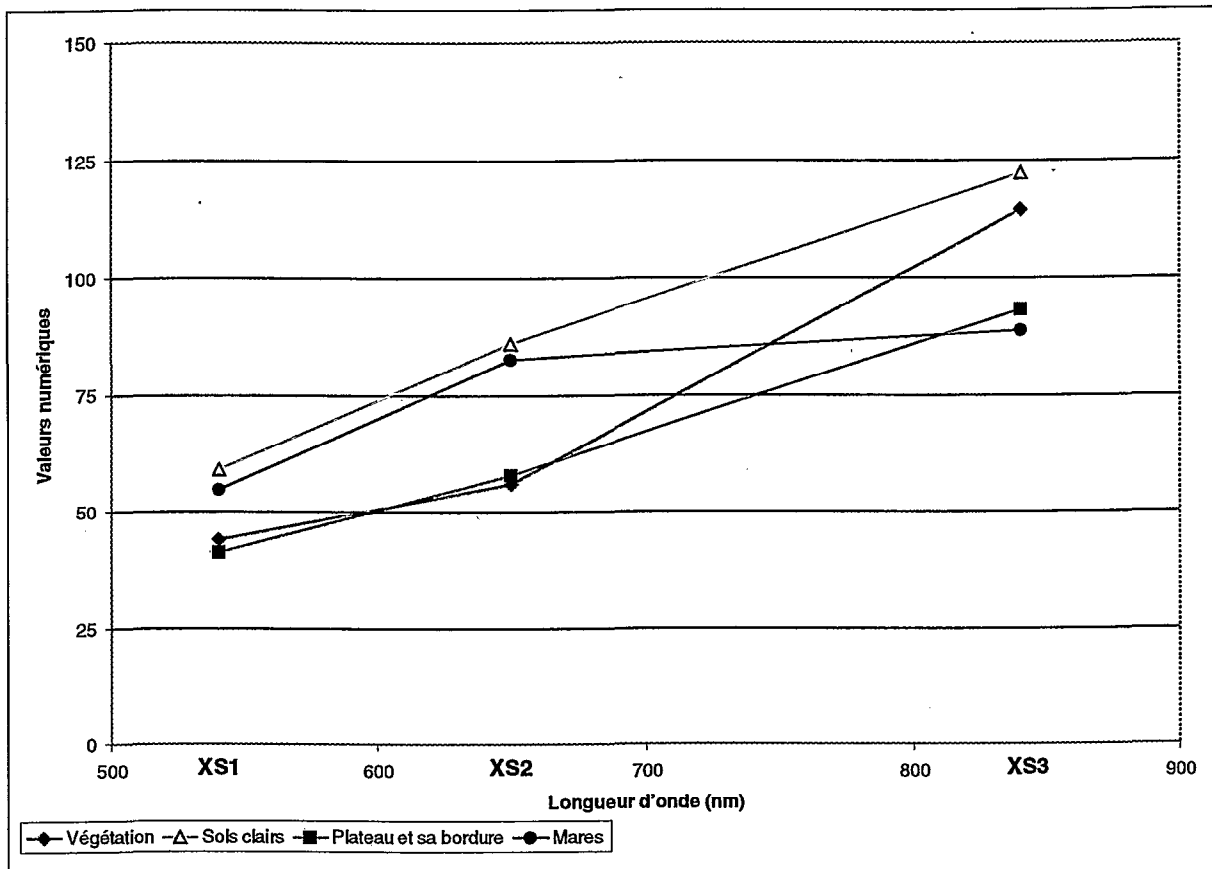


Figure 3.5. : Signatures radiométriques (scène du 25 / 09 / 92)

La figure 3.5. est construite d'après les moyennes des zones ayant servi à la construction du diagramme XS2 / XS3 (figure 3.5.). Il s'agit donc de la même information, mais présentée différemment.

Ces signatures radiométriques sont en accord avec les signatures spectrales de PUECH (1994, figure 2.3.) . Nous notons cependant que sur les canaux XS1 et XS2 (donc dans le visible), la signature radiométrique des mares est très proche de celle des sols clairs. La turbidité doit donc être maximale.

L'utilisation du NDVI apparaît encore plus pertinente sur cette figure 3.5.. Le NDVI est ici envisageable sous la forme de la pente de la droite des signatures entre XS2 et XS3. La pente la plus faible correspond bien aux mares (et la plus forte à la végétation, d'où son rôle d'indice de végétation).

2.2.3 Conclusions

Les deux figures précédentes sont idéalisées par construction. Cependant, elles permettent de confirmer la pertinence du NDVI comme discriminant sur notre zone. Le NDVI

apparaît comme l'outil le plus simple à mettre en place pour inventorier les mares. Les classifications plus compliquées à réaliser ne garantissent pas une amélioration du résultat, du fait des incertitudes accumulées lors de leur mises en œuvre.

La discrimination par le NDVI est donc validée sur notre zone. Il reste à savoir si les inévitables difficultés pratiques ne seront pas insurmontables

2.3 Les premières difficultés pratiques

2.3.1 Les premiers essais

La toute première chose à faire fut simplement de réaliser des cartes du NDVI extraites des différentes scènes. Ces cartes ont d'ailleurs servi à choisir les scènes de travail (cf. § 1.3.3.). Il a fallu d'abord apprendre la meilleure manière de le faire sous GRASS, qui ne possède pas de commande toute faite à cet effet.

Ensuite, la manière la plus rapide d'étudier les formes mises en évidence pour des gammes de valeurs du NDVI consistait à changer la palette de couleurs. Il en résulte que si les valeurs très basses ne correspondaient qu'à des objets de type mare, il arrivait un moment où l'augmentation du seuil de détection entraînait rapidement l'extraction d'objets « indésirables » (sur les plateaux évidemment).

2.3.2 « Mauvais » échantillons

Il est relativement aisé de trouver des pixels dont les valeurs posent problème. L'intégration de ces nouveaux points dans le diagramme XS2 / XS3 définit les futurs problèmes à résoudre. En effet, la figure 3.6. montre avec les symboles d'une croix noire sur fond gris ces points dans une zone intermédiaire qui fait le lien entre le domaine des mares et celui des plateaux. La première droite de discrimination n'est plus adaptée. La carte topographique désigne pourtant clairement ces pixels comme faisant partie d'un plateau à brousse tigrée.

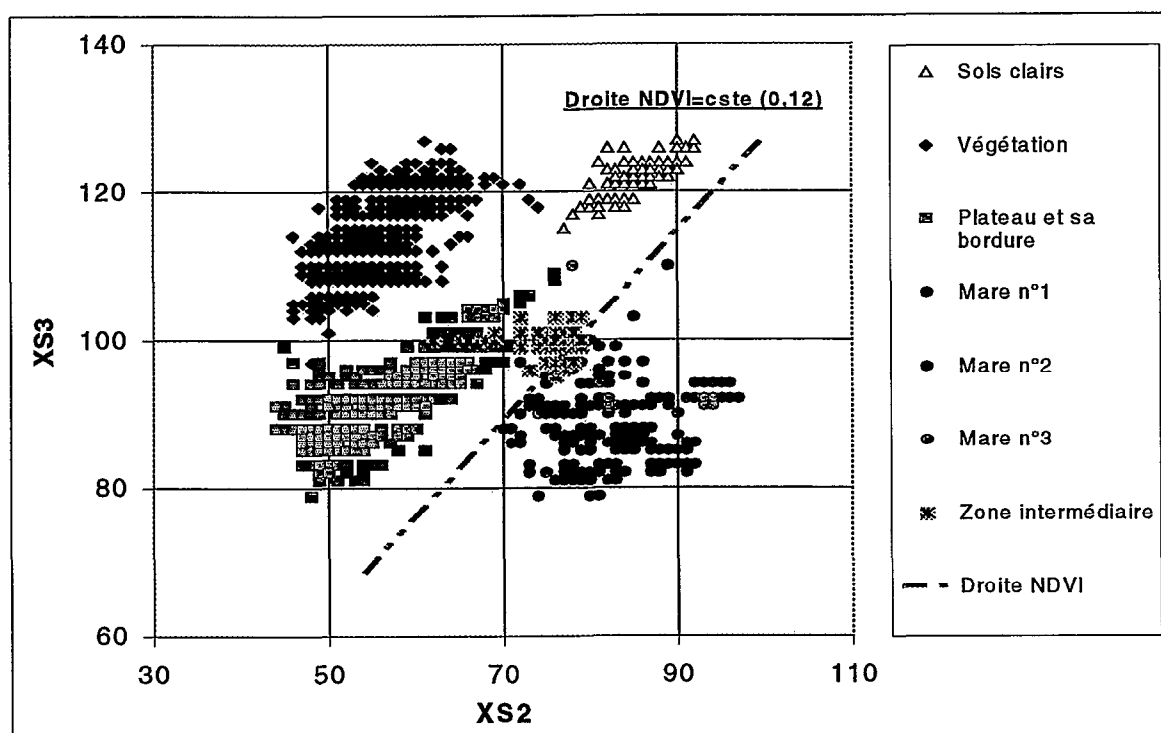


Figure 3.6. : Figure 3.4. avec un nouvel objet (scène du 25 / 09 / 1992)

De plus, les valeurs de cette zone ne font pas que franchir la droite (NDVI=0,12), mais se superposent exactement à certains points appartenant à des mares. La méthode n'est pas remise en cause pour autant, simplement sa mise en pratique demandera une grande précision et certains aménagements.

2.3.3 *Conclusions*

Quelques points sont clairement ressortis lors de ces premiers essais :

- Le nombre et le type d'objets détectés sont extrêmement sensibles à la valeur-seuil du NDVI choisie, de petites variations entraînant de grands effets.
- Le choix de la valeur de NDVI qui déterminera la droite de délimitation des domaines mare et non-mare sera donc une étape importante de la méthode.
- Mais, elle ne suffira pas. Pour les cas tendancieux, une étude contextuelle devra être effectuée : comparaison avec d'autres supports, vraisemblance d'une mare à cet endroit, évolution sur les trois scènes...

La description de l'inventaire proprement dit fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 4 :

Inventaire et caractérisation des mares

Le chapitre 4 expose ce qui constitue l'armature principale de l'inventaire des mares. L'extraction s'est révélée difficile et longue. Nous verrons donc comment les choix et les problèmes soulevés au chapitre précédent ont été pris en compte. De plus, il s'est rapidement avéré nécessaire d'acquérir une nouvelle scène.

Dans un deuxième temps, la réflexion et le traitement ayant guidé la production d'une caractérisation des mares sont présentés.

1 APPLICATION DE LA MÉTHODE

Le mode d'extraction des pixels « mare » est exposé ici, en commençant par la détermination du seuil NDVI. Ensuite, l'utilisation des trois scènes et du contexte est exposée. Enfin, le traitement différent d'une nouvelle scène répond à une interrogation survenue en cours de traitement.

1.1 Détermination du seuil

Le choix de la valeur-seuil du NDVI peut paraître suprêmement décisif : en dessous, il s'agit d'une mare, au-dessus, non. En réalité, la méthode fait intervenir d'autres facteurs de décision qui relativisent l'importance de ce choix. La valeur aurait pu être légèrement différente sans pour autant influencer sur le nombre de mares inventoriées.

Il a d'abord fallu vérifier que les trois scènes étaient homogènes, ce qui permettait de n'appliquer qu'une seule valeur-seuil de NDVI pour les trois. Les premières déterminations de cette valeur furent grossières et thématiques, mais productives, alors que la valeur finale a été choisie selon des critères plus précis, mais malheureusement peu parlants.

1.1.1 Une seule valeur-seuil pour trois images ?

La question posée ici concerne l'homogénéité radiométrique des trois scènes. Est-ce qu'un même objet aura les mêmes codes numériques dans les trois canaux SPOT-XS de deux dates différentes ? La réponse de l'objet est affectée par de nombreux paramètres : position du soleil, du satellite, caractéristiques atmosphériques...

Le niveau de correction 1B, et la correction des effets atmosphériques (cf. annexes 2.3. et 3) garantissent une bonne qualité des scènes. Mais une vérification de l'homogénéité radiométrique, même rapide, fut nécessaire avant de choisir une valeur-seuil du NDVI.

Cette vérification se base sur une constante radiométrique de la région : la droite des sols nus. Les invariants traditionnels que sont les corps sombres (route goudronnée, toits, ...)

ne sont pas fréquents au Sahel et SEGUIS et PUECH (1996) ont mis au point une méthode de correction radiométrique qui utilise les extremas sombres et clairs des sols nus.

Nous avons donc reconstruit la droite des sols nus de chaque scène. Le principe d'élaboration du diagramme XS2 / XS3 du chapitre précédent (figure 3.4, cf. chap. 3, § 2.2.1) est repris pour chacune des scènes. Nous n'avons sélectionné que deux zones (sols sombres et sols clairs) pour lesquelles nous avons reporté les valeurs de réflectance dans les canaux XS2 et XS3 pour les trois dates dans le diagramme ci-dessous.

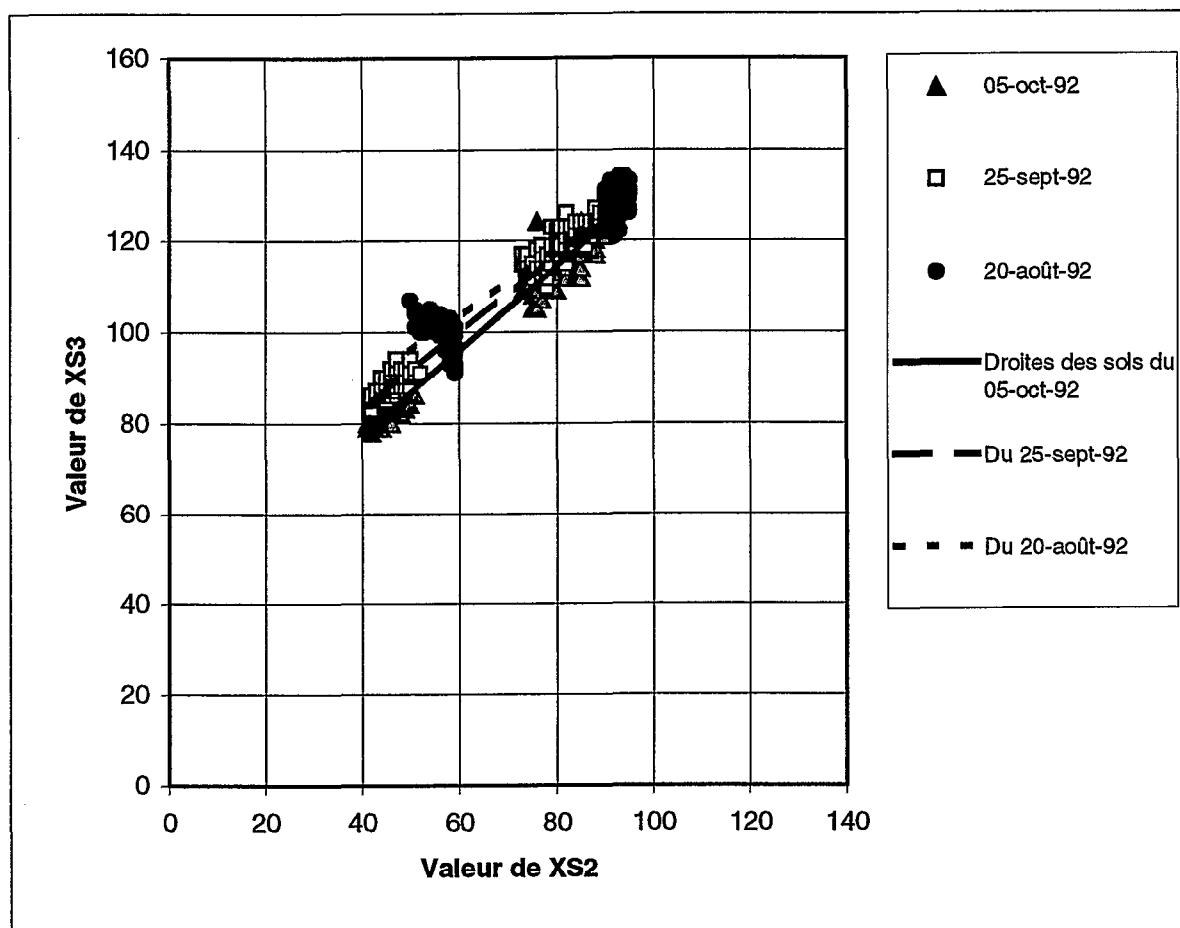


Figure 4.1. : Construction des droites des sols nus des trois scènes

Les droites des sols nus sont construites par la tendance linéaire esquissée par les points. Cette figure suffit amplement pour conclure à l'homogénéité des trois scènes. Le positionnement, vu à l'échelle du repère orthonormé, des trois droites se confond. Les invariants radiométriques sont donc codés de la même manière dans les trois canaux des trois scènes. Les droites connaissent juste un décalage depuis le 20 août jusqu'au 5 octobre qui traduit probablement la disparition du couvert d'herbacées en fin de saison des pluies : les sols sont de plus en plus « nus ».

Une seule valeur du NDVI suffira donc à inventorier les mares pour les trois scènes. Il reste à la déterminer.

1.1.2 Une approximation thématique

Là encore, la plus rapide approche d'une valeur s'est faite simplement en regardant les cartes du NDVI, et en changeant la palette de couleurs. Ainsi, il était facile d'extraire visuellement les zones de faible valeur du NDVI. Nous avons déjà remarqué que les objets

situés en limite de détection étaient beaucoup plus dispersés que les blocs homogènes des mares. Ainsi, en faisant varier la palette, Nous pouvions chercher à déterminer la valeur à partir de laquelle je passais d'objets homogènes situés dans le Kori, ou dans des zones vraisemblables, à des pixels dispersés situés la plupart du temps sur les plateaux.

Les deux cartes de la figure suivante permettent d'illustrer cette approche. A gauche, l'extrait de la carte topographique donne quelques points de repères, et nous pouvons remarquer le tracé du Kori. Le méandre est même signalé comme une mare, chose rare sur cette carte.

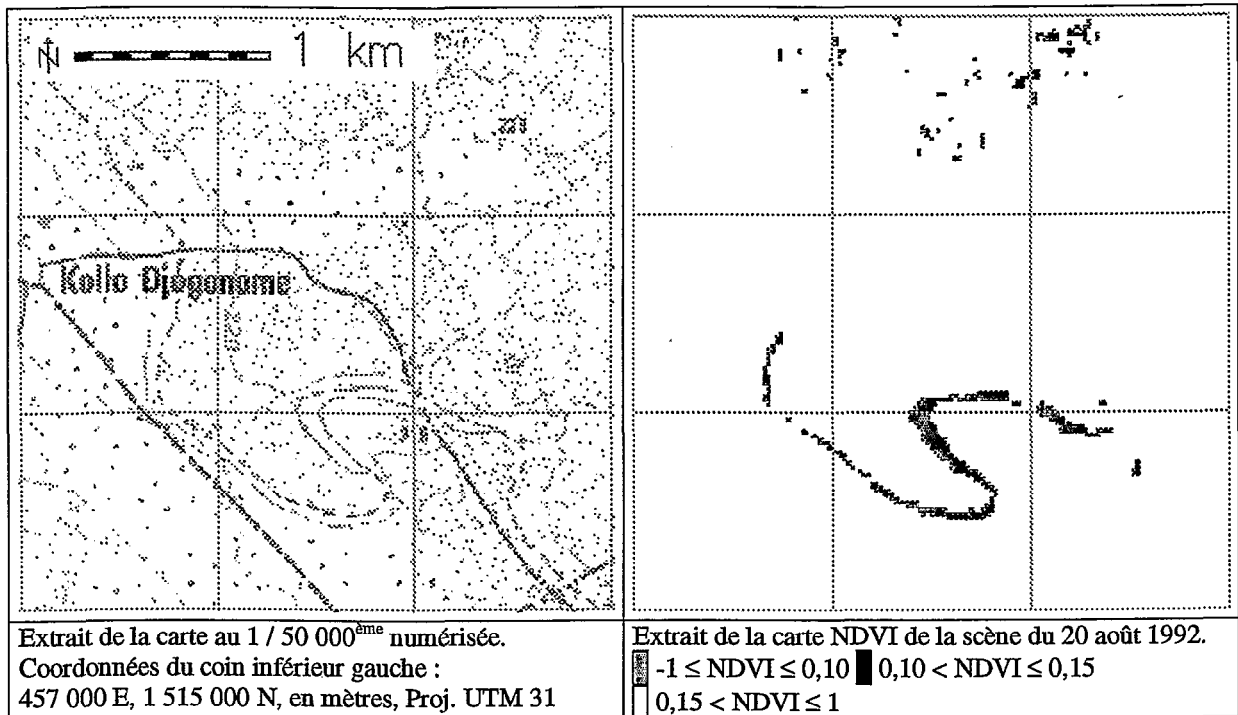


Figure 4.2. : Exemple d'approche de la valeur-seuil du NDVI à l'aide de la palette de couleurs, région du méandre de Kollo Djogonome

A droite, nous retrouvons le méandre où se concentrent les valeurs les plus faibles du NDVI, en rouge. Par contre, la couleur cyan complète la mare mais marque aussi des pixels isolés, situés dans un contexte a priori peu favorable à la concentration d'eau, au nord de l'image.

Pour le traduire en valeurs, cela signifie que la valeur-seuil se situe probablement entre 0,10 et 0,15. En effet, les pixels de valeur inférieure à 0,10 ne marquent pas l'intégralité de la mare du méandre, alors que la valeur-seuil 0,15 entraîne l'extraction de pixels indésirables.

Toute le compromis du choix de la valeur-seuil se retrouve illustré ici : nous avons cherché à compléter les grandes mares et les mares connues au maximum, et ceci afin de déterminer toutes les valeurs possibles pour un pixel d'eau (même turbide). Nous augmentions ainsi le pouvoir d'extraction de la méthode, afin de déterminer au mieux les surfaces des mares et la détection des mares les plus petites.

En revanche, pour une valeur trop forte, le nombre de pixels isolés extraits augmentait d'autant le travail de nettoyage (en partie contextuel-manuel, donc assez long). Nous sommes relativement rapidement arrivés à une fourchette de valeurs : la valeur-seuil de NDVI devait être choisie entre 0,10 et 0,12.

1.1.3 Affinage

Pour trouver une et une seule valeur-seuil comprise entre 0,10 et 0,12, quelques difficultés ont été rencontrées. La raison principale vient du fait que les mares ne représentent qu'une petite fraction de l'image satellite. Les mares ne sont donc pas visibles en tant qu'objet sur l'histogramme de répartition du NDVI d'une scène.

Sur la figure 4.3., nous ne pouvons pas distinguer deux familles d'objets, mais un accroissement plus ou moins continu du nombre de pixels considérés. Nous avons restreint cet histogramme aux alentours de quelques mares grandes et connues (cf. annexe 4.1.). Cela avait permis à PUECH (1994) de choisir une valeur-seuil du NDVI. Mais les trois mares sélectionnées ne suffisent pas à déterminer une valeur pour l'ensemble de la zone.

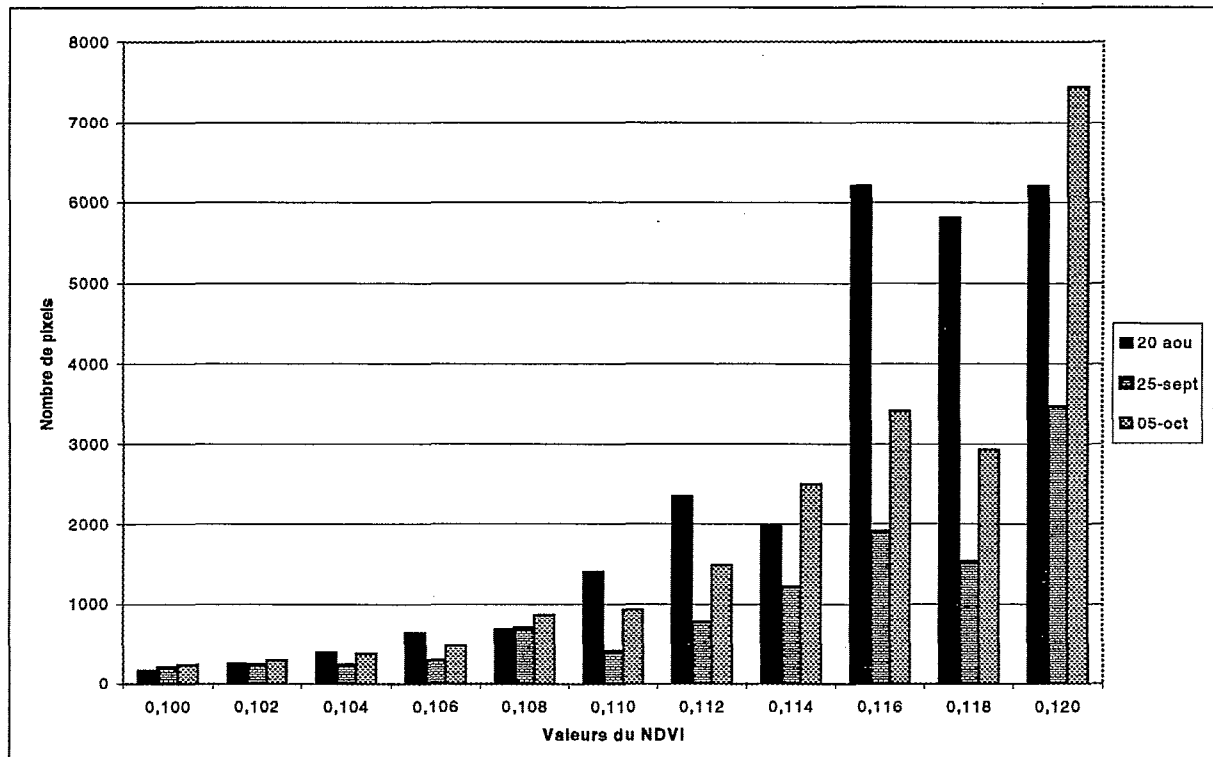


Figure 4.3. : Histogrammes de répartition du NDVI entre 0,100 et 0,120 sur les trois scènes

Ensuite, le nombre de pixels dont la valeur était inférieure au seuil et le nombre de zones contiguës que ces pixels formaient ont été étudiés pour chaque valeur entre 0,10 et 0,12 avec un pas de 0,002. Cette information n'est pas décisive (cf. annexe 4.2.).

Nous avons tout de même resserré un peu la fourchette de valeurs possibles :

La valeur a été choisie de manière à être inférieure à 0,116, où le nombre de cellules sélectionnées devient trop important pour pouvoir garantir un bon nettoyage. En effet, cela se remarque sur la figure 4.3., surtout pour la scène du 20 août 1992. 3 365 cellules en 1 143 zones sont extraites à l'aide de cette valeur-seuil, soit une moyenne de moins de 3 cellules par zone. Cela a semblé incompatible avec les objets recherchés et la méthode envisagée.

De plus, il s'agit d'une des premières valeurs où le nombre d'objets extraits commence à être intraitable. Une valeur juste inférieure pouvait donc être choisie.

Finalement, et ce de manière un peu arbitraire, la valeur 0,112 a été choisie. Il convient de rappeler que la fourchette de valeurs présélectionnée par l'approche thématique était déjà fortement restreinte. De plus, cette approximation a été compensée par la démarche

en étudiant au cas par cas les zones dont le NDVI avait une valeur proche du seuil. Ces deux aspects permettent de relativiser l'impact du choix final.

1.2 Etapes de l'extraction

Nous avons appliqué ce seuil de 0,112 sur les trois scènes de 1992. Mais nous devons tenir compte des remarques précédentes, et ne pas simplement prendre tous les pixels répondants au seul critère du NDVI. Nous avons donc utilisé dans un premier temps la possibilité de recouplement qu'offraient les trois scènes. Puis, nous avons dû repérer des cas litigieux, sur lesquels le contexte a joué comme élément décisif. Enfin, le mauvais géoréférencement des scènes a entraîné une étape supplémentaire d'extraction sur la seule scène du 20 août 1992.

1.2.1 Utilisation conjointe des trois scènes

Cette première étape essaye de rendre compte de la discrimination par le NDVI, tout en utilisant le recouplement des informations par les trois scènes. La figure 4.5. présente l'utilisation qui a été faite du recouplement des trois scènes.

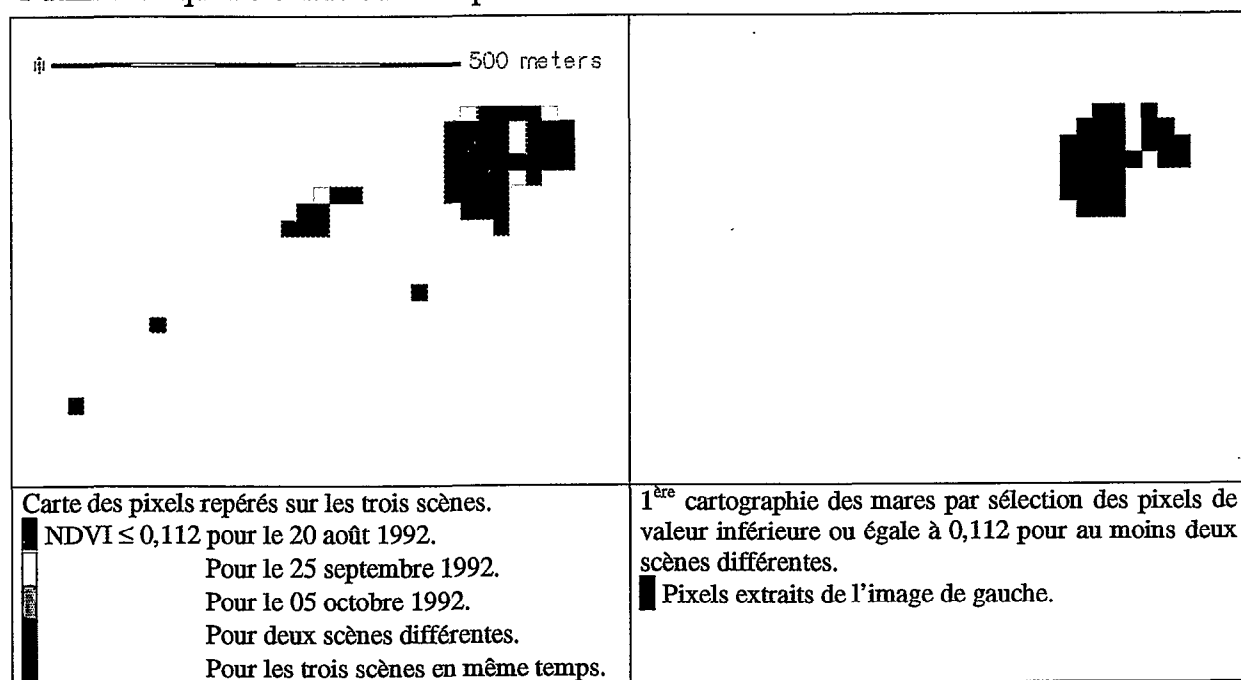


Figure 4.4. : Extraction des pixels remplissant la condition NDVI \leq 0,112 sur deux scènes différentes au moins (Zone à l'est de Wankama, Coordonnées du coin inférieur gauche : 464 145 E, 1 509 650 N, UTM 31)

La sélection des pixels remplissant la condition sur deux scènes différentes permet d'éliminer les pixels isolés spatialement et temporellement. Ainsi, si un pixel répond « accidentellement » à la condition sur une scène, il ne sera pas sélectionné.

Le nombre de pixels extrait est néanmoins de 1 802 regroupés en 486 zones contiguës.

Note : La commande GRASS de regroupement en zones contiguës, *r.clump*, ne tient pas compte du voisinage en diagonale. Une autre commande, *r.le.dist*, permet d'en tenir compte, mais elle n'a pas été utilisée à cette étape, seulement à la fin de l'inventaire.

Cette première étape pose quelques problèmes. Elle favorise ainsi les grandes mares persistantes. Les petites mares, elles, peuvent disparaître à cause du mauvais recouvrement entre les trois scènes, ou à cause de leur disparition en fin de saison des pluies. Nous allons

essayer d'y remédier, mais d'abord, nous devons étudier les cas litigieux issus de ce premier inventaire.

1.2.2 Choix contextuel

La valeur-seuil du NDVI a été choisie pour augmenter les chances de détection des petites mares et pour compléter les surfaces des grandes mares. Malheureusement, cela a entraîné l'extraction d'un grand nombre de pixels qui ne sont pas des mares. Nous devons faire intervenir le contexte pour faire le tri des pixels dont la valeur du NDVI est proche du seuil.

1.2.2.1 Deux caractérisations

Pour caractériser les zones extraites de l'étape précédente, nous avons réalisé deux opérations. La première donne une indication sur la « proximité » par rapport à la valeur-seuil du NDVI, la seconde indique pour chaque zone extraite si des pixels proches ont été inventoriés eux-aussi.

- i. La moyenne et le minimum des valeurs NDVI de chaque zone sur les trois scènes donnent la première caractérisation. Cela permet d'estimer à quel point la zone est en limite de détection. Ainsi, si le minimum est largement inférieur au seuil, je peux raisonnablement supposer que la zone comprend au moins un pixel mare à au moins une date en 1992. Je classe alors cette zone comme mare sans aller voir son contexte. A l'opposé, certaines zones ont été extraites « grâce » à des valeurs proches de la limite de détection. Le doute est alors permis.
- ii. Une dilatation de l'image obtenue a été ensuite réalisée : chaque zone a ainsi « grossi » d'environ 50 mètres. La comparaison avec l'image initiale permet de dire pour chaque groupe de pixel s'il est :
 - Isolé : Un pixel seul ou un binôme de pixels dont le voisinage ne connaît pas d'autres pixels extraits. Il s'agit d'une catégorie relativement défavorable, puisque regroupant la plupart des « accidents » de détection.
 - Dispersé : des pixels seuls mais au voisinage de nombreux autres pixels seuls. C'est typique de l'extraction des sols sombres des plateaux, séparés par des arcs de végétation. Il s'agit donc d'une caractérisation négative, une vérification de la localisation permet d'éliminer d'un seul coup tous les pixels qui se regroupent ainsi dans une zone. D'autant plus que les mares de plateaux ont une importance secondaire dans l'inventaire. Si l'une d'entre elles vient ainsi à disparaître de l'inventaire, ce n'est pas très grave.
 - Sûr ou A peu près sûr : Il s'agit des grandes zones préexistantes. A moins de valeurs de NDVI trop proches de la limite, elles sont classées automatiquement en mares.
 - En plus : un pixel qui est regroupé par la dilatation avec une zone « sûre ». Nous supposons alors qu'il a été séparé de la grande mare par la détection, mais il faut les conserver pour pouvoir évaluer au mieux l'étendue de ces mares.

1.2.2.2 L'obtention d'un premier inventaire

La combinaison de ces deux caractéristiques a permis d'automatiser une partie de l'affectation des pixels en « mare » ou « non-mare ». 102 zones ont ainsi été directement classées comme des mares, car toutes leurs caractéristiques étaient favorables (NDVI et

caractérisation spatiale). A l'opposé, 322 zones ont été présupposées comme ne correspondant pas à des mares. Il restait donc 62 zones qu'il a fallu étudier cas par cas, en s'aidant du contexte (cf. annexe 4.3.).

L'étude du contexte a consisté à croiser les différentes informations : carte topographique, mais aussi compositions colorées des scènes principalement. Lors de cette étude, nous avons parcouru (via l'écran) une bonne partie de la région. Les 486 zones n'ont pas été étudiées une par une. Mais le simple fait d'avoir à étudier 62 cas incertains nous a conduit à connaître les contextes de quasiment toute la zone.

Nous avons donc pu constater en partie la validité de mes caractérisations issues de la répartition spatiale et des valeurs du NDVI. Seules 10 zones se sont révélées être mal classées. Cela n'exclut pas d'autres erreurs, mais elles restent marginales. Le tableau 4.1. ci-dessous retrace la partie automatisée et la partie qui a nécessité le contrôle zone par zone.

		« Sûr », « A peu près sûr » ou « En plus » et Valeurs faibles du NDVI	« Isolé » ou « Dispersé » et fortes valeurs du NDVI	Cas incertains	
1° Extraction : 486 zones		102	322	62	
2° Intervention du contexte	Non-Mare	2	314	32	TOTAL 348
	Mare	100	8	30	138

Tableau 4.5. : Modes d'obtention des 138 mares

Ces 138 mares sont encore loin de constituer l'inventaire final, mais elles en constituent quand même l'ossature et la suite de l'inventaire ne rajoutera finalement que peu de mares.

1.2.3 Reprise de la scène du 20 août 1992

Afin de pallier le défaut de détection des mares les plus petites et les plus éphémères, l'inventaire a été complété par un traitement de la scène du 20 août 1992 uniquement. Il s'agit de la scène où le niveau de remplissage des mares est potentiellement le plus important. Simplement, la valeur-seuil du NDVI a dû être modifiée.

La valeur 0,09 a été sélectionnée. Si nous avions gardé la valeur 0,112, il y aurait eu un trop grand nombre de pixels extraits sur une seule scène et le tri n'aurait pas été possible. Les pixels dont la valeur du NDVI est inférieure à 0,112 sont ainsi de manière quasi-certaine des pixels « mare ». 158 zones sont ainsi extraites. Après comparaison avec les 138 zones déjà extraites, il ne reste que 59 zones qui n'avaient pas encore été inventoriées, et 4 zones étaient rattachées à des entités plus grandes.

Pour 59 zones, l'étude au cas par cas est tout à fait possible. Il s'est avéré que toutes étaient de manière plausible des mares. Cela mène donc à 193 mares (138 - 4 + 59).

A ce stade de mon travail, François DELCLAUX, l'ingénieur à l'ORSTOM qui assure la maintenance de GRASS, m'a présenté les commandes *r.le* (BAKER et CAI, 1992). Dorénavant, la détermination des zones contiguës prend en compte le voisinage en diagonale. De 193 zones, nous passons ainsi à 174. Ce nouveau moyen de décompter les mares n'a pas nécessité la reprise de la méthode puisque le voisinage en diagonal avait déjà été pris en compte lors de la caractérisation du voisinage des pixels au § 1.2.2.1.. Le résultat de

l'inventaire aurait donc été le même si nous avions utilisé *r.le* dès le début (en termes de pixels extraits mais le nombre de mares, lui, change).

1.3 L'obtention des dernières mares

Les dernières mares de l'inventaire sont issues d'une dernière étape d'extraction, après l'acquisition d'une scène de 1996.

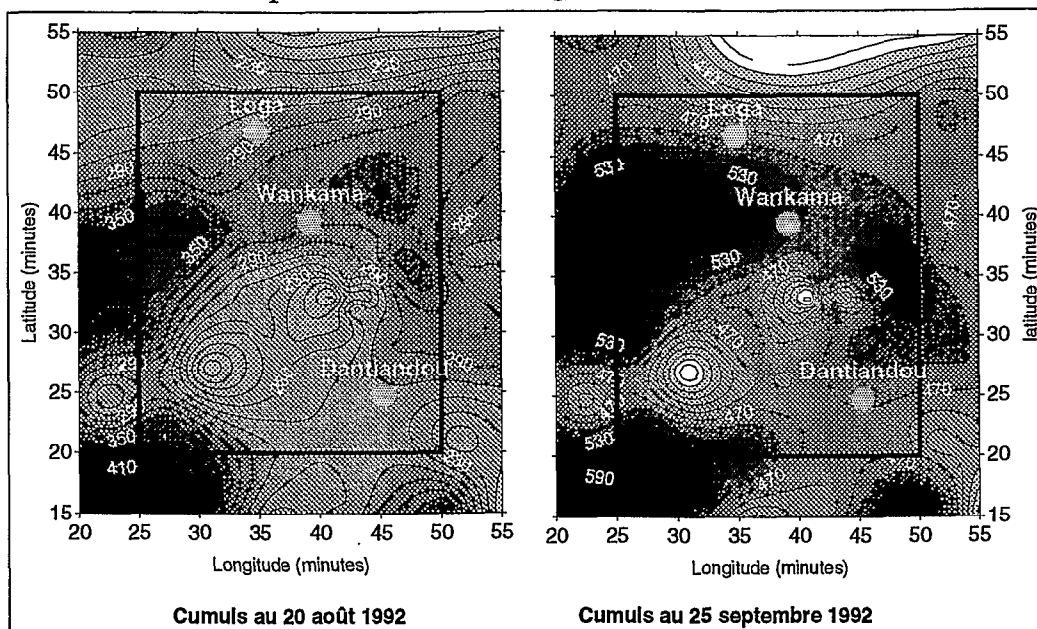
1.3.1 Une zone exempte de mares

L'étude de la répartition spatiale des mares extraites a révélé une distribution pour le moins inégale. En effet, au sud-est de ma zone, entre les villages de Banizoumbou et Dantiandou (16 km à vol d'oiseau ou plus de 20 km de linéaire du Kori), aucune mare n'était recensée dans le Kori. Or l'inventaire de DESCONNETS (1995) recense des mares dans cette région (cf. Chap.5 §1.2.1.1).

Ne sachant à quoi attribuer cette lacune, nous avons consulté un certain nombre de personnes. Il en est ressorti un grand nombre d'hypothèses. Celles-ci constituent la base de discussion de l'inventaire (cf. Chap. 5, § 2.2). En effet, elles posent des problèmes intéressants, et la plupart n'ont pas encore été confirmées, ou au contraire contredites. Néanmoins, l'une d'entre elles a pu être vérifiée, grâce à l'acquisition d'une nouvelle scène.

1.3.2 La pluviométrie mise en cause

Cette hypothèse mettait en cause la répartition spatiale des pluies en 1992. Le déficit de mares détectées dans une région pouvait être relié à un déficit de la pluviométrie de cette même région. L'hypothèse s'est confirmée lors de l'étude de la répartition des cumuls pluviométriques (données EPSAT-Niger, TAUPIN *et al.*, 1993). Le sud-est (zones claires) est ainsi déficitaire d'environ 150 mm par rapport au reste de la zone d'étude (zones foncées). Les cumuls pluviométriques depuis le début de la saison de pluies de 1992 à deux dates de prises de vue SPOT sont reproduits ci-dessous, figures 4.6. et 4.7..



Figures 4.6. et 4.7. : Isohyètes des cumuls pluviométriques saisonniers (mm) aux dates de prise de vue (les axes sont gradués en minutes depuis l'origine du degré-carré : 2°E, 13°N, proj. Clarke 1880 ; le cadre noir correspond aux limites géographiques de la zone d'étude ; Loga, Wankama et Dantiandou sont trois villages qui sont situés sur le Kori)

Le déficit est donc net et situé exactement sur la zone où nous inventorions peu de mares. L'année 1992 présente une particularité que nous n'avons pas prise en compte au départ dans le choix des scènes.

Le remède paraît simple : acquérir une scène supplémentaire et refaire l'inventaire pour une année où cette particularité n'existe pas. Le compte-rendu de la campagne hydrologique (TAUPIN et ROBIN, 1997) donne les cumuls saisonniers de chaque année de 1990 à 1996 sur le degré-carré d'HAPEX-Sahel. Les années 1994 (forts cumuls partout) et 1996 (bons cumuls pour la zone déficitaire) peuvent convenir.

1.3.3 L'acquisition d'une nouvelle scène

Une seule scène rapidement disponible a été choisie dans une de ces deux années. Il s'agit de la scène du 3 novembre 1996.

Seulement, cette scène n'avait fait l'objet d'aucune correction. Sa géométrie a pu rapidement être corrigée afin qu'elle soit superposable aux trois autres scènes. Par contre, l'absence de correction radiométrique a nécessité un changement de la méthode. L'histogramme des valeurs numériques du troisième canal des images satellites du 20 août 1992 et du 3 novembre 1996 (figure 4.8. ci-dessous) permet de se rendre compte de l'absence de correction radiométrique.

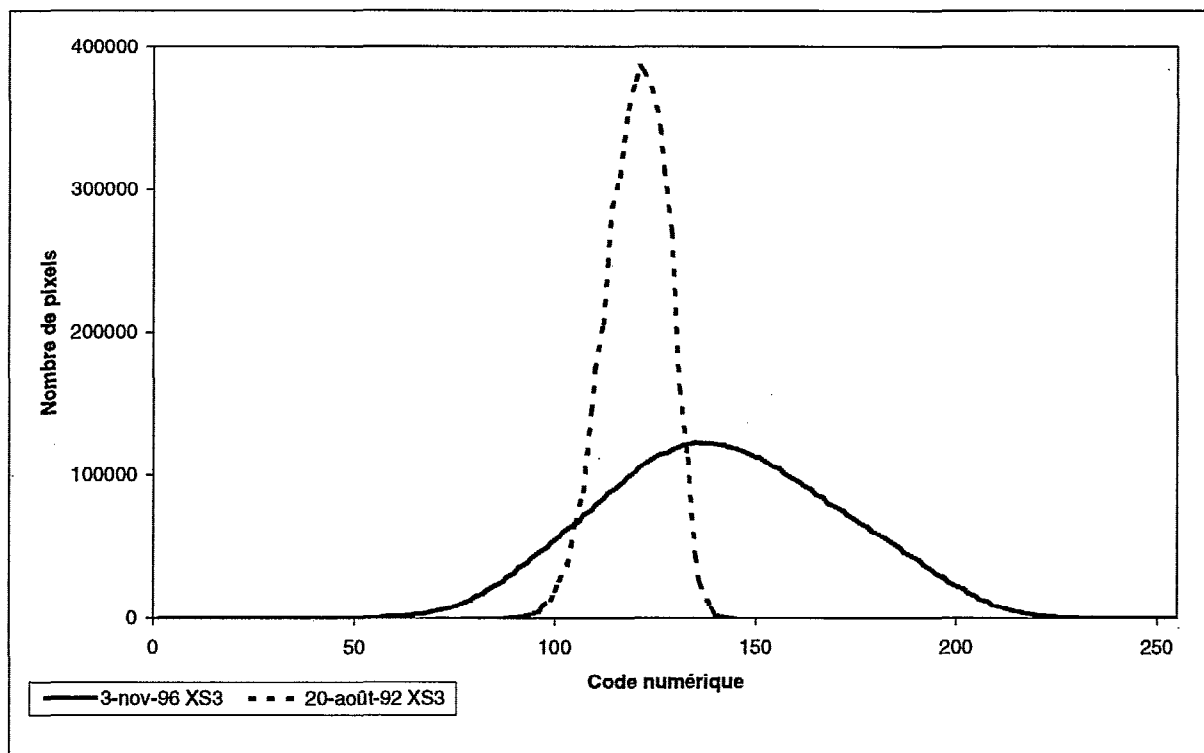


Figure 4.8. : Courbes de répartition des valeurs dans le canal XS3 pour les scènes du 3 novembre 1996 et du 20 août 1992 (sur la zone de l'étude)

En effet, les trois canaux de l'image de 1996 étaient codés de façon à ce que les valeurs de réflectances soient étalées de 0 à 255, la valeur la plus faible sur un canal étant codée 0 et la plus forte 255. Pour les scènes de 1992, le codage correspondait à une proportionnalité par rapport à la réflectance : 0 correspond à 0% de réflectance (absorption totale) et 255 à 100% de réflectance. La figure 4.8. illustre donc bien l'absence de correction et d'homogénéité radiométrique entre la scène de 1996 et celles de 1992.

1.3.4 Traitement de cette nouvelle scène

Puisque nous voulions uniquement récupérer les mares dans la région considérée, entre Wankama et Dantiandou, Nous avons d'abord cartographié le NDVI, mais la première approche par le changement de palette de couleurs (cf. Chap. 3 § 2.3.1. et Chap. 4 § 1.1.2) nous a vite dissuadé de l'utiliser comme discriminant. Les valeurs des mares connues étaient en effet partagées par un grand nombre d'objets.

Par contre, avant d'envisager de corriger la radiométrie et de l'homogénéiser avec les trois scènes initiales, une Analyse en Composantes Principales a été réalisée. Le deuxième néo-canal issu de l'A.C.P. faisait ressortir clairement les mares connues. Leur extraction sur ce canal devait donc être possible assez facilement.

L'explication théorique du caractère discriminant de ce néo-canal est la même que celle du NDVI. En effet, ce néo-canal, sur cette image, est calculé d'après l'équation suivante issue du calcul des vecteurs propres :

$$ACP(2) = 0,23 XS1 + 0,55 XS2 - 0,80 XS3$$

Si nous admettons que $XS1 \propto XS2$, alors nous obtenons un indice de végétation :

$$ACP(2) \approx k_1 XS2 - k_2 XS3$$

Avec k_1 et k_2 du même ordre de grandeur et positifs.

La différence avec le NDVI est faible, mais suffit apparemment à discriminer les mares en l'absence de correction radiométrique. Il s'agit de l'intervention légère, mais peut-être décisive, du canal XS1 et de l'absence de dénominateur (dans le calcul du NDVI, le dénominateur permet de normaliser les valeurs).

L'inconvénient majeur des ACP vient néanmoins du fait que le résultat n'est pas forcément le même sur deux images différentes (du fait que la distribution des valeurs n'est jamais exactement la même). Un heureux hasard et/ou une bonne intuition ont donc permis de trouver ce canal discriminant. Le fait qu'il soit homogène à un indice de végétation permet de ne pas avoir à le justifier par la théorie, puisque c'est déjà fait pour le NDVI.

Il reste donc à déterminer une valeur seuil. Vu le nombre de mares déjà inventoriées, le relevé des valeurs dans le canal ACP-2 de l'image de 1996 pour les mares connues a suffi pour choisir une valeur. A titre indicatif, tous les pixels dont la valeur dépassait 181 ont été extraits. Ce chiffre ne peut être comparé à rien, ni indiquer quoi que ce soit, il n'est indiqué qu'au cas improbable où le même travail sur la même scène devait être fait. Par contre, nous prenons ici les valeurs les plus fortes car il s'agit de $(XS2-XS3)$ et non de $(XS3-XS2)$ comme pour le NDVI (aux multiplicateurs et dénominateurs près).

L'extraction brute de ces pixels donne 1 650 zones. Le seuil choisi est assez large, mais les mares que nous cherchons sont uniquement celles de la zone déficitaire. Nous avons donc parcouru cette zone et quand nous voyions une zone extraite pouvant être une mare, nous la récupérons de manière quasiment manuelle.

Nous avons ainsi récupéré 17 mares qui ont porté l'inventaire à 191 objets. Ces objets sont pour l'instant des groupes de pixels référencés par un numéro dans une couche d'information du S.I.G.. Cette forme du résultat est assez peu présentable et utilisable. Le deuxième axe de l'inventaire fut donc de produire les résultats sur différents supports et sous différentes formes.

1.4 Synthèse

Le tableau 4.9. qui suit permet de rappeler les 4 étapes de l'inventaire. Nous pouvons voir que si la première étape effectue une extraction grossière, l'inventaire s'affine ensuite par soustraction, puis par additions de nouveaux objets.

<i>Étapes</i>	<i>Sources</i>	<i>Méthode</i>	<i>Nombre de « mares »</i>	<i>Surface totale</i>
1° Extraction automatique	3 Images satellites de 1992	Pixels ($NDVI \leq 0,112$)	401 (486)	72 ha
2° Intervention du contexte	Cartes topographiques et composition colorée	Caractérisation du voisinage et des valeurs NDVI Puis étude cas par cas de 62 zones	-273 128 (138)	50 ha
3° Récupération des mares les plus petites et éphémères	Image satellite du 20 août 1992	Pixels ($NDVI \leq 0,090$) Puis étude cas par cas de 59 zones	+46 174	77 ha
4° Etude liée à la répartition pluviométrique inégale de 1992	Image satellite du 3 novembre 1996	Pixels ($ACP(2) \geq 181$) Et extraction manuelle sur la zone déficitaire	+17 191	78 ha

Tableau 4.9. : Résumé de la méthode d'inventaire des mares

Les nombres de mares à chaque étape sont ici décomptés par le même programme, qui prend en compte les voisinages en diagonale. Les deux premières étapes voient figurer l'ancien nombre de mares (sans prise en compte des diagonales) entre parenthèses.

De plus, la surface totale obtenue par sommation de toutes les surface des mares, permet de relativiser la deuxième étape qui n'apparaît plus que comme une étape de nettoyage des pixels isolés. La 3^{ème} étape a vu la récupération de 46 mares, mais aussi une amélioration de l'estimation de la surface des mares déjà extraites. Enfin, la 4^{ème} étape apparaît presque anecdotique si la répartition spatiale des nouvelles acquisitions n'est pas prise en compte.

Il reste donc à caractériser ces objets, afin de les définir, mais aussi de valider l'inventaire.

2 CARACTÉRISATION DES MARES

L'objectif de ce stage est de fournir une ébauche du découpage du paysage hydrologique. Dans ce but, il est évident qu'une simple couche du S.I.G. contenant les pixels inventoriés ne suffit pas. Il a donc fallu utiliser les possibilités du S.I.G. pour caractériser ces mares, les identifier, les localiser... Bref, nous avons produit un certain nombre de caractéristiques que nous avons rattachées à chaque zone contiguë, pour former l'aspect base de données de l'inventaire.

Cette caractérisation constitue l'ébauche du passage du S.I.G. au modèle hydrologique. Elle nous permettra aussi de vérifier la cohérence de ces résultats au chapitre suivant (chap. 5, § 1.2.2). Il est donc primordial de présenter les calculs des surfaces, des indices, de la localisation avant de discuter ces résultats, soit pour eux-mêmes, soit pour leur cohérence.

2.1 Les paramètres calculés

Ils s'appuient sur des valeurs calculées grâce aux possibilités du S.I.G.

2.1.1 Localisation

Nous avons choisi de sélectionner une seule valeur par souci de simplification. En effet, nous aurions pu donner les localisations de chacun des pixels, ou les extremas nord-sud et est-ouest. Mais la taille relativement réduite des mares, et les approximations issues principalement de la rectification géométrique des scènes nous ont conduit à estimer qu'une seule valeur serait suffisante.

Cette valeur est déterminée par la commande *r.volume*. Ce n'est pas sa fonction principale, mais elle définit un centroïde pour chaque amas de pixels inventorié. Le mode de définition du centroïde suit une règle d'approximation. Il est obligatoirement au centre de l'un des pixels de chaque zone considérée, mais il est le plus proche possible du centre de gravité de la zone.

Un fichier des sites correspondant aux mares inventoriées est donc créé. Les coordonnées sont directement consultables et le fichier est facilement exportable (vers un tableur par exemple).

La transformation en coordonnées sous la forme de longitudes et latitudes, selon la projection de Clarke 1880 n'est pas très complexe. Nous avons utilisé *m.u2ll* (« UTM to Longitude, Latitude »), une commande GRASS qui permet de le faire aisément. Nous avons obtenu des coordonnées en degrés, minutes et centièmes de minutes. Le but était d'être homogène aux sorties des petits GPS de terrain.

2.1.2 Surface, périmètre, indice de forme

Ces paramètres sont encore issus des possibilités d'un S.I.G.. L'ensemble de programmes *r.le* (pour *raster landscape ecological*) a été ajouté dans la version 4.2. de

GRASS (BAKER et CAI, 1992). Il permet des analyses poussées de la structure des groupes constitutifs d'une carte : de la simple surface à des indices relatifs à la variation d'échelle.

Pour nous, cela a permis en une seule commande, *r.le.patch*, d'obtenir trois caractérisations des mares inventoriées : surface, périmètre et indice de forme.

✧ La surface est la simple multiplication du nombre de pixels de chaque mare par la surface d'un pixel ($= 0,04 \text{ ha} = 400 \text{ m}^2$).

✧ De même, le périmètre d'une mare est la longueur des côtés extérieurs des pixels de bordure. Par exemple, une zone constituée d'un seul pixel aura une surface de 400 m^2 et un périmètre de 80 m.

✧ Enfin, le programme peut produire plusieurs indices de forme. Le premier était le simple rapport du périmètre sur la surface. Mais les auteurs remarquent sa forte dépendance à la taille de l'objet. Le deuxième vise à corriger ce problème :

$$\text{Indice de forme corrigé} = \frac{0,282 \times \text{Périmètre}}{\sqrt{\text{Surface}}}$$

Nous l'avons sélectionné, à la nuance près qu'il n'est pas opportun pour les petites zones (1 ou 2 pixels). La troisième possibilité compare la surface de l'objet avec la surface du plus petit cercle qui comprend la totalité de l'objet. Il n'était pas calculable sur des zones aussi petites que les mares inventoriées.

En une seule opération, nous avons obtenu trois caractérisations des amas de pixels qui constituent les mares. Ces caractéristiques sont très attachées à l'approche pixellaire, mais nous ne possédons pas d'informations suffisantes pour dépasser cette approche. Il faudra juste en tenir compte lors de l'utilisation de ces paramètres.

2.1.3 Indice de persistance

Si la surface d'une mare est la première manière d'apprécier son importance, l'aspect éphémère des mares ne doit pas être oublié : il existe des grandes mares qui s'infiltrent très rapidement. Nous avons donc cherché à produire un indice qui puisse rendre compte du caractère plus ou moins éphémère des mares inventoriées.

Pour ce faire, nous ne possédions malheureusement que 4 scènes directement utilisables, soit une information sur seulement 4 dates. De plus, ces dates ont été choisies en préférant le recoupement d'informations à l'évolution (cf. Chap. 3 § 1.3.1.). Nous avons néanmoins décidé de nous en tenir à ces informations.

L'indice de persistance consistera donc à dire si la mare était présente à chaque date de prise de vue. Pour chaque mare, nous relevons le minimum du NDVI aux trois dates de 1992, et le maximum du 2^{ème} néo-canal issu de l'A.C.P. pour l'image de 1996. Il s'agit des minima et maxima sur la surface de la mare considérée agrandie d'un pixel de chaque côté, pour contourner les erreurs dues au recouvrement imparfait des scènes.

Nous obtenons donc quatre valeurs pour chaque mare. Afin de les synthétiser en un seul indice rapidement interprétable, nous testons chaque valeur par rapport à la valeur-seuil (0,112 pour les scènes de 1992 et 181 pour 1996). Si la valeur répond à la condition de détection, le test renvoie la valeur 1, 0 sinon. L'indice est composé des quatre résultats des tests mis dans l'ordre chronologique.

Un exemple sur 6 mares choisies parce qu'elles n'ont pas le même indice de persistance est présenté page suivante, tableau 4.10..

N° des mares	Minimum du NDVI			Max ACP(2)	Indice de persistance
	20 / 08 / 92	25 / 09 / 92	05 / 10 / 92	03 / 11 / 96	
105	0.082	0.026	0.044	212	1111
106	0.084	0.054	0.092	171	1110
107	0.068	0.012	0.006	179	1110
108	0.126	0.110	0.110	182	0111
109	0.128	0.118	0.102	187	0011
110	0.104	0.134	0.108	175	1010

Tableau 4.10. : Exemple sur 6 mares du passage des valeurs extraites à chaque date à un indice concis

Dans ce tableau, les cases grisées marquent les valeurs qui ne vérifient pas le test de détection : à cette date, sur toute la surface de la mare (agrandie), aucun pixel ne vérifie les conditions de seuil demandées.

Cet indice fera l'objet d'une large discussion dans le chapitre suivant.

2.2 Les paramètres manuels

Ce sont des caractéristiques qui ont demandé une comparaison non-automatisable avec la carte topographique principalement. Chaque mare a été examinée pour que lui soit affectés un nom, un type, et les autres sources d'informations où elle figurait déjà.

2.2.1 Nom

Le nom associé à chaque mare est généralement celui du village le plus proche (dans son orthographe de la carte au 1/200 000^{ème}). L'ajout d'un numéro d'ordre est souvent nécessaire pour différencier plusieurs mares à proximité d'un même village.

Il y a deux exceptions à cette règle :

- Les mares figurant déjà dans l'inventaire de J.C. DESCONNETS (1994) avaient déjà un nom. Ce nom a été repris pour éviter les confusions. Cela se résume généralement à prendre le numéro d'ordre qu'il avait déjà affecté, car il avait appliqué un système similaire de dénomination utilisant les villages.
- Certaines mares ont un nom attribué sur la carte. La confusion n'est pas non plus souhaitable avec cette dénomination, elle est donc reprise.

Cette dénomination peut être complétée, et facilement changée, car un numéro d'ordre (généralisé par la commande de comptage des amas de pixels) peut servir d'index permanent. De plus, si deux amas de pixels étaient différenciés par le S.I.G., mais apparaissaient de manière flagrante (généralement un pixel isolé à une extrémité d'une grande mare) comme deux parties d'une même mare, le même nom a pu être attribué aux deux zones.

2.2.2 Typologie

En même temps que l'attribution d'un nom, la localisation de la mare sur la carte topographique a permis d'appliquer la typologie dressée par J.C.DESCONNETS (1994). Nous l'avons cependant simplifiée à l'existence de trois possibilités :

- (a) Les mares de Kori sont positionnées sur les tirets bleus des cartes topographiques.
- (b) Les mares de Plateau coïncident avec la légende brousse tigrée des cartes.

- (c) Les mares de Versant sont les autres mares, soit qu'elles soient effectivement situées entre le plateau et le Kori, soit qu'elles soient situées dans un bas-fond non relié au Kori.

Cette simplification de la typologie rend compte des renseignements visibles sur les cartes. Elle ne pourrait être affinée qu'avec des connaissances du terrain.

type	Kori	Versant	Plateau	Route	Hors-catégorie	TOTAL
Nombre de mares	65	35	53	31	7	191

Tableau 4.11. : Répartition des mares par type

Les mares de route et hors-catégorie ne font pas partie de la typologie de DESCONNETS. Nous avons déjà vu les causes de la création des mares de route, elles ne font donc pas partie du système hydrologique régional. Les mares hors-catégorie sont des mares de bordure du Dallol Bosso essentiellement : elles ne font donc pas partie du bassin-versant du Kori.

2.2.3 *Recoupement*

Le dernier attribut issu de l'étude de la position des mares sur les cartes topographiques précise si la mare est déjà recensée sur ces mêmes cartes et dans l'inventaire de J.C.DESCONNETS (1994).

Une précision supplémentaire de cette dernière caractérisation vient du fait que les cartes topographiques distinguent les mares et les zones humides.

Ce chapitre a donc montré comment nous avons inventorié 191 mares, et produit 9 caractéristiques pour chacune d'entre elles. Ces chiffres ne signifient rien si nous ne les associons pas à une validation et à une discussion. C'est l'objet du chapitre suivant, où nous verrons que les paramètres de caractérisation sont bien présents.

Chapitre 5 :

Résultats, validation,
discussion

Le chapitre précédent aboutit à l'inventaire de 191 mares et à leurs caractérisations. La présentation de ce résultat peut utiliser son aspect cartographique ou son aspect base de données.

Pour valider l'inventaire et les paramètres produits, l'utilisation de cartes ou de campagnes de terrain a dû être complétée par une étude de la cohérence des résultats. Enfin, une discussion plus approfondie découle des hypothèses formulées lors de la découverte de la zone déficitaire en mares détectées.

1 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET VALIDATION

L'inventaire est à la fois une cartographie et une base de données des mares. Les modes de sorties « sur papier » seront donc rapidement présentés avant de s'attacher à la validation des résultats.

1.1 Différentes sorties

Un Système d'Informations Géographique associe par essence des données géographiques et des données extérieures. L'inventaire est le produit de l'utilisation d'un S.I.G., il est donc normal que ses résultats rendent compte de cette particularité.

1.1.1 Les cartes des mares

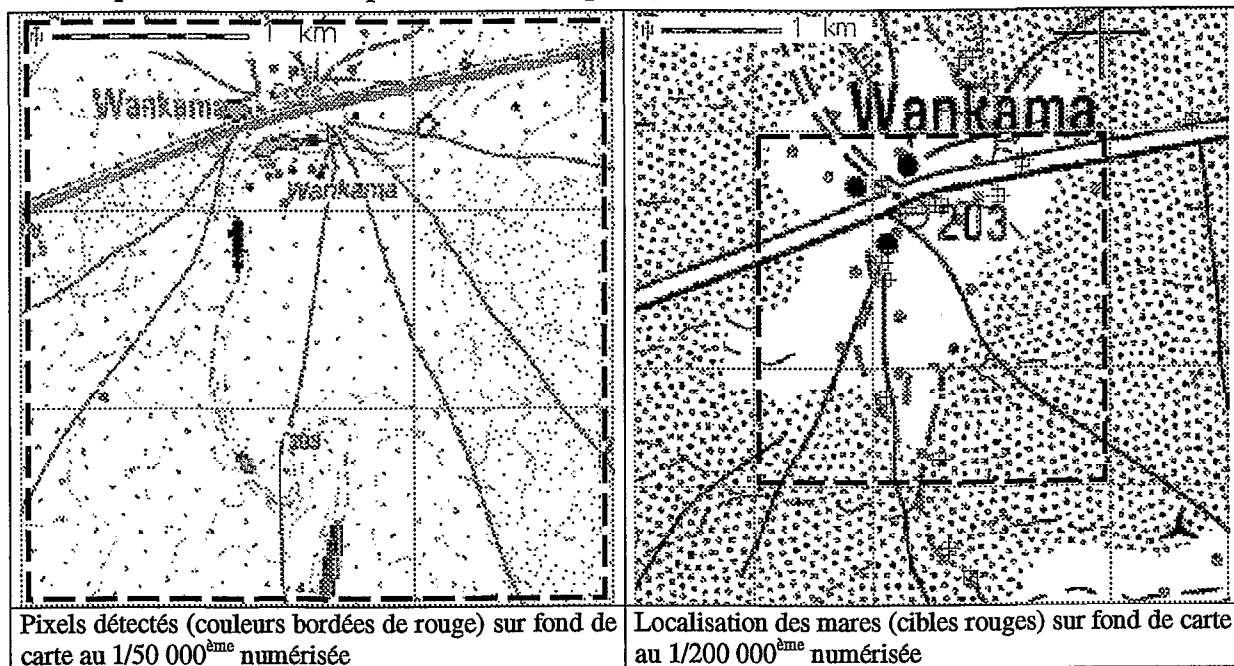
La cartographie la plus simple à réaliser est l'impression des pixels détectés sur le fond topographique des cartes au 1/50 000^{ème} numérisées. Cela donne une position précise et une appréciation de la taille et de la forme immédiate. C'est une carte de travail idéale, sauf que le fond numérisé ne couvre pas toute la zone d'étude (cf. annexe 2.4.).

Toute la zone de l'étude a donc été rapidement numérisé, mais à partir d'une carte au 1/200 000^{ème} à l'aide d'un scanner de format A4 avec une résolution de 10 m. Cette nouvelle acquisition se révèle intéressante, et après une légère étape de rectification géométrique (pour passer de la projection de Clarke 1880 à la projection UTM 31, mais aussi pour corriger les erreurs de positionnement sur la vitre du scanner) elle s'intègre parfaitement à la base de données et fournit des informations fiables malgré ce mode d'acquisition assez rapide. Malheureusement, cela n'aurait pas été possible de compléter le fond au 1/50 000^{ème} avec ce moyen d'acquisition (trop long et trop peu précis à cette échelle).

Cependant il est peu souhaitable de faire figurer les pixels détectés et regroupés en mares sur ce fond topographique. L'échelle originale de la carte donne lieu à des approximations et des simplifications (tracé du Kori par exemple). Il a donc fallu s'adapter à

l'échelle en ne faisant figurer les mares sur ce fond topographique qu'à l'aide d'un symbole situé à leur centroïde (cf. Chap. 4 § 2.1.1).

Enfin, sur une imprimante de résolution moyenne (300 ppp), et en format A4, seul des extraits de ces cartes peuvent être produits de manière satisfaisante. La comparaison de l'utilisation du fond au 1/50 000^{ème} et au 1/200 000^{ème} fait l'objet de la figure ci-dessous, mais deux extraits imprimés sur toute la surface d'une feuille A4 sont présentés en annexes 5.2. et 5.3., et permettent une comparaison sur une plus grande étendue.



(Le cadre en tirets définit la même zone et la grille a une résolution de 1 km sur les deux extraits)

Figures 5.1. et 5.2. : Extraits des deux possibilités de cartographie des mares aux alentours de Wankama
(Coordonnées du village : 462 518 E, 1 509 567 N, en mètres, proj. UTM 31)

Ces deux extraits montrent l'adéquation de la représentation des mares à chaque échelle utilisée. Si l'impression des pixels fournit un supplément d'information par rapport à la simple localisation par un symbole, elle devient inadaptée sur le fond topographique au 1/200 000^{ème}. Ce même fond ne peut convenir à des extraits trop petits : les approximations sont alors mises en évidence. Cela explique pourquoi le même extrait n'est pas présenté dans les deux figures 5.1. et 5.2..

Pour obtenir un seul document couvrant toute la zone, il faut disposer d'une imprimante de meilleure résolution et acceptant des grands formats de papier (si le temps n'avait pas manqué, des essais auraient pu être effectués à la Maison de la Télédétection, à Montpellier). Sinon, la réalisation d'une mosaïque d'extraits permet d'arriver à un résultat satisfaisant à condition de ne pas exiger une échelle normalisée (il est très difficile de prévoir l'échelle du document après impression).

Nous avons donc obtenu deux cartes, certainement améliorables dans leur forme, mais sur le principe, elles sont essentielles.

1.1.2 Listes

Le nombre et la nature des paramètres produits rendent difficile la production de cartes les illustrant. Il est beaucoup plus simple et synthétique d'avoir une base de données qui permette des sorties sous forme de listes contenant les paramètres désirés.

Cette forme d'information permet de présenter rapidement des mares sélectionnées selon certains critères, présentées dans l'ordre désiré et associées aux paramètres jugés utiles. A la page suivante figure par exemple les mares de Kori dont l'indice de persistance est 0001 (elles sont « détectables » (cf. Chap. 4 § 2.1.3) uniquement sur la scène de 1996).

Mares Nom	n°	Longitude E	Latitude N	Surface (10 ³ m ²)	Recoupement
Maourey 10	138	2°39,13'	13°35,68'	0,8	Aucun
Korto	163	2°41,44'	13°29,88'	0,4	JCD
Dey Tégui 1	171	2°47,23'	13°27,01'	0,8	Aucun
Dantiandou 3	185	2°44,57'	13°23,15'	0,4	Aucun
Banizoumbou 2	157	2°39,89'	13°31,94'	1,6	Aucun

(Coordonnées en degrés, minutes et centièmes de minutes, proj. Clarke 1880 ; JCD : mare recensée par J.C.DESCONNETS)

Tableau 5.3. : Liste des mares de Kori dont l'indice de persistance vaut 0001

Nous obtenons donc une liste de 5 mares. Tous les paramètres n'y figurent pas : le type et l'indice de persistance sont connus par la fabrication de la liste ; ces mares sont petites : le périmètre et l'indice de forme ne sont pas informatifs. Il reste donc le nom, le numéro d'indexation, la localisation (homogène à celle d'un petit appareil GPS et utilisable sur les cartes topographiques), la surface et le recoupement.

La liste des 191 mares et de tous les paramètres figure en annexe 5.1. Même s'il ne s'agit pas d'une base de données très complexe, le nombre d'objets et de paramètres rend indispensable les possibilités de tri et de sélection de l'information.

1.1.3 Produits annexes

Le travail effectué a nécessité de nombreuses étapes. Le résultat de l'inventaire ne se limite donc pas au produit attendu, mais consiste aussi en la mise en place d'une base de travail dont de nombreux éléments peuvent servir, ne serait-ce que pour réutiliser la méthode.

Ainsi, nous avons intégré dans le S.I.G. des images satellites. Quatre scènes sont immédiatement utilisables. Les cartes du NDVI peuvent avoir de nombreuses applications (la plus simple étant l'étude de la végétation). La numérisation d'une partie de la carte topographique au 1/200 000^{ème} constitue désormais une base informative dans le S.I.G..

1.2 Validation

Il faudra être très prudent dans cette étape car la connaissance extensive du terrain reste limitée. Nous validerons donc l'inventaire sur une zone restreinte où J.C.DESCONNETS avait recensé des mares sur le terrain. Sur l'intégralité de la zone d'étude, nous ne pourrions faire que des constatations assez simples. Enfin, des remarques sur la cohérence des résultats permettront de clore cette validation.

1.2.1 Recoupement de l'inventaire

Ce recoupement est complet et détaillé sur une petite zone, grâce à l'inventaire exhaustif sur le terrain de J.C.DESCONNETS. Cette petite zone confirme la qualité limitée des informations contenues dans les cartes topographiques, et les recoupements à l'échelle de la zone entière, qui ne se basent que sur les cartes topographiques, sont peu intéressants.

1.2.1.1 Comparaison avec l'inventaire de J.C.DESCONNETS

Cet inventaire sur le terrain a été réalisé de 1991 à 1993 sur un secteur de 600 km². Sur cette surface, nous avons comparé l'inventaire réalisé par télédétection, le recensement sur le terrain de J.C.DESCONNETS et la carte topographique.

Après comparaison entre les cartes au 1/50 000^{ème} et la carte au 1/200 000^{ème}, nous avons décidé de ne pas tenir compte des cartes au 1/50 000^{ème}. Celles-ci ne recensent quasiment pas de mares de plateaux, et la représentation assimile dans le même figuré les bas-fonds humides (non inventoriés par notre méthode) et les mares temporaires. Le recensement des mares présentes sur ce support ne présente donc pas d'intérêt (cf. note de bas de page n°1, page 71).

Le graphique ci-dessous montre de façon ensembliste les différents niveaux de recoupement des mares d'après les deux inventaires et d'après la carte au 1/200 000^{ème}. Afin de valider l'inventaire réalisé par télédétection, il est nécessaire de prendre en compte la typologie des mares.

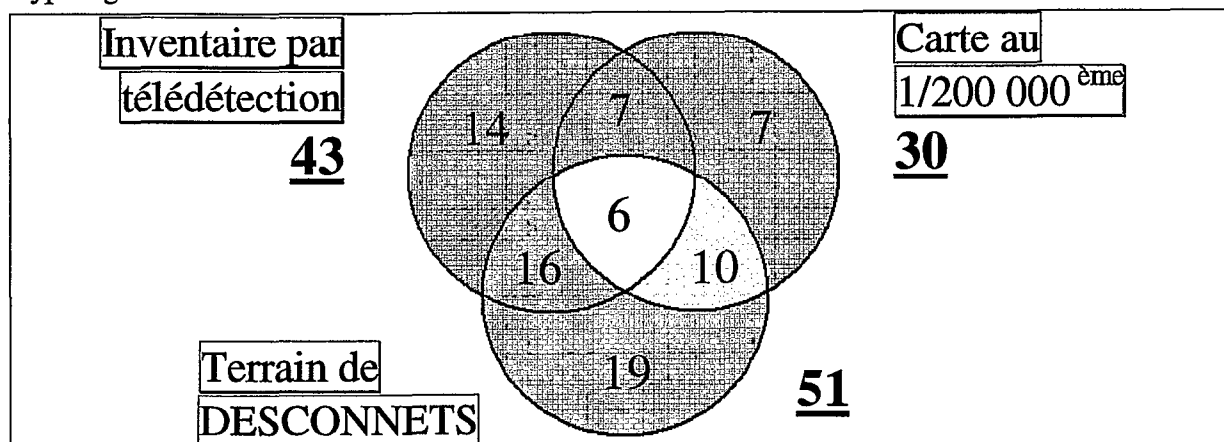


Figure 5.4. : Recouvrements globaux des mares sur les trois supports

(les chiffres en gras correspondent aux totaux des mares sur chaque support ; chaque cercle représente un support et les intersections représentent les recouvrements. Par exemple, il y a 16 mares qui sont communes à l'inventaire par télédétection et à celui sur le terrain, mais qui ne sont pas sur la carte)

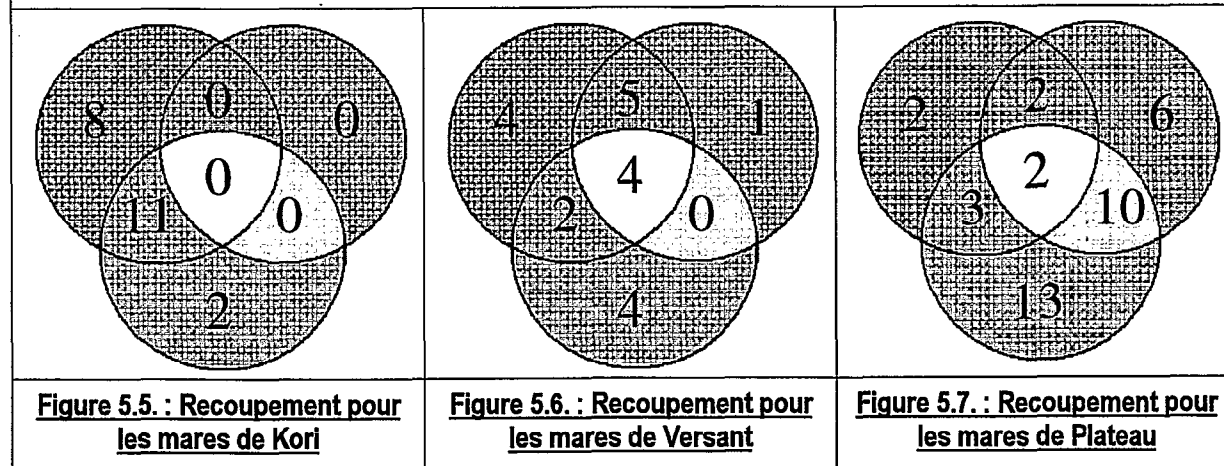


Figure 5.5. : Recouvrement pour les mares de Kori

Figure 5.6. : Recouvrement pour les mares de Versant

Figure 5.7. : Recouvrement pour les mares de Plateau

Les recouvrements sur la globalité des mares apparaissent peu favorables pour notre inventaire. Seules 22 mares sont communes à l'inventaire par télédétection et par J.C.DESCONNETS, alors que celui-ci relève 51 mares au total (figure 5.4.). Cela fait donc 29 mares que la méthode décrite au chapitre précédent ne recense pas. En fait, l'étude des recouvrements par type offre un constat beaucoup plus positif.

✓ En premier lieu, il convient de préciser la méthode d'inventaire de J.C.DESCONNETS. Il a été effectué par un survol aérien. Il est donc exhaustif, mais une sélection a été faite pour établir la typologie des mares. Les mares les plus petites ont donc été écartées de cet inventaire. Il n'est donc pas anormal que des mares de notre inventaire ou sur la carte ne soient pas présentes dans le recensement de J.C.DESCONNETS.

✓ Dans le même ordre d'idée, il est évident à la lecture de ces figures que la carte topographique est bien pauvre en mares et peu complémentaire par rapport aux deux autres sources de données. Il est même permis de douter de l'importance des 7 mares qui ne sont recensées que sur ce support. J.C.DESCONNETS possédait cette carte, il a donc dû vérifier toutes les mares y figurant. C'est un point important pour la validation de l'inventaire sur toute la zone d'étude. D'autant que la carte se base sur des données de 1975. Le nombre total de mares a très bien pu augmenter depuis, du fait de l'augmentation générale du ruissellement observée depuis 20 ans.

✓ Le dernier point rappelle les priorités de l'inventaire. En effet, les mares de plateau (figure 5.7.) ne seront sans doute pas intégrées au modèle hydrologique : leur infiltration et donc leur rôle dans la recharge de la nappe est négligeable. La qualité de l'inventaire des mares de plateau n'est donc pas très importante. A l'inverse, la validité de l'inventaire pour les mares de Kori est nécessaire. Or, sur 13 mares de Kori recensées par J.C.DESCONNETS, 2 seulement ne figurent pas dans notre inventaire (figure 5.5.).

✓ Les mares de Versant présentent un bilan satisfaisant (figure 5.6.). Le point positif vient des 4 mares communes aux trois supports. De plus, 11 des 15 mares de ce type dans notre inventaire se retrouvent sur un autre support.

L'étude des recoupements sur la petite zone de l'inventaire (figures 5.5. à 5.7.) de DESCONNETS permet donc de valider l'inventaire par télédétection, mais rend compte aussi de ses limites.

Le mauvais inventaire des mares de plateau, bien que peu dommageable pour les objectifs du travail, est dû aux problèmes de discrimination spectrale et spatiale. En effet, les pixels « douteux » en zone de plateau ont été souvent écartés. Il est probable que des mares de plateau se soient ainsi trouvées éliminées de l'inventaire.

De plus, il s'agit du type de mare associé aux superficies les moins importantes. Le problème de la « pureté » du pixel se pose donc et augmente les chances de détecter ces mares comme des pixels litigieux.

L'inventaire visait à inventorier les mares qui jouent un rôle hydrologique. Sur la zone de l'inventaire de J.C.DESCONNETS, il remplit parfaitement son office pour les mares de Kori et de manière satisfaisante pour les mares de Versant.

1.2.1.2 Sur toute la zone d'étude

Sur toute la zone d'étude, les cartes topographiques seront les seuls éléments de comparaison.

Nous avons associé à chaque mare les différents supports sur lesquels elle figurait (cf. Chap. 4 § 2.2.3) sous l'appellation Recoupement. Cette caractéristique va nous aider à fournir quelques indications sur la validité de l'inventaire sur toute la zone.

Sur 191 mares, 114 ne figurent sur aucune carte (ni dans l'inventaire de J.C.DESCONNETS). La cohérence des résultats permettra de déterminer en partie si ces mares découlent d'une mauvaise méthode ou au contraire de la bonne capacité du satellite à voir ce que d'autres n'ont su ou pu voir.

27 mares inventoriées figurent sur la carte au 1/200 000^{ème} et 47 sur la carte au 1/50 000^{ème} (1). C'est peu, mais nous rejoignons les considérations qui nous ont fait adopter le satellite comme moyen de recensement. Si les cartes avaient recensé les mares de manière satisfaisante, nous les aurions utilisées.

La caractéristique Recoupement permet surtout d'attribuer une certaine importance à des mares (de durée ou de taille, puisque plusieurs sources les ont vues), mais elle ne donne pas beaucoup d'indications quant à la validité de l'inventaire. La cohérence de l'inventaire devra donc être vérifiée. Elle fait l'objet du paragraphe 1.2.2. de ce chapitre.

1.2.1.3 Vérifications en juillet-août 1998

La vérification de l'inventaire a posteriori a été effectuée en deux temps. Le cheminement le long du Kori, de Dantiadou (sud de la zone) à Loga (nord de la zone) peut se faire sur une piste en voiture par temps normal (pas après de fortes pluies, les inondations et les champs cultivés interdisant les contournements).

D'abord, les techniciens sur place ont parcouru des portions du Kori et relevé les mares présentes, leur niveau, leurs dimensions et leur localisation à l'aide d'un appareil G.P.S.

Le résultat de ces vérifications sur le terrain met en lumière une limitation prévisible de notre méthode. Beaucoup de mares s'assèchent très rapidement, parfois en quelques heures. Ce phénomène semble particulièrement marqué dans la zone déficitaire en mares de notre inventaire. Notre inventaire, par le jeu des dates de prises de vues par rapport aux événements pluvieux, ne peut qu'inventorier les mares qui restent en eau de manière significative une dizaine de jours après la pluie. La quantification du nombre de mares ainsi manquantes est difficile.

Ensuite, trois personnes du laboratoire d'hydrologie sont allés au Niger au début du mois d'août 1998. Ils avaient les cartes et la liste de toutes les mares inventoriées. L'un des buts de leur mission était de vérifier notre inventaire et dans la mesure du possible d'apporter des indices pour quantifier la proportion de mares très éphémères.

Malheureusement, de très forts événements pluvieux le 1^{er} août ont entraîné un remplissage inhabituel du Kori, et la plupart des dépressions topographiques se sont ainsi trouvées changées en mares. Niamey a d'ailleurs connu à cette occasion d'importantes inondations. La vérification de l'inventaire sur le terrain était donc impossible du fait des difficultés d'accès. Un survol avion a donné une couverture photographique essentielle pour la suite du découpage du paysage hydrologique, en mettant en évidence les lieux, même mineurs, de concentration des eaux. Il n'est pas disponible à ce jour, mais il sera exploité ultérieurement aux fins de validation. Si toutes les surfaces en eaux à ce moment-là ne peuvent se retrouver dans l'inventaire, l'inverse doit être vrai : toutes les mares inventoriées devraient se trouver en eaux sur cette couverture aérienne.

1.2.2 Cohérence des paramètres et de l'inventaire

La validation par le terrain et par les recoupements a défini les limites de détection de certains types de mares. Heureusement, les mares les plus importantes, hydrologiquement et

(1) La carte au 1/50 000^{ème} se prête peu au recensement des mares sur ce seul support. Par contre, elle est plus complète que la carte au 1/200 000^{ème} quand nous regardons uniquement les endroits où nous avons déjà détecté une mare. Cette différence s'explique aussi par la présence de quelques mares de Kori sur la carte au 1/50 000^{ème}.

en termes de surface, sont détectées. L'étude de la cohérence des résultats va nous permettre de dire que tous les objets détectés sont bien des mares.

Cette cohérence se base surtout sur l'étude des surfaces et des indices de forme par type de mare. Nous allons voir les surfaces moyennes et les indices de forme moyens par type de mare, avant d'examiner la répartition des surfaces pour les mares de Plateau et les mares de Kori.

1.2.2.1 Valeurs moyennes par type

Nous rappelons que pour dresser le graphique des valeurs moyennes ci-dessous, les mares les plus petites (1 ou 2 pixels) n'ont pas d'indice de forme attribué et 7 mares ne sont pas considérées (mares « hors-catégorie »). Le graphique concerne donc 184 mares.

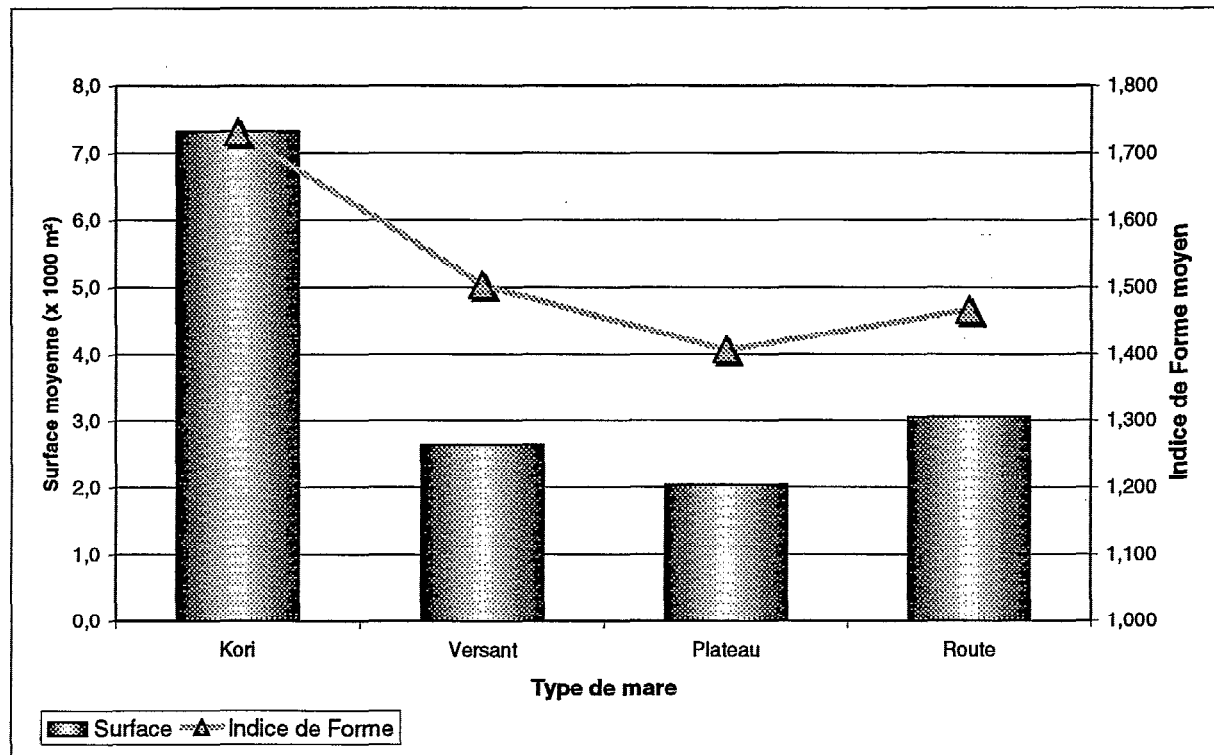


Figure 5.8. : Surfaces moyennes et Indices de Forme moyens par type de mare

Les mares de Kori se distinguent nettement. Ce sont les mares les plus grandes et les plus allongées (un objet circulaire aura un indice de forme égal à 1, et il augmente avec l'allongement de l'objet, cf. Chap. 4 § 2.1.2). A l'inverse, les mares de Plateau sont les plus petites et elles possèdent la plus faible moyenne d'indice de forme. Elles sont donc de forme ramassée. L'attribution d'un type déterminé à une mare s'est fait en totale indépendance de ces deux facteurs. Nous ne regardions que le contexte de la carte topographique.

Ce résultat est complètement cohérent, puisque les mares de Kori s'inscrivent dans le lit fossile d'un cours d'eau. Elles sont donc naturellement allongées. Les mares de Plateau se forment dans des dépressions circulaires.

Les mares de Versant et de Route présentent des valeurs intermédiaires, une distinction est possible d'après la répartition (cf. annexe 4.4) mais le paragraphe suivant ne traitera que des mares de Kori et de Plateau.

1.2.2.2 Répartition des mares en classes de surface

Le constat sera sensiblement le même que celui du paragraphe précédent, mais les études des répartitions en classes de surface par type de mare vont nous permettre quelques constatations supplémentaires.

Nous allons uniquement dans ce paragraphe nous intéresser aux mares de Kori et de Plateau. Les mares de Versant sont intermédiaires et les mares de Route ne sont pas intéressantes pour l'étude.

L'annexe 4.4. présente néanmoins les quatre histogrammes de répartition en nombre et en fréquence des quatres types de mare.

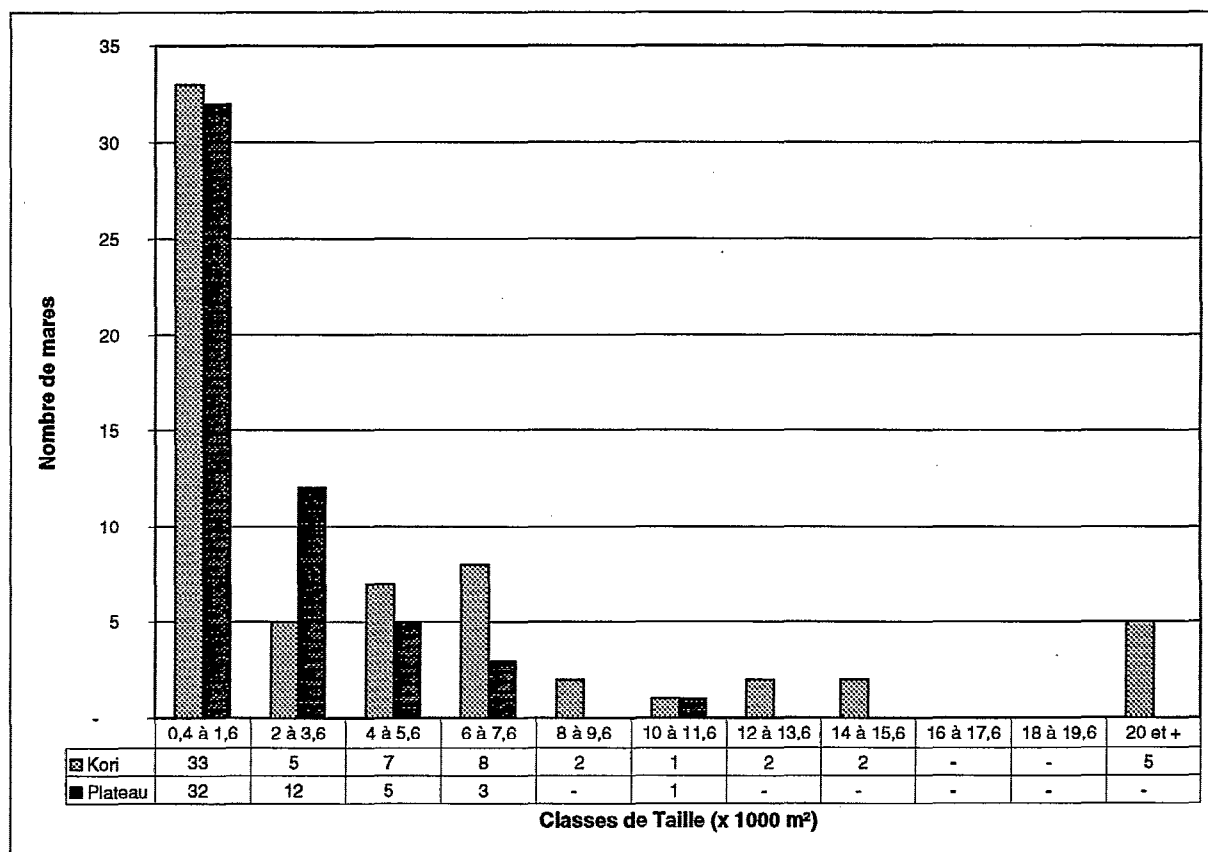


Figure 5.9 : Répartition en classes de taille des mares de Kori et des mares de Plateau

Plus de 80% (44 sur 54) mares de plateau ont une valeur de surface inférieure à 4 000 m² (10 pixels). Cette proportion tombe à moins de 60% (38 sur 65) pour les mares de Kori. De plus, les mares de Kori comprennent 5 des 6 mares qui font plus de 20 000 m² (2 ha), la sixième étant une mare de Versant.

1.2.3 Conclusion

L'inventaire apparaît donc comme satisfaisant et le satellite s'est montré capable d'inventorier de nouveaux objets. Les limites de la détection mises en évidence, par rapport à la taille et à la persistance des mares, correspondent aux limitations acceptables dans l'optique des objectifs du stage, que ce soit la modélisation hydrologique ou la gestion des ressources régionales.

2 DISCUSSION

Deux aspects constituent la base de la discussion des résultats. D'abord, les paramètres de caractérisation des mares ne sont pas forcément proches de la réalité qu'ils sont censés représenter. Ensuite, plusieurs hypothèses ont été émises lors de la découverte d'une zone où l'inventaire ne relevait que peu de mares. Envisager chacune de ces hypothèses permet de remettre en question la méthode employée.

2.1 Représentativité des paramètres calculés

Nous cherchons ici à évaluer les erreurs d'estimations dans la surface des mares, et à comprendre les limites de l'information contenue dans les indices de forme et de persistance.

2.1.1 Surface

Les résultats de l'inventaire ne rendent compte de la surface des mares que par le nombre de pixels détectés. Il s'agit généralement d'une sous-estimation. Pour évaluer l'erreur commise, il faudrait connaître les dimensions réelles des mares au moment de la prise de vue, ce qui est impossible à réaliser.

Nous nous contenterons donc d'énumérer les sources possibles d'erreur, et de discuter de l'importance de la sous-estimation en fonction de la taille de l'objet.

La sous-estimation vient essentiellement du fait que la mare n'est détectée que par ses pixels purs (ou presque). Les pixels constitués en partie d'une mare et en partie de sa bordure ne sont donc pas compris dans la surface détectée.

Une deuxième source de sous-estimation vient de la mauvaise juxtaposition des différentes scènes. En extrayant dans la première étape (cf. Chap. 4 § 1.2.1) les pixels qui étaient inférieurs au seuil sur au moins deux scènes différentes, nous avons exclu d'une zone « mare » les pixels qui ne possédaient pas d'équivalents à une autre date. Il s'agit donc d'une surface minimum dans le temps, et dans les points communs à deux scènes.

De plus, les surfaces en eaux, par le jeu combiné de l'infiltration et de l'évaporation, sont susceptibles de varier rapidement.

Toutes les sources d'erreurs énumérées ci-dessus conduisent à penser que l'estimation est relativement moins bonne pour les petites mares que pour les grandes. Par exemple, un pixel peut représenter une mare de 400 m² ou de 1 600 m² suivant l'adéquation entre la grille d'échantillonnage du capteur et la nature du terrain (cf. Chap. 2. § 2.2.2). De plus, la proportion de pixels de bordure, donc de sous-estimation, est beaucoup plus importante pour une petite mare que pour une grande. Si la juxtaposition de deux scènes est mauvaise à l'endroit d'une mare traduite sur chaque scène par deux pixels purs, un seul pixel peut être inventorié, soit une diminution de taille de 50%.

Nous avons vu dans la synthèse bibliographique (cf. Chap. 2 § 1.1.3) l'exemple de OUSMANE (1994) qui compare les différentes manières d'extraire le contour réel des mares. Il s'agit de méthodes complexes, longues à mettre en œuvre et à répéter pour chaque mare. Pour le problème posé, la localisation des mares permet de définir un bassin-versant, alors que

la surface n'apporte qu'une information supplémentaire. Nous nous en sommes donc tenus à une indication qualitative.

2.1.2 *Indice de forme*

L'indice de forme découle de l'information pixellaire de la surface et du périmètre. Il possède donc les inconvénients et les approximations de cette approche. De plus, 80 mares ne possèdent pas d'indice de forme car elles ne sont détectées que sur un ou deux pixels. Pour ces tailles, l'indice de forme n'a pas de sens.

Sinon, l'indice de forme est difficilement critiquable. Même appliqué à des surfaces et périmètres réels, cela reste une construction théorique. Le fait d'avoir un indice corrigé permet de s'affranchir de l'influence de la taille.

2.1.3 *Indice de persistance*

L'indice de persistance se présente de manière assez simple. Deux remarques s'imposent à son sujet.

D'abord, l'élaboration d'un indice de persistance plus complexe ne se justifie pas. Nous aurions pu faire intervenir les changements de surface, ou de NDVI en continu de chaque mare. Mais les incertitudes quant à l'extraction de ces valeurs, ainsi qu'aux proportions dans lesquelles nous les aurions fait jouer nous en a dissuadé. Un indice produit de cette manière, en l'état de nos connaissances, aurait été associé à des erreurs telles que nous aurions pu perdre l'information recherchée.

2 tableaux permettent de résumer les résultats liés à cet indice.

Nombre de scènes	1	2	3	4
Nombre de Mares	48	40	61	42

Tableau 5.10. : Répartition des mares en fonction du nombre de scènes où elles apparaissent

Date de prise de vue	20-août-92	25-sept-92	05-oct-92	03-nov-96
Nombre de mares	164	131	124	60

Tableau 5.11. : Nombre de mares présentes sur chaque scène utilisée

A l'examen de ces deux tableaux, nous pouvons déjà remarquer un nombre important de mares présentes sur 3 ou 4 scènes. Comme nous avons inventorié un grand nombre de petites mares et peu de grandes mares, nous aurions pu nous attendre à retrouver cette distribution dans le temps : un grand nombre de mares sur une ou deux scènes et peu sur 4.

Le deuxième tableau, lui, conforte l'information donnée sur la persistance des mares. En effet, plus la date de prise de vue est tardive dans la saison, moins il y a de mares. Cependant, la scène du 3 novembre 1996 est à considérer à part puisqu'il s'agit d'une année et d'une méthode d'extraction différente.

L'indice de persistance peut également être interprété autrement que comme le reflet de la durée de vie réelle des mares.

Il peut en effet être considéré comme un indice de recoupement, avec pour bases informatives les quatre scènes SPOT. Les mares ne figurant que sur une scène seraient ainsi moins validées que celles présentes sur les quatre scènes.

Il reflète aussi la méthode d'extraction. Ainsi, une mare extraite ne peut pas être présente uniquement sur la scène du 25 septembre 1992 ou uniquement sur celle du 05 octobre 1992. En effet, ces deux scènes n'ont été utilisées que dans la première étape où les pixels extraits devaient absolument répondre aux conditions d'extraction sur deux scènes au

moins. Plus gênante pour le caractère d'information sur la persistance est la deuxième étape de l'extraction qui n'a utilisé que la scène du 20 août 1992. Le nombre plus important de mares présentes sur cette scène trouve donc une autre explication que la seule disparition de mares après la saison des pluies.

L'indice de persistance a été construit de manière à diminuer l'impact de ces deux informations, parfois parasites. Il suffit donc de les garder en tête pour éviter les interprétations trop rapides. Le mieux est d'interpréter cet indice au pied de la lettre : est-ce que sur toute la surface (agrandie par dilatation) de la mare considérée, à chaque date, il existe au moins un pixel qui puisse être interprété comme de l'eau ?

Dans ce sens, cet indice reste performant. Une refonte et une interprétation supplémentaire seront sans doute nécessaires au moment du passage au modèle hydrologique.

La plupart des paramètres devront d'ailleurs être repensés lorsque les entrées du modèle hydrologique seront un peu précisées. Il est vrai qu'ils restent proches des données et de la méthode utilisée. Mais en l'état actuel des choses, alors que nous ne savons pas encore comment les résultats seront intégrés au modèle, il s'agit de caractérisations performantes et liées, même de façon qualitative, à la nature des mares.

2.2 Les hypothèses de l'hétérogénéité de la distribution

Ce paragraphe va nous permettre de revenir sur la théorie qui justifie notre méthode. En effet, nous avons constaté qu'une zone (sud-est) était très faiblement pourvue en mares (cf. Chap. 4 § 1.3.1). Des hypothèses ont alors été émises. Chaque hypothèse porte sur une qualité naturelle de la mare qui « cacherait » cette mare au capteur SPOT-XS. Nous allons donc discuter de l'influence théorique de différents aspects naturels des mares sur la détection.

2.2.1 La turbidité et la couleur

Nous avons vu que l'obstacle théorique à la détection des mares dans la zone correspond à leur turbidité (cf. Chap. 2 § 2.2). Or, il se peut que les mares de la zone où nous constatons l'absence de mares (par ma méthode) aient une turbidité différente. Trois cas sont envisageables :

➤ Les mares de la région concernée sont moins turbides. Dans ce cas, la méthode d'inventaire devrait être de plus en plus performante avec de l'eau de plus en plus pure. Si nous nous reportons aux signatures spectrales de la figure 2.3. (Chap. 2, § 2.2.1), cette hypothèse devient improbable. Il faudrait que cette baisse de la turbidité se traduise par une baisse plus rapide de la réflectance moyennée dans XS2 que dans XS3 pour augmenter le NDVI. Or la courbe de réflectance se rapprocherait au contraire de celle de l'eau pure, qui a un NDVI largement négatif, donc largement inférieur au seuil de détection.

➤ Les mares peuvent être plus turbides. Si nous nous en tenons à une théorie selon laquelle les mares se rapprocherait spectralement des sols clairs en étant de plus en plus turbides, cette hypothèse est envisageable. Néanmoins, les mares détectées sont déjà extrêmement turbides. Nous avons eu l'occasion de le remarquer sur les signatures radiométriques (figure 3.4., Chap. 3 § 2.2.1) où la signature des mares était extrêmement proche de celle des sables dans le visible. La connaissance indirecte du terrain (personnes, photographies...) ne rapporte pas de différence notable dans la zone déficitaire et conduit aussi à penser que la turbidité des mares bien détectées correspond à un maximum pour de l'eau stagnante.

➤ La nature des éléments en suspension peut être différente dans le sud-est de la zone d'étude. Notamment, les mares pourraient changer de couleur. La bande de longueur d'onde mesurée par XS2 (610-690 nm) correspond au rouge. Or, la proximité de la signature radiométrique dans XS2 des mares connues et des sables pourrait être due à un pic de réflectance local dans le rouge des mares. En l'absence de ce pic local, le code de réflectance associé au canal XS2 pourrait baisser, et la détection par le NDVI devenir moins performante. En d'autres termes, la région concernée pourrait contenir des mares moins « rouges » que les mares détectées par ailleurs. Le NDVI ne permettrait alors pas de les détecter.

Ce dernier point a été soulevé par la très bonne extraction des mares « de route ». Il s'agit de creusements pour remblayer la route où l'eau se concentre. La latérite (matériau constitutif des routes, riche en oxydes de fer) aurait pu donner une coloration rouge à ces mares. Mais les personnes sur le terrain n'ont pas remarqué de différences de couleur pour les mares de route. Leur facilité de détection viendrait seulement de leur forme compacte.

De plus, une étude de la pédologie, limitée à la zone des supersites d'HAPEX-Sahel, n'a pas permis de mettre en évidence des différences notables en ce sens.

2.2.2 *La végétation*

Le NDVI connaît ses valeurs les plus faibles pour des mares. Mais, il s'agit à l'origine d'un indice de végétation. La présence de végétation va donc induire des valeurs hautes du NDVI.

Qu'en est-il lorsqu'un pixel comprend à la fois une mare et de la végétation ? Le signal est mixte et la valeur du NDVI intermédiaire.

Les mares non détectées seraient donc pourvues en végétation, dans la mare elle-même (îlots d'arbres à Gao (*Acacia albida*)) ou en bordure. C'est une hypothèse qui pourrait convenir pour la mare de Tondi Kiboro, que nous n'inventorions pas, longue, étroite et bordée de végétation. La conjonction de la faible largeur et de la présence de végétation conduirait pour cette mare à l'impossibilité de l'extraction.

Pour minimiser cet argument, nous pouvons rappeler que nous nous trouvons au Sahel, dans une région semi-aride, où la pression anthropique est de plus en plus importante. La végétation n'est donc pas luxuriante. De plus, nous voyons mal pourquoi cela serait localisé à une zone de l'inventaire, d'autant plus que la pluviométrie y est justement faible en 1992. Enfin, l'intégration de quelques arbres sur des mares de plusieurs centaines de mètres carrés ne devrait pas perturber le signal de façon significative.

2.2.3 *L'infiltration rapide des mares*

L'hypothèse que nous privilégions actuellement consiste en effet à considérer qu'un nombre non négligeable de mares disparaît peu après les pluies. En effet, l'acquisition de la scène de 1996 n'a pas permis de recenser de manière importante des mares dans la région considérée. L'inégale répartition pluviométrique n'est pas une explication suffisante.

Pour se détacher de la méthode employée, nous avons parcouru simplement les compositions colorées. Aux points connus des mares, aucune forme semblable à celle d'une mare ne se détache réellement.

Il est donc permis de penser que les mares, pour s'intégrer de manière aussi parfaite au paysage environnant (sur les images satellites) doivent ressembler de manière frappante à une étendue sableuse, c'est à dire être vides d'eau au moment des prises de vue.

Là où pourrait être perçu un grand inconvénient de l'inventaire surgit alors une avancée dans la connaissance du fonctionnement hydrologique de la région. Ainsi, les mares de Kori entre Banizoumbou et Dantiandou s'infiltreraient plus rapidement que dans le reste de la zone d'étude.

La vérification est absolument nécessaire. Si cette hypothèse se vérifie, la compréhension des mécanismes hydrologiques et hydrogéologiques de la zone se verrait légèrement affinée.

Ce chapitre valide donc l'inventaire des mares. Les paramètres devront être affinés lors du passage au modèle, mais ils remplissent tout de même leurs fonctions indicatives.

Quant à la discussion, elle renvoie finalement au double problème de la résolution spatiale et temporelle des satellites évoqué dans la synthèse bibliographique (cf. Chap.2 § 1.1.1). Si le satellite s'est révélé capable de détecter des nouveaux objets, il est toujours limité par sa résolution spatiale (mares de plateaux) et par sa résolution temporelle, diminuée par la forte nébulosité en saison des pluies.

La méthode, elle, s'est trouvée confirmée sur ses fondements théoriques et par sa mise en pratique.

L'inventaire des mares reste cependant le premier pas d'un découpage plus important du paysage hydrologique. Le chapitre suivant relate donc nos premières avancées pour l'extraction des ravines, et les perspectives plus générales.

Chapitre 6 :

Ravines et perspectives

Les mares ne suffisent pas à décrire le paysage hydrologique. Le ruissellement se concentre pour inciser les versants et former des ravines qui peuvent atteindre 2 m de large sur autant de profondeur. La détection de tels objets ne peut être envisagée par une simple récupération de pixels ravines comme il y eut des pixels mares.

Ce chapitre expose donc les premières avancées dans l'extraction des ravines et l'état de la réflexion. Ensuite, nous verrons les perspectives plus larges de l'analyse du paysage et de la modélisation hydrologique.

1 L'ÉBAUCHE DE DÉTECTION DES RAVINES

Le temps a manqué pour déboucher sur des résultats définitifs. Mais, après ce travail de débroussaillage assez important, et issu d'une assez longue réflexion, les principes d'une méthode peuvent être présentés.

Nous recherchons non seulement le tracé des ravines le plus précis possible, aux fins d'évaluer des longueurs et des pentes, mais aussi les interruptions en zone d'épandage (cf. Chap. 1 § 1.3), points importants d'interruption du ruissellement et de la toposéquence.

1.1 Pertinence de la carte topographique

La résolution de SPOT (20 x 20 m²) semble être un obstacle à la précision de la détection des ravines par ce seul moyen. Nous n'aurions jamais été sûrs par exemple qu'une interruption du tracé corresponde à une zone d'épandage ou bien à une interruption de la détection.

L'utilisation des différents supports devient alors indispensable, et même plus, le satellite ne doit pas être considéré comme la base de l'information.

Il restait donc les cartes topographiques et les photographies aériennes. Les photographies aériennes étaient disponibles sous trois formats : le premier de l'I.G.N. en 1975, le second de la N.A.S.A. acquis lors de la période d'observation intensive d'HAPEX-Sahel en 1992 (échelle 1/60 000^{ème}, sur format papier ou numérique) et le dernier (acquis en cours de stage) de l'I.G.N. avec un financement de la coopération japonaise en 1992.

Le premier est trop ancien pour décrire un milieu et des objets qui évoluent rapidement. Le second est en meilleure concordance avec les autres données, mais sa qualité est sujette à caution (déformations importantes de l'image et suivi du plan de vol approximatif).

Par contre, les cartes topographiques au 1/50 000^{ème} sont issues de la photo-interprétation de photographies aériennes de 1992 (réalisés par l'I.G.N. avec un financement de la coopération japonaise) de meilleure qualité, par des professionnels. Cela serait donc une grande prétention de vouloir faire mieux avec du matériel de moins bonne qualité.

Par contre, la réalisation des cartes a visiblement nécessité quelques simplifications de tracé. J'illustre ci-dessous l'une des plus flagrantes.

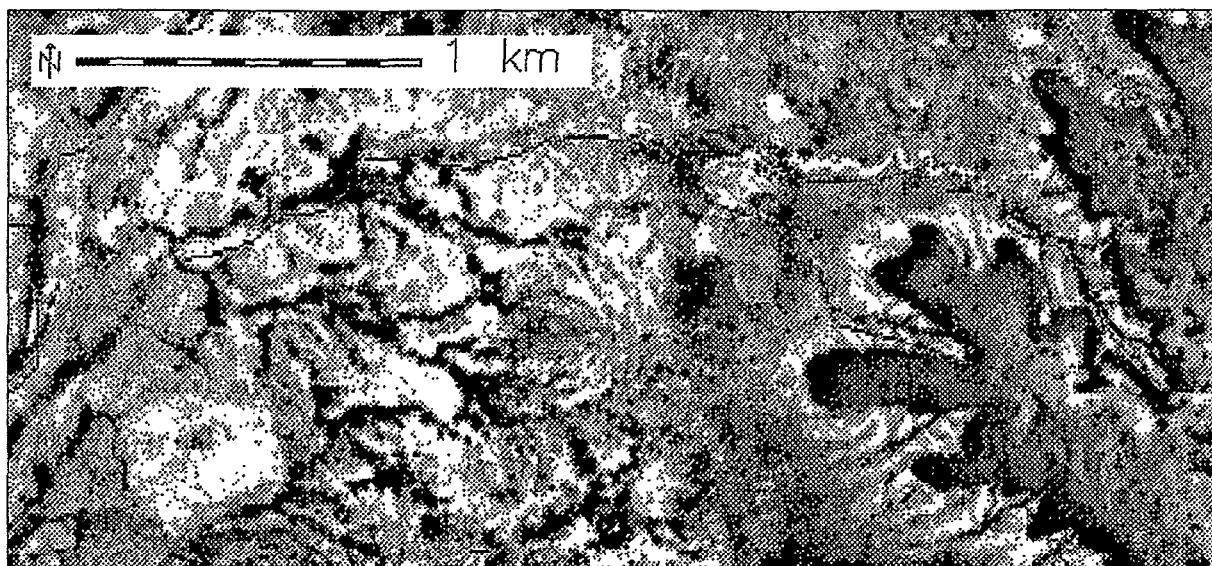


Figure 6.1. : Juxtaposition d'un extrait d'une photographie aérienne et du tracé d'une ravine extraite de la carte au 1/50 000^{ème} numérisée

Nous pouvons voir sur cette figure une ravine (arborescence bleue est-ouest) descendant du plateau (à l'est) pour rejoindre le Kori (tracé bleu nord-sud à l'ouest). Certainement pour ne pas surcharger la carte, les ravines secondaires au sud qui rejoignent la ravine figurée avant qu'elle ne rejoigne le Kori, ne sont pas notées sur la carte.

Nous voyons un réseau de ravines issues d'un plateau être figuré par une unique ravine sur la carte. Si les cartes topographiques au 1/50 000^{ème} vont constituer la base de l'information, la deuxième étape du travail, pouvant utiliser cette fois-ci les photographies aériennes et les images satellites, consistera à inventorier et corriger les omissions commises.

Une autre source d'erreur peut survenir de la numérisation des ravines sur les cartes. En effet, le passage de la carte papier à un fichier vecteur sous GRASS via une table à numériser est une source d'approximations et d'erreurs en tous genres.

1.2 Les premiers tests de complémentarité des informations

L'étape de numérisation en vecteurs des ravines des cartes aurait été un processus long, et répétitif. Dans l'intérêt du stage, nous avons donc décidé d'extraire plus rapidement les ravines du fond topographique déjà numérisé. Ensuite, des premiers tests de correction des erreurs ont été effectués.

1.2.1 L'extraction des ravines du fond numérisé

Les valeurs associées au fond de carte numérisé correspondent en fait aux couleurs utilisées sur la carte. Nous avons donc pu facilement extraire tous les pixels bleus. Mais les ravines sont figurées en tirets bleus, et il ne s'agit pas des seuls objets bleus sur la carte. Une

étape d'extraction du linéaire, via des étapes de dilatation et de squelettisation, a permis, non sans mal, de s'affranchir de ce problème.

Nous ne la présentons pas plus en détail, car elle ne donne pas un résultat entièrement satisfaisant et elle ne sera pas reprise si la table à numériser est utilisée par la suite. Notamment, sur la figure 6.1., la plupart des approximations de localisation et de tracé sont dues à cette étape.

Nous avons donc obtenu le « réseau hydrographique » (ravines et Kori) présent sur le fond au 1/50 000^{ème} numérisé, c'est-à-dire sur une partie de la zone d'étude seulement. Heureusement cette zone comprend les environs du village de Wankama, bien connus. Des tests sont donc possibles.

1.2.2 *Le NDVI au 18 juin 1992*

Si les ravines ne font que 2 m de large environ, elles sont bordées de végétation ligneuse au long de leur tracé. Sur les images satellites, il devient alors raisonnable de penser que l'extraction de linéaires de végétation est possible.

Juste avant la première pluie, l'humidité de l'air augmente sensiblement. Ce changement est mis à profit par les arbres et les arbustes pour reverdir. Par contre, le tapis herbacé important en cours de saison des pluies n'apparaît que plus tard.

Nous possédons une scène au 18 juin 1992. Nous avons donc pu procéder à quelques essais sur l'extraction des linéaires de végétation à cette date où nous supposons que les arbustes se distinguent du reste du paysage.

L'utilisation de l'opérateur chapeau-haut-de-forme (cf. Chap. 2 § 3.2) sur la carte du NDVI du 18 juin 1992 permet effectivement de mettre en évidence des linéaires, mais incomplets et très bruités. Les possibilités d'utilisation de ce support sont donc limitées à la comparaison manuelle ou très légèrement automatisée.

1.2.3 *Les photographies aériennes*

Elles sont numérisées avec une résolution de 3, 5 ou 6 m d'après des documents au 1/60 000^{ème}. Cette résolution semble mieux convenir à l'objet recherché. Les tests sur ce support sont très encourageants. Le meilleur opérateur trouvé jusqu'à présent est le calcul de l'écart-type des valeurs de luminosité sur un carré de 25 m de côté. La concordance avec la carte est illustrée ci-dessous.

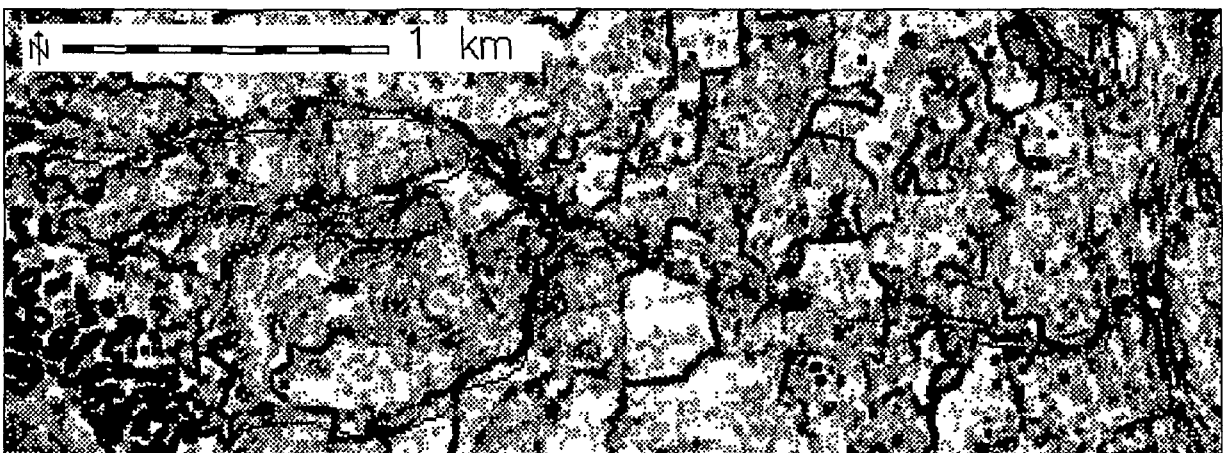


Figure 6.2. : Concordance entre le résultat du calcul de l'écart-type sur un carré de 25 m de côté (en fond) et le tracé des ravines sur la carte (en bleu)

La figure 6.2. appelle deux commentaires. D'abord, les opérateurs morphologiques sont bien une source de bruitage de l'information (extraction de nombreuses formes pas toujours identifiables) qui exclut pratiquement des extractions automatiques de formes naturelles complexes. Par contre, les ravines de la photographie aérienne sont bien mises en évidence, et l'amélioration du tracé de la carte est possible manuellement.

Cette figure peut ne pas paraître très probante, mais il s'agit d'un opérateur simple, testé rapidement. Une méthode plus fine de mise en évidence devra être mise au point. Ce test reste néanmoins encourageant et l'interprétation des photographies aériennes pourra s'aider de ce moyen.

1.3 Recommandations

Nous pensons que l'extraction des ravines doit se faire selon les étapes suivantes :

1. Utilisation de la table à numériser pour acquérir un fichier des vecteurs du réseau hydrographique figuré sur les cartes au 1/50 000^{ème}.
2. Elaboration de la procédure de mise en évidence des réseaux sur les photographies aériennes.
3. Repérage des différents types d'erreurs possibles de ce fichier : localisation, oublis, simplifications du tracé.
4. Correction automatisée au maximum de ce qui peut l'être.
5. Correction manuelle.
6. Vérifications, validations...

La localisation des zones d'épandage reste un problème délicat puisque les interruptions de tracé ne correspondent pas forcément à une interruption de la ravine et qu'elles semblent difficiles à caractériser (pas d'amas particulier de végétation, position le long de la toposéquence aléatoire...). Il y aura peut-être lieu de dissocier l'extraction du tracé des ravines et le repérage des zones d'épandage.

2 PERSPECTIVES

Le travail relaté dans ce mémoire n'est que le début d'un travail plus important. La campagne de terrain de 1998 a perfectionné la connaissance du terrain, et l'on peut envisager la suite du travail en deux étapes.

2.1 La campagne de terrain d'août 1998

Bien que située dans un contexte particulier, après de très fortes pluies, la mission sur le terrain d'août 1998 a rapporté ses fruits. De nouvelles données ont été acquises, mais le rappel du terrain a permis aux modélisateurs hydrologiques de reconsidérer un peu le travail de modélisation.

2.1.1 *L'acquisition de nouvelles données*

Les nouvelles données sont au nombre de trois :

- Les photographies aériennes au 1/60 000^{ème} de la campagne I.G.N. de 1992 (avec un financement de la coopération japonaise). Les couples stéréoscopiques sont compris. Il s'agit donc des meilleures photographies aériennes disponibles.
- Une tournée en avion a permis d'acquérir la couverture aérienne du Kori principalement. L'appareil photographique était un classique 24 x 36 personnel. L'altitude de prise de vue était de 2 000 m. Il s'agit donc d'une couverture à usage qualitatif, où des tests pourront être effectués avant de passer aux photographies de l'I.G.N.. Les conséquences des fortes pluies y sont visibles, toutes les dépressions sont donc en eau.
- Un découpage géomorphologique a été fait par des ingénieurs agronomes de l'I.C.R.I.S.A.T. (International Crop Research Institute in the Sahelian Tropics) à Niamey (GERARD *et al.*, 1997 et HIERNAUX *et al.*, 1997). Il peut être récupéré, et le gros avantage de cette cartographie consiste en une classification qui fait apparaître en particulier les zones d'épandage.

Ces nouvelles données sont donc des apports importants au jeu de données disponibles. Elles seront les nouvelles bases de travail. Les possibilités offertes par les deux couvertures aériennes sont prometteuses.

2.1.2 *Les variations du paysage*

C'est sans doute le rappel le plus important que le retour au terrain ait permis. En effet, entre 1992 et 1998, la morphologie du paysage a déjà changé de manière importante, sous l'action conjuguée du climat et des hommes. Le modèle hydrologique doit-il intégrer une modélisation de cette évolution ?

En effet, le modèle doit fonctionner sur le long terme, suivant des scénarios de pluie et avec pour conséquence, des données sur la recharge de la nappe. Il semble donc qu'il faille intégrer la morphogénèse, sous réserves qu'une étude de la sensibilité du modèle le confirme.

Il en résulte que la suite du travail devra comprendre deux étapes.

2.2 Deux étapes

2.2.1 *Valider le modèle sur la zone avec les données de 1992*

Nous revenons ici aux considérations des objectifs et du contexte scientifique du travail. Les mares et les ravines ne suffiront pas à décrire complètement le paysage. Il faudra délimiter les versants, définir les bassins...

Une étape très délicate concernera l'affectation des paramètres d'entrée du modèle hydrologique à chaque objet.

Concernant plus précisément les mares, il faudra traduire ou refondre les paramètres qui y sont associés. De plus, les limites de la détection mises en évidence au chapitre précédent devront donner lieu à l'acceptation des résultats, ou à une amélioration par d'autres voies. Nous pouvons ainsi imaginer que les mares manquantes soient simulées de manière statistique, ou par le repérage des dépressions dans le terrain.

2.2.2 *Intégrer la variabilité temporelle*

Peu de choses ont été faites en ce sens à ce jour, les possibilités sont donc nombreuses. Dans le cadre de l'intervention de la télédétection, il est sûr que l'acquisition de nouvelles scènes sur plusieurs années pourrait fournir des données intéressantes. Ainsi, la cartographie des états de surface (CASENAVE et VALENTIN, 1989) pourrait être refaite à intervalles réguliers, tous les 2 ans par exemple, et fournir une bonne base pour estimer les variations.

Par contre, si cette dynamique entraîne des modifications du paysage telles que les unités hydrologiques doivent être redéfinies pour chaque pas de temps, cela posera un sérieux problème. Des travaux sont en cours à l'ORSTOM sur ce sujet.

Le travail exposé concerne le début d'un long travail. Si le stage se termine sur des perspectives intéressantes, les recherches doivent se poursuivre avant de pouvoir aboutir aux objectifs du programme qui sont l'évaluation de la sensibilité des ressources en eau aux modifications climatiques et environnementales de la zone.

CONCLUSION

Le travail exposé dans ce mémoire a accompli un pas significatif pour la modélisation hydrologique sur le bassin du Kori de Dantiandou en fournissant un inventaire des mares de la région. L'usage de la télédétection, même si nous avons pu approcher ses limites, s'est révélé pertinent et efficace.

Cependant, ce travail a demandé beaucoup de temps, les mares n'étant pas des surfaces en eaux conventionnelles. L'extraction des ravines s'est ainsi trouvée retardée. Une méthode a été testée, mais pour fournir des résultats, un important travail doit encore être fait.

Au niveau des méthodes, ce mémoire porte une analyse assez complète sur la pertinence du NDVI pour la détection des surfaces en eaux au Sahel, et constitue un exemple détaillé de son utilisation. Une conclusion claire sur l'utilisation des opérateurs morphologiques n'est pas apparue, mais nous pouvons dire qu'ils ne se suffiront certainement pas à eux-même pour extraire les ravines.

La modélisation hydrologique sur tout le bassin-versant du Kori de Dantiandou doit encore passer par de nombreuses étapes. A plus longue échéance encore se trouve la modélisation couplée de tout le cycle de l'eau dans la région.

Les dernières acquisitions de données (couvertures aériennes principalement) sont très prometteuses et permettront certainement une progression plus rapide dans l'analyse du paysage en vue de la modélisation hydrologique. Le terme le plus sensible reste certainement la détermination des paramètres d'entrée du modèle.

Bibliographie

BABAN S.M.J. - 1997

Potential applications of satellite remote sensing (SRS) and GIS in maximizing the use of water resources in the Middle East : examining Iraq as a case study. « Remote sensing and geographic information systems for design and operation of water resources systems », Proceedings of the Rabat symposium S3, April 1997. IAHS publ. n°242, pp. 23-32.

BAKER W.L., CAI Y. - 1992

The r.le programs for multiscale analysis of landscape structure using the GRASS geographical information system. Landscape Ecology, vol. 7, n°4, pp. 291-302.

BAUMGARTNER M.F., APFL G.M. - 1996

Remote sensing and geographic information systems. Hydrological Sciences Journal, vol. 41, n°4, août 1996, pp. 593-607.

BELHADJ-AISSA A., SMARA Y. - 1993

Mise en évidence des phénomènes hydriques sur le piémont sud de l'Atlas algérien à l'aide de la télédétection satellitaire. Télédétection des ressources en eau, Cinquièmes journées scientifiques du « Réseau Télédétection » de l'AUPELF-UREF, Tunis, 21-24 septembre 1993, Presses de l'Université du Québec, pp. 3-10.

BEN ASHER J., HUMBORG G. - 1992

A partial contributing area model for linking rainfall simulation data with hydrographs of a small arid watershed. Water Resources Research, vol. 28, n°8, pp. 2041-2047.

BEVEN K. - 1989

Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models. Journal of Hydrology, n°105, pp. 157-172.

BIEMI J., JOURDA J.P., DESLANDES S., GWYN H. - 1995

Positionnement, productivité et gestion des forages en milieu fissuré de Côte d'Ivoire par télédétection et système d'information géographique. Atelier CEMAGREF-ENGREF-ORSTOM-FAO : Télédétection et gestion des ressources en eaux, Montpellier, 29 nov.-1 déc. 1995.

BROWN R.J., BRISCO B., LECONTE R., MAJOR D.J., FISHER J.A., REICHERT G., KORPORAL K.D., BULLOCK P.R., POKRANT H., CULLEY J. - 1993

Potential applications of RADARSAT data to agriculture and hydrology. Canadian J. of Remote Sensing, vol. 19, n°4, nov-déc 1993, pp. 317-329.

CAPPELAERE B., MAIA A., PEUGEOT C., VIEUX B., COLAS E., 1998.

Compared sensitivity analysis of a fully-distributed and of a semi-distributed hydrological model for a sahelian watershed. Congrès de l'European Geophysical Society, Nice, avril 1998.

CASENAVE A., VALENTIN C. - 1989

Les états de surface de la zone sahélienne. Influences sur l'infiltration. Editions ORSTOM, Paris.

COURAULT D., D'HERBES J.M., VALENTIN C. - 1990

Le bassin versant de Sama-Dey. Premières observations pédologiques et phytoécologiques. ORSTOM Bondy 36 p.

DEBAINE F., MERING C., PONCET Y. - 1988

La morphologie mathématique en teintes de gris appliquée à la mise en évidence de réseaux. Photo-interprétation, numéro spécial : morphologie mathématique, vol. 88, n°5 / 2, septembre - octobre 1988.

DESCONNETS J.C. – 1994

Typologie et caractérisation hydrologique des systèmes endoréiques en milieu sahélien (Niger – degré carré de Niamey). Thèse de Doctorat, Mécanique, Génie mécanique, Génie civil, Université de Montpellier II, 325 pp. + annexes.

DESCONNETS J.C., VIEUX B.E., CAPPELAERE B., DELCLAUX F. – 1996

A GIS for hydrological modelling in the semi-arid, HAPEX-Sahel experiment area of Niger, Africa. Transactions in GIS, vol. 1, n°2, pp. 82-94.

DESTIVAL I. – 1988

Détection des réseaux linéaires sur les images SPOT. Photo-interprétation, numéro spécial : morphologie mathématique, vol. 88, n°5 / 3, septembre - octobre 1988.

EL HADANI D. – 1997

Télé-détection et système d'information géographique pour la gestion et la recherche de l'eau. « Remote sensing and geographic information systems for design and operation of water resources systems », Proceedings of the Rabat symposium S3, April 1997. IAHS publ. n°242, pp. 197-204.

ELSHEIKH S., GUERCIO R. - 1997

GIS topographic analysis applied to unit hydrograph models : sensitivity to DEM resolution and threshold area. « Remote sensing and geographic information systems for design and operation of water resources systems », Proceedings of the Rabat symposium S3, April 1997. IAHS publ. n°242, pp. 245-253.

FLOUZAT G. – 1988

Morphologie mathématique et analyse des images de télé-détection. Photo-interprétation, numéro spécial : morphologie mathématique, vol. 88, n°5 / 1, septembre - octobre 1988.

GRASS 4.1. User's Reference Manual - 1993

United States Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratories. Champaign, Illinois (U.S.A.).

GERARD B., BUECKERT A., HIERNAUX P., MARSCHNER H. - 1997

Non-destructive measurement of plant growth and nitrogen status of pearl millet with low-altitude aerial photography. Plant nutrition - for sustainable food production and environment, pp. 373-378.

GNOUMOU Y., YERGEAU M., BENIE G.B., TRAORE K., CHAKROUN H., GOITA K., TAO A. - 1993

Cartographie opérationnelle des ressources en eau de surface au Burkina Faso. Télé-détection des ressources en eau, Cinquièmes journées scientifiques du «réseau Télé-détection» de l'AUPELF-UREF, Tunis, 21-24 septembre 1993, Presses de l'Université du Québec, 1995, pp. 99-109.

GOUTORBE J.P., LABEL T., DOLMAN A.J., GASH J.H.C., KABAT P. KERR Y.H., MONTENY B., PRINCE S.D., STRICKER J.N.M., TINGA A., WALLACE J.S. - 1997

An overview of HAPEX-Sahel : a study in climate and desertification. J. of Hydrology 188-189, pp. 4-17.

GROOM G.B., FULLER R.M., JONES A.R. – 1996

Contextual correction : techniques for improving land cover mapping from remotely sensed images. Int. J. Remote Sensing, vol. 17, n°1, pp. 69-90, janvier 1996.

HIERNAUX P., FERNANDEZ-RIVERA S., SCHLECHT E., TURNER M.D., WILLIAMS T.O. - 1997

Livestock-mediated nutrient transfers in Sahelian agro-ecosystems. Soil Fertility Management in West African Land Use Systems, p. 339, Mars 1997.

HOEPFFNER M., GOUTORBE J.P., SELLERS P., TINGA A. - 1990
HAPEX-Sahel, Plan d'expérience. Montpellier/Toulouse, septembre 1990.

KITE G.W., PIETRONIRO A. - 1996
Remote sensing applications in hydrological modelling. Hydrological Sciences Journal, vol. 41, n°4, pp. 563-591, août 1996.

LEDUC C., DESCONNETS J.C. - 1994
Variability of groundwater recharge in the Sahel : piezometric survey of the Continental Terminal aquifer (Niger). « Future Groundwater Resources at Risk », Proceedings of the Helsinki Conference, June 1994. IAHS, publ. n°222.

LEDUC C., FAVREAU G. - 1998
Fluctuations à long terme du niveau d'une nappe sahélienne : la nappe phréatique du Continental Terminal aux environs de Niamey (Niger) entre 1957 et 1997. « Variabilité des Ressources en Eau en Afrique au XX^e siècle ». IAHS publ. n° à paraître, 1998.

LEDUC C., LOIREAU M. - 1997
Fluctuations piézométriques et évolution du couvert végétal en zone sahélienne (Sud-ouest du Niger). « Sustainability of water resources under increasing uncertainty », Proceedings of the Rabat symposium S1, April 1997. IAHS publ. n°240.

MATTIKALLI N.M., ENGMAN E.T. - 1997
Microwave remote sensing and GIS for monitoring surface soil moisture and estimation of soil properties. « Remote sensing and geographic information systems for design and operation of water resources systems », Proceedings of the Rabat symposium S3, April 1997. IAHS publ. n°242, pp. 229-236.

OUSMANE A. - 1994
Reconstitution de chroniques de données hydrologiques par télédétection. Cas du Niger. Mémoire de D.E.S.S. « Télédétection, méthodes et applications », Université Paris VI, E.N.S.G..

PEUGEOT C. - 1995
Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahélien (Niger). Expérimentations in-situ et modélisation. Thèse de doctorat, Mécanique, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 305 pp. + annexes.

PUECH C. - 1994
Plans d'eau sahéliens et imagerie SPOT : inventaire et évaluation des capacités d'exploitation. Colloque international « Eau, Environnement et Développement », Nouakchott, 20-22 mars 1994.

PUECH C. - 1995
Télédétection et modélisation hydrologique : quelle vision, quelle échelle, quels processus ? Atelier CEMAGREF-ENGREF-ORSTOM-FAO : Télédétection et gestion des ressources en eaux, Montpellier, 29 nov-1 déc. 1995.

RITCHIE J.C., SEYFRIED M.S. - 1997
Airborne laser altimeter applications to water management. « Remote sensing and geographic information systems for design and operation of water resources systems », Proceedings of the Rabat symposium S3, April 1997. IAHS publ. n°242, pp. 221-228.

SEGUIS L. - 1993

Modélisation de la signature spectrale d'eau continentale par prise en compte de l'épaisseur de la tranche d'eau, de la nature du fond et de la concentration de matières en suspension : exemple du fleuve Sénégal. Télédétection des ressources en eau, Cinquièmes journées scientifiques du «réseau Télédétection» de l'AUPELF-UREF, Tunis, 21-24 septembre 1993, Presses de l'Université du Québec, 1995, pp. 135-150.

SEGUIS L., PUECH C. - 1997

Méthode de détermination des invariants radiométriques adaptée au paysage semi-aride de l'Afrique de l'Ouest. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 18, n° 2, pp. 255-271.

STEWART J.B., ENGMAN E.T., FEDDES R.A., KERR Y.H - 1998

Scaling up in hydrology using remote sensing : summary of a Workshop. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 19, n°1, pp. 181-194, janvier 1998.

TAUPIN J.D., LEBEL T., CAZENAVE F., GREARD M., KONG J., LECOCQ J., ADAMSON M., D'AMATO N., BEN MOHAMED A. - 1993

EPSAT-Niger, suivi à long terme, Campagne 1992. Ed. ORSTOM/DMT, avril 1993, 64 p. + annexes.

TAUPIN J.D., ROBIN J - 1997

EPSAT-Niger, suivi à long terme, Campagne 1996. Ed. ORSTOM/DMN, juin 1997, 50 p. + annexes.

TURNER M.D., CONGALTON R.G. - 1998

Classification of multi-temporal SPOT-XS satellite data for mapping rice fields on a West African floodplain. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 19, n°1, pp. 21-41, janvier 1998.

VERDIN J.P. - 1996

Remote sensing of ephemeral water bodies in western Niger. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 17, n°4, pp. 733-748, mars 1996.

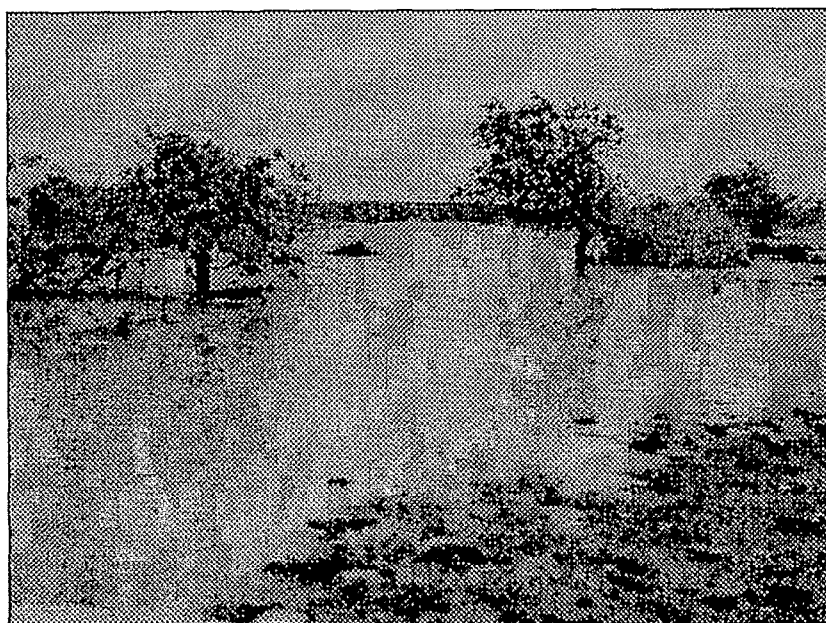
VIEUX B.E., GAUER N. - 1994

Finite-element modeling of storm water runoff using GRASS GIS. *Microcomputers in civil engineering*, vol. 9, 1994, pp. 263-270.

VINE P., PUECH C., GRESILLON J.M. - 1997

La télédétection, un outil pour mettre en évidence le rôle hydrologique de la végétation et des états de surface. « Remote sensing and geographic information systems for design and operation of water resources systems », *Proceedings of the Rabat symposium S3*, April 1997. IAHS publ. n°242, pp. 205-217.

ANNEXES



SOMMAIRE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : CLIMAT

Annexe 1.1. : Extrait localisé sur le Niger de « Afrique de l'ouest et centrale ; précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989) »
L'HÔTE Y. & MAHÉ G. (1996)

Annexe 1.2. : Principaux paramètres climatiques enregistrés à la station de Niamey (PEUGEOT, 1995)

ANNEXE 2 : DONNÉES

Annexe 2.1. : Données disponibles sur support papier

Annexe 2.2. : Données disponibles sur support informatique

Annexe 2.3. : Caractéristiques des trois images satellites utilisées

Annexe 2.4. : Graphique de recouvrement de différents supports

ANNEXE 3 : PRINCIPES DE TÉLÉDÉTECTION

ANNEXE 4 : MÉTHODE

Annexe 4.1. : Répartition des valeurs du NDVI restreinte au voisinage de trois mares connues

Annexe 4.2. : Nombre de pixels et de zones extraits suivant la valeur du NDVI

Annexe 4.3. : Les 62 mares étudiées cas par cas dans la 2^{ème} étape

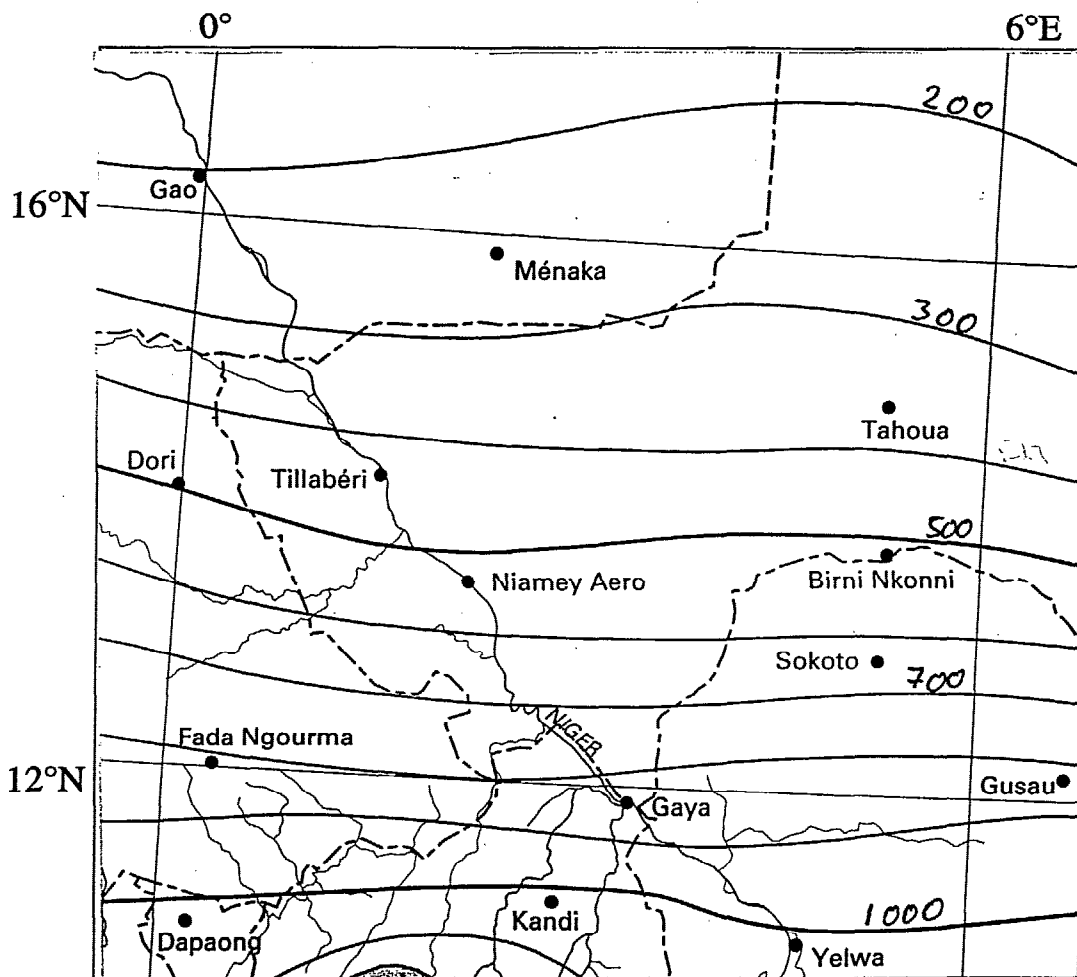
Annexe 4.4. : Histogrammes de répartition en classes de taille des 4 types de mares

ANNEXE 5 : RÉSULTATS

Annexe 5.1. : Liste des 191 mares et des paramètres associés

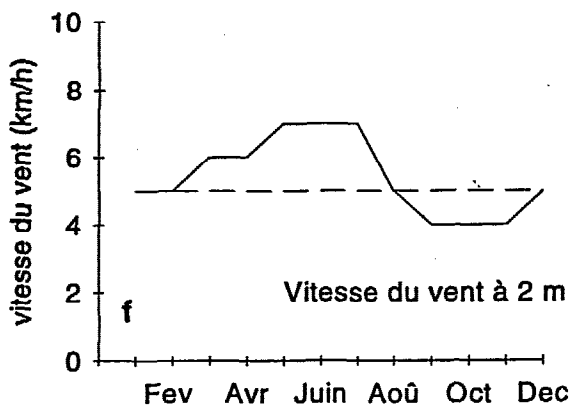
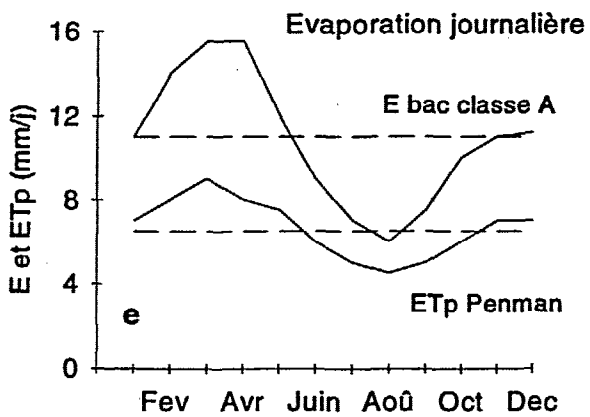
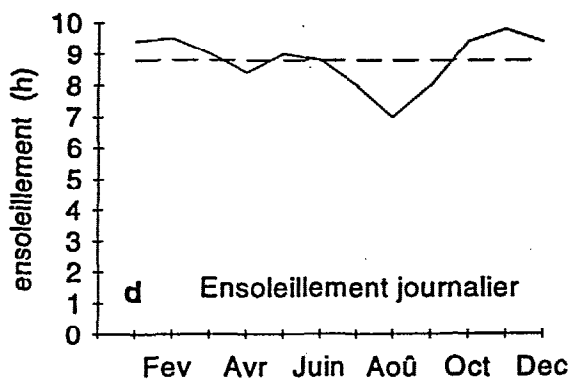
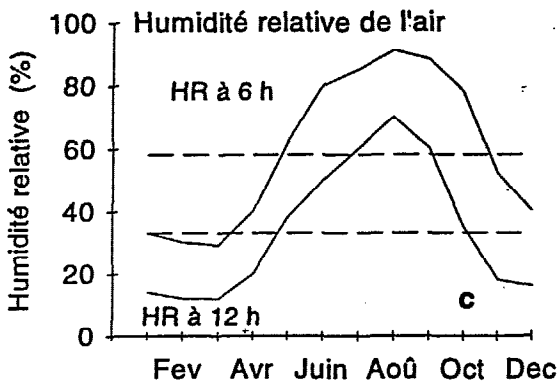
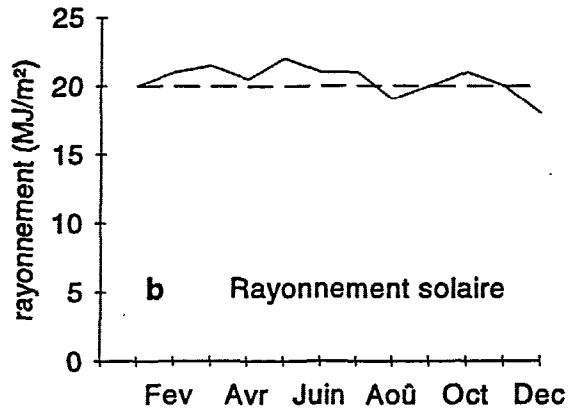
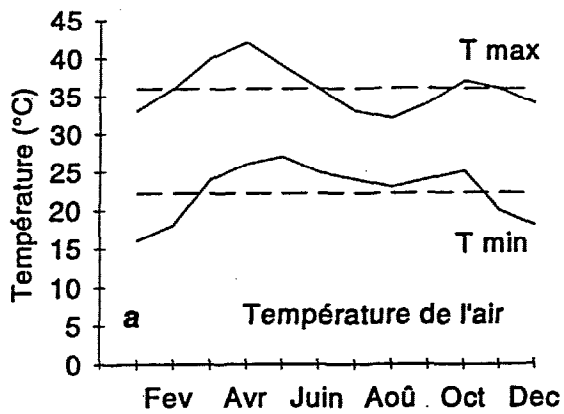
Annexe 5.2. : Extrait de la cartographie de l'inventaire sur le fond topographique au 1/50 000^{ème} numérisé

Annexe 5.3. : Extrait de la cartographie de l'inventaire sur le fond topographique au 1/200 000^{ème} numérisé



(Précipitations en mm)

Annexe 1.1. : Extrait localisé sur le Niger de « Afrique de l'ouest et centrale ; précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989) »
L'HÔTE Y. & MAHÉ G. (1996)



————— moyenne mensuelle

- - - - - moyenne annuelle

Annexe 1.2. : Principaux paramètres climatiques enregistrés à la station de Niamey (PEUGEOT, 1995)

Inventaire des cartes et images disponibles				19/02/98
Type	Localisation	échelle	date	Remarques
Carte topo. bassin versant de mare sur papier calque				
	Wankama	1/7.500	juin 93	
		1/5.000	juin 93	
		1/500	janvier 92	
	Sama Dey	1/1.000	février 93	nivellement rattaché
		1/500	décembre 92	équidistance 0.25 m
	Yélouma	1/500	janvier 92	
		1/200		équidistance 0.25 m
	Bazanga (2 ex.)	1/5.000	juin 93	
		1/500	janvier 92	
	Sulfey Bangou	1/200	décembre 92	équidistance 0.25 m
	Maourey Kouara Zéno	1/500	décembre 92	équidistance 0.25 m
	Poura Bangou	1/200		équidistance 0.25 m
	Karbanga	1/200	février 93	nivellement indépendant
	Kampa Zarma	1/200	décembre 92	équidistance 0.25 m
	Banizoumbou	1/200	février 93	nivellement indépendant
cartes IGN - IGNN				
	Fokeye	1/200.000	1964	
	Goudoumaria	1/200.000	1962	
	Termit	1/200.000	1966	
	Lagane	1/200.000	1964	
	Kossatori	1/200.000	1975	
	Bosso	1/200.000	1959	
	Maïne-Soroa	1/200.000	1962	
	Agadem	1/200.000	1967	
	Ngourti	1/200.000	1975	
	Nguigmi	1/200.000	1979	
	Ansongo	1/500.000		contient Tillabéri, Ouallam
	Filingué	1/200.000	1ère édition 1961	
	Ouallam (10 ex.)	1/200.000	1ère édition 1961	
	Tillabéri (4 ex.)	1/200.000	couv. aér. 1960, réédition 1972	photocopies
	Kirtachi (2 ex.)	1/200.000	couv. aér. 1975, réédition 1982	photocopies
	Niamey (4 ex.)	1/200.000	couv. aér. 1975, 2ème éd. 1980	
	Dosso	1/200.000		
	Ouahigouya 3d	1/50.000	1988	Burkina Faso
Carte Niamey ND 31 - IX				
	1a (2 ex.)	1/50.000	couv. aér. 1960, édition 1964	tirage préliminaire
	1b (2 ex.)	1/50.000	couv. aér. 60 et 75, 2ème éd. 1981	
	1c	1/50.000	couv. aér. 60 et 75, 2ème éd. 1980	
	1d (3 ex.)	1/50.000	couv. aér. 60 et 75, 2ème éd. 1981	
	2a (2 ex.)	1/50.000	couv. aér. 1975, 2ème éd. 1986	
	2b (2 ex.)	1/50.000	couv. aér. 1975, 2ème éd. 1986	
	2c	1/50.000	couv. aér. 1975, 2ème éd. 1986	
	2d	1/50.000	couv. aér. 1975, 2ème éd. 1986	
	3a (3 ex.)	1/50.000	couv. aér. 60 et 75, 2ème éd. 1980	
	3b (2 ex.)	1/50.000	couv. aér. 1960, édition 1964	tirage préliminaire
	3c	1/50.000	couv. aér. 1992, édition 1995	Coop. Japonaise
	3d	1/50.000	couv. aér. 1992, édition 1996	Coop. Japonaise
	4a (2 ex.)	1/50.000	couv. aér. 1992, édition 1997	Coop. Japonaise
	4b	1/50.000	couv. aér. 1992, édition 1998	Coop. Japonaise
	4c	1/50.000	couv. aér. 1992, édition 1999	Coop. Japonaise
	4d	1/50.000	couv. aér. 1992, édition 2000	Coop. Japonaise
Carte Kirtachi ND 31 - III				
	4d	1/50.000	couv. aér. 1975, 2ème éd. 1986	
Cartes d'occupation des sols de la région sud-Niger				
	Niamey 3	1/100.000	1979	Hamdallaye
	Niamey 4	1/100.000	1979	Banizoumbou
Images satellites				
Composition colorée SPOT				
	degré carré Hapex-Sahel (7 ex.)	1/200.000		
	zones 1, 2,3 du degré carré	1/50.000		
	site central Est et Ouest	1/50.000		plastifié

Annexe 2.1. : Données disponibles sur support papier

Caractéristiques des photos disponibles (coordonnées UTM)													
répertoire : /hapex/desconne/photo_air													
mapset : photo_air													
proj:	zone:	north:	south:	east:	west:	cols:	rows:	e-w resol:	n-s resol:	format:	compressed:		
ph37_6	1	31	1493017	1482829	451591	441763	1638	1698	6	6	1	0	
ph38_6	1	31	1493205	1482945	456080	446090	1665	1710	6	6	1	0	
ph39_6	1	31	1493059	1482877	460671	450237	1739	1697	6	6	1	0	
ph40_6	1	31	1493101	1482883	465123	455217	1651	1703	6	6	1	0	
ph41_6	1	31	1493146	1482922	469682	459740	1657	1704	6	6	1	0	
ph42_6	1	31	1493155	1482955	474152	464186	1661	1700	6	6	1	0	
ph43_6	1	31	1493082	1482840	478729	468721	1668	1707	6	6	1	0	
ph54_6	1	31	1500763	1490521	452883	443043	1640	1707	6	6	1	0	
ph55_6	1	31	1500819	1490613	457147	447199	1658	1701	6	6	1	0	
ph56_6	1	31	1500685	1490551	461413	451411	1667	1689	6	6	1	0	
ph57_6	1	31	1500929	1490645	466172	456188	1664	1714	6	6	1	0	
ph58_6	1	31	1500767	1490519	470382	460410	1662	1708	6	6	1	0	
ph59_6	1	31	1501064	1490882	474752	464732	1670	1697	6	6	1	0	
ph60_6	1	31	1500906	1490652	479084	469220	1644	1709	6	6	1	0	
ph63_6	1	31	1505336	1495094	478360	468142	1703	1707	6	6	1	0	
ph64_6	1	31	1505460	1495302	473809	463573	1706	1693	6	6	1	0	
ph65_6	1	31	1505369	1494863	469577	458933	1774	1751	6	6	1	0	
ph66_6	1	31	1505841	1495311	465242	454556	1781	1755	6	6	1	0	
ph67_6	1	31	1506861	1496439	460673	450221	1742	1737	6	6	1	0	
ph68_6	1	31	1506272	1495874	455608	445840	1628	1733	6	6	1	0	
ph69_6	1	31	1505775	1495587	451396	441310	1681	1698	6	6	1	0	
ph82_6	1	31	1512704	1502240	472789	462265	1754	1744	6	6	1	0	
ph83_6	1	31	1512349	1502131	467943	457863	1680	1703	6	6	1	0	
ph84_6	1	31	1512097	1501927	463572	453576	1666	1695	6	6	1	0	
ph85_6	1	31	1512372	1502022	459061	448951	1685	1725	6	6	1	0	
ph86_6	1	31	1512303	1502103	454720	444742	1663	1700	6	6	1	0	
ph87_6	1	31	1512133	1502017	450378	440358	1670	1686	6	6	1	0	
répertoire : /hapex/desconne/photo_air3x3													
mapset : photo_air3x3													
proj:	zone:	north:	south:	east:	west:	cols:	rows:	e-w resol:	n-s resol:	format:	compressed:		
ph65_3	1	31	1505368	1494865	469576	458935	3547	3501	3	3	1	0	
ph66_3	1	31	1505840	1495313	465241	454558	3561	3509	3	3	1	0	
ph83_3	1	31	1512348	1502133	467939	457865	3358	3405	3	3	1	0	
ph84_3	1	31	1512096	1501932	463568	453578	3330	3388	3	3	1	0	
Scènes SPOT disponibles sur le site hapex : www.orstom.fr/hapex/spot													
Date	K.J.	Lieu	Heure	Eastings	Northing	Resolution	Correct	nl	nc	Top left corner		Bottom right corner	
18/06/92	062-	Bani	10:33	467234,4	1494647	20	A+U	3479	3731	2E+06	429924	1459857	504544
23/06/92	061-	Say	10:37	399483,7	1438808	20	A+U	3489	3804	1E+06	361444	1403918	437524
24/06/92	061-	Niam	10:17	419879,2	1494671	20	A+U	3552	4221	2E+06	377669	1459151	462089
	061-	Say	10:17	408412,2	1441536	20	A+U	3548	4217	1E+06	366242	1406056	450582
20/08/92	062-	Baley	10:21	479688,8	1549334	20	A+U	3480	3748	2E+06	442209	1514534	517169
	061-	Koné	10:21	426226,7	1549717	20	A+U	3464	3883	2E+06	387397	1515077	465057
	061-	Niam	10:22	414186,5	1494569	20	A+U	3475	3947	2E+06	374717	1459819	453657
	062-	Bani	10:22	467499,2	1494506	20	A+U	3504	3735	2E+06	430149	1459466	504849
	062-	Birni	10:22	455234,3	1439025	20	A+U	3498	3796	1E+06	417274	1404045	493194
	061-	Say	10:22	402084,6	1438840	20	A+U	3485	3924	1E+06	362845	1403990	441325
25/09/92	062-	Baley	10:29	477732,3	1549514	20	A+U	3469	3580	2E+06	441932	1514824	513532
	061-	Koné	10:29	428599,3	1549729	20	A+U	3446	3599	2E+06	392609	1515269	464589
	062-	Bani	10:30	465363,4	1494633	20	A+U	3462	3573	2E+06	429633	1460013	501093
	061-	Niam	10:30	415943,6	1494562	20	A+U	3455	3637	2E+06	379574	1460012	452314
	062-	Birni	10:30	452154,5	1439012	20	A+U	3494	3622	1E+06	415935	1404072	488375
	061-	Say	10:30	403635,2	1441614	20	A+U	3434	3653	1E+06	367105	1407274	440165
05/10/92	062-	Bani	10:37	464781	1494466	20	A+U	3523	3792	2E+06	426861	1459236	502701
	061-	Say	10:37	399229,6	1438792	20	A+U	3492	3811	1E+06	361120	1403872	437340
15/10/92	062-	Bani	10:45	463541,2	1494531	20	A+U	3641	4576	2E+06	417781	1458121	509301
	061-	Say	10:45	397874,9	1438876	20	A+U	3642	4391	1E+06	353965	1402456	441785
21/10/92	062-	Bani	10:30	464641,5	1494656	20	A+U	3455	3598	2E+06	428662	1460106	500622
21/11/92	062-	Bani	10:34	460460,2	1482823	20	A+U	3474	3680	2E+06	423660	1448083	497260

Annexe 2.2. : Données disponibles sur support informatique

Spot Image, Scene-ID: 2 062-323 20-08-92 10:22:07 2 X

SCENE PARAMETERS

- Date and Time : 20-AUG-92 10:22:07
- K-J identification : 062-323
- Shift Along Track : 0
- Instrument : HRV2
- Spectral mode : XS
- Number of spectral bands : 3
- Spectral band indicators : XS1 XS2 XS3
- Angles
 - View zenith angle: 14.800 degrees
 - Satellite azimuth: 278.700 degrees
 - Sun azimuth: 89.800 degrees
 - Solar zenith angle: 22.100 degrees
 - Scene orientation angle: 8.700 degrees
- Number of lines: 3504
- Number of pixels per line: 3735

SCENE CENTER LOCATION

- Latitude : N 13.51980
- Longitude : E 2.70100
- Eastings : 467499.2 meters (UTM 31)
- Northings : 1494506.3 meters (UTM 31)

IMAGE GEOMETRY

- Map Projection: UTM 31
- X resolution: 20 meters
- Y resolution: 20 meters
- Top left corner:
 - Eastings : 430149.2 meters (UTM 31)
 - Northings : 1529546.3 meters (UTM 31)
- Bottom right corner:
 - Eastings : 504849.2 meters (UTM 31)
 - Northings : 1459466.3 meters (UTM 31)

PROCESSING

- Correction of atmospheric effects using SMAC Method : Rahman H. and G. Dedieu, SMAC: A Simplified Method of Atmospheric Correction of satellite measurements in the solar spectrum. Int. J. Remote Sens., 15, 123-143, 1994.
- Coefficients used to process this image:
 - Atmospheric water vapor content: 3.26000 (g/cm²)
 - Atmospheric Ozone Content: 0.24721 (atm.cm)
 - Aerosol Optical Thickness at 550 nm: 0.20000
 - Calibration for panchromatic channel: 0.00000 (W/m²/sr/um)
 - Calibration for XS1 channel: 0.63841 (W/m²/sr/um)
 - Calibration for XS2 channel: 0.62514 (W/m²/sr/um)
 - Calibration for XS3 channel: 0.69373 (W/m²/sr/um)
- Mapped in UTM 31 Projection.

Annexe 2.3. / a : Caractéristiques des trois images satellites utilisées

Spot Image, Scene-ID: 2 062-323 25-09-92 10:30:00 2 X

SCENE PARAMETERS

- Date and Time : 25-SEP-92 10:30:00
- K-J identification : 062-323
- Shift Along Track : 0
- Instrument : HRV2
- Spectral mode : XS
- Number of spectral bands : 3
- Spectral band indicators : XS1 XS2 XS3
- Angles
 - View zenith angle: -1.100 degrees
 - Satellite azimuth: 99.000 degrees
 - Sun azimuth: 128.300 degrees
 - Solar zenith angle: 22.800 degrees
 - Scene orientation angle: 9.000 degrees
- Number of lines: 3462
- Number of pixels per line: 3573

SCENE CENTER LOCATION

- Latitude : N 13.52070
- Longitude : E 2.67267
- Eastings : 465363.4 meters (UTM 31)
- Northings : 1494632.6 meters (UTM 31)

IMAGE GEOMETRY

- Map Projection: UTM 31
- X resolution: 20 meters
- Y resolution: 20 meters
- Top left corner:
 - Eastings : 429633.4 meters (UTM 31)
 - Northings : 1529252.6 meters (UTM 31)
- Bottom right corner:
 - Eastings : 501093.4 meters (UTM 31)
 - Northings : 1460012.6 meters (UTM 31)

PROCESSING

- Correction of atmospheric effects using SMAC Method : Rahman H. and G. Dedieu, SMAC: A Simplified Method of Atmospheric Correction of satellite measurements in the solar spectrum. Int. J. Remote Sens., 15, 123-143, 1994.
- Coefficients used to process this image:
 - Atmospheric water vapor content: 2.78000 (g/cm²)
 - Atmospheric Ozone Content: 0.24708 (atm.cm)
 - Aerosol Optical Thickness at 550 nm: 0.20000
 - Calibration for panchromatic channel: 0.00000 (W/m²/sr/um)
 - Calibration for XS1 channel: 0.63662 (W/m²/sr/um)
 - Calibration for XS2 channel: 0.62381 (W/m²/sr/um)
 - Calibration for XS3 channel: 0.69353 (W/m²/sr/um)
- Mapped in UTM 31 Projection.

Annexe 2.3. / b : Caractéristiques des trois images satellites utilisées

Spot Image, Scene-ID: 2 062-323 05-10-92 10:37:45 2 X

SCENE PARAMETERS

- Date and Time : 05-OCT-92 10:37:45
- K-J identification : 062-323
- Shift Along Track : 0
- Instrument : HRV2
- Spectral mode : XS
- Number of spectral bands : 3
- Spectral band indicators : XS1 XS2 XS3
- Angles
 - View zenith angle: -16.500 degrees
 - Satellite azimuth: 99.300 degrees
 - Sun azimuth: 140.300 degrees
 - Solar zenith angle: 23.700 degrees
 - Scene orientation angle: 9.300 degrees
- Number of lines: 3523
- Number of pixels per line: 3792

SCENE CENTER LOCATION

- Latitude : N 13.52120
- Longitude : E 2.66750
- Eastings : 464781.0 meters (UTM 31)
- Northings : 1494465.6 meters (UTM 31)

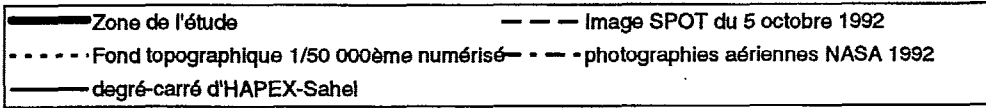
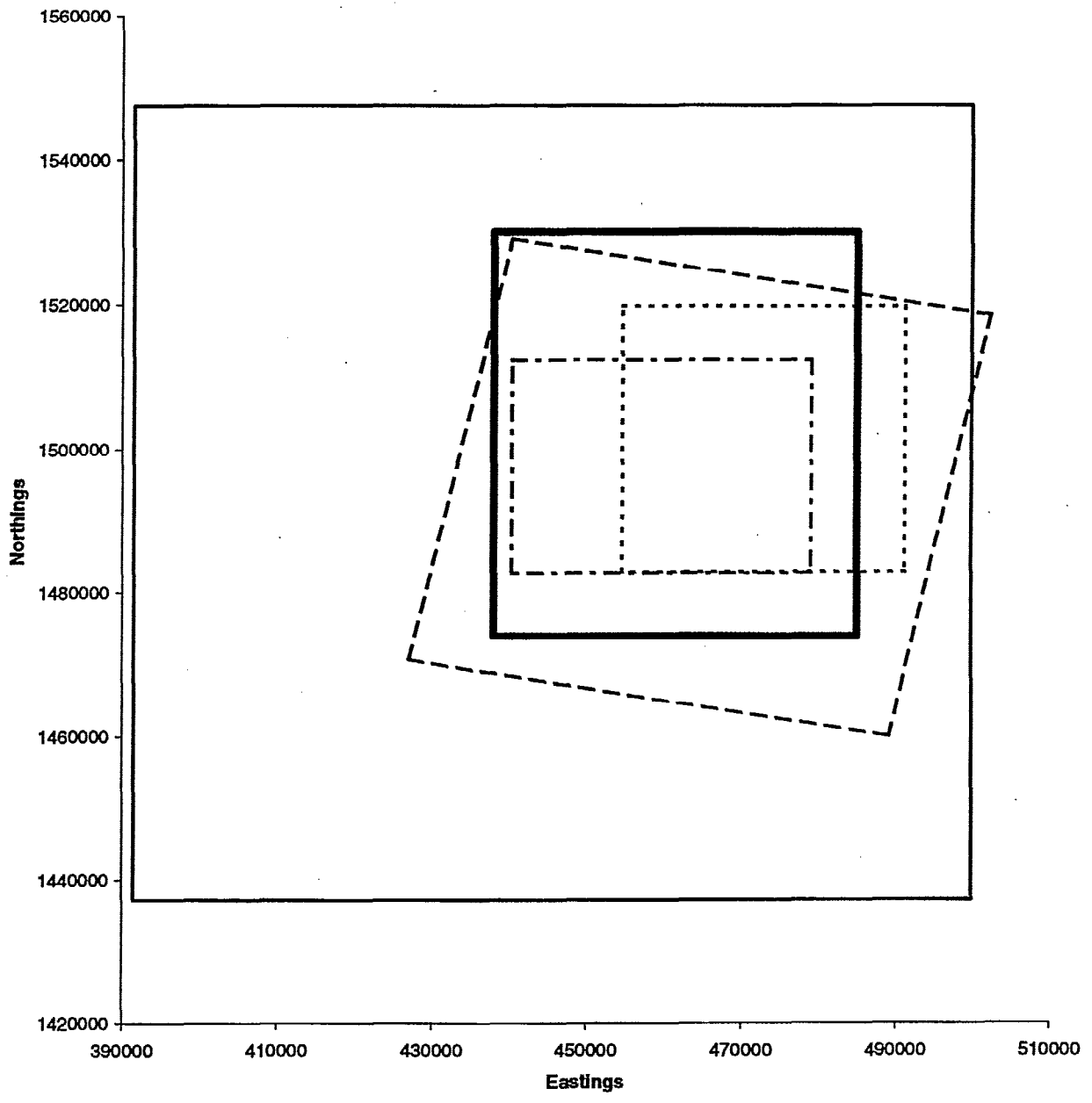
IMAGE GEOMETRY

- Map Projection: UTM 31
- X resolution: 20 meters
- Y resolution: 20 meters
- Top left corner:
 - Eastings : 426861.0 meters (UTM 31)
 - Northings : 1529695.6 meters (UTM 31)
- Bottom right corner:
 - Eastings : 502701.0 meters (UTM 31)
 - Northings : 1459235.6 meters (UTM 31)

PROCESSING

- Correction of atmospheric effects using SMAC Method : Rahman H. and G. Dedieu, SMAC: A Simplified Method of Atmospheric Correction of satellite measurements in the solar spectrum. Int. J. Remote Sens., 15, 123-143, 1994.
- Coefficients used to process this image:
 - Atmospheric water vapor content: 3.91372 (g/cm²)
 - Atmospheric Ozone Content: 0.24672 (atm.cm)
 - Aerosol Optical Thickness at 550 nm: 0.20000
 - Calibration for panchromatic channel: 0.00000 (W/m²/sr/um)
 - Calibration for XS1 channel: 0.63613 (W/m²/sr/um)
 - Calibration for XS2 channel: 0.62345 (W/m²/sr/um)
 - Calibration for XS3 channel: 0.69348 (W/m²/sr/um)
- Mapped in UTM 31 Projection.

Annexe 2.3. / c : Caractéristiques des trois images satellites utilisées



Annexe 2.4. : Graphique de recouvrement de différents supports

Cette annexe rappelle deux aspects de télédétection utiles à la compréhension de ce mémoire.

1. Généralités sur les satellites

La **résolution spectrale** correspond au nombre et à la largeur des intervalles de longueur d'onde du spectre électromagnétique que le capteur embarqué dans le satellite détecte et enregistre.

La **résolution spatiale** est la taille d'un pixel sur le terrain. Elle correspond à la dimension du plus petit objet que peut distinguer le capteur.

Les caractéristiques des satellites les plus courants, des capteurs et des images produites sont données dans le tableau ci-dessous.

Satellite	Type	Capteur(s)	Résolution spatiale	Résolution spectrale	Taille de l'image	Durée entre 2 passages
Météosat	Géostationnaire	-	5 km	4 canaux	1/2 sphère	30 mn
NOAA	Héliosynchrone	-	1 km	5 canaux	2500 x 4000 km	12 h
Landsat	Héliosynchrone	TM	30 m	7 canaux	180 x 180 km	18 j
		MSS	80 m	5 canaux	180 x 180 km	18 j
SPOT	Héliosynchrone	XS	20 m	3 canaux	60 x 60 km	3 à 30 j
		P	10 m	1 canal	60 x 60 km	3 à 30 j

Tableau A3.1 : Les satellites les plus courants

2. Niveaux de traitement d'une image SPOT

Les images satellites SPOT ont 3 degrés de qualité. Des opérations de correction peuvent en effet avoir été effectuées par SPOT Image. Elle ont pour but de corriger un certain nombre de paramètres influençant sur la qualité des images. Ces corrections sont de deux types : radiométriques et géométriques, suivant plusieurs niveaux.

Niveau de correction	Corrections radiométriques	Corrections système	Corrections géométriques dans une projection cartographique
1A	Oui	Non	non
1B	Oui	oui	non
2A	Oui	oui	oui

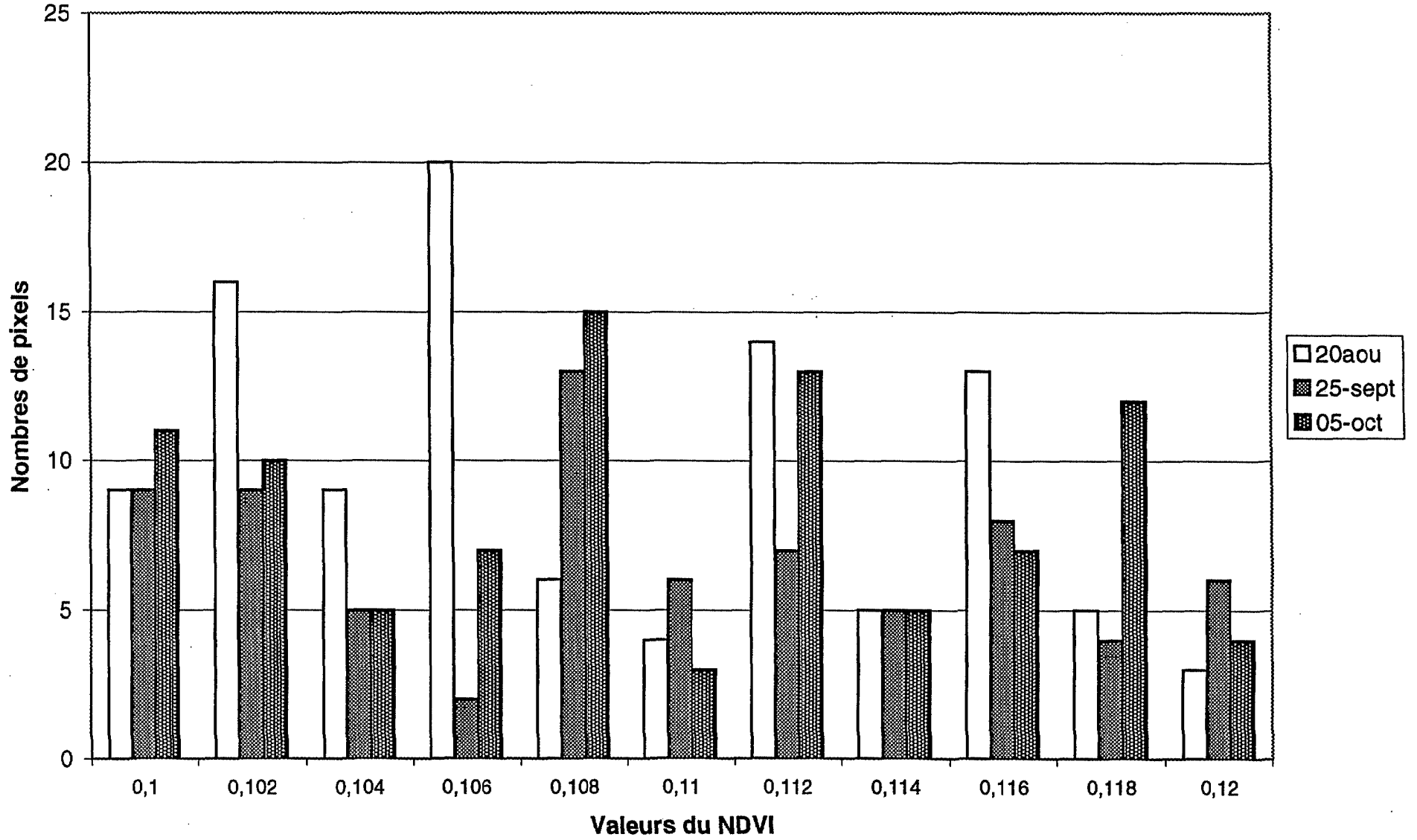
Tableau A3.2 : Corrections effectuées sur une image SPOT

Le niveau 1A est un niveau de prétraitement quasiment brut. Seules les corrections radiométriques sont effectuées.

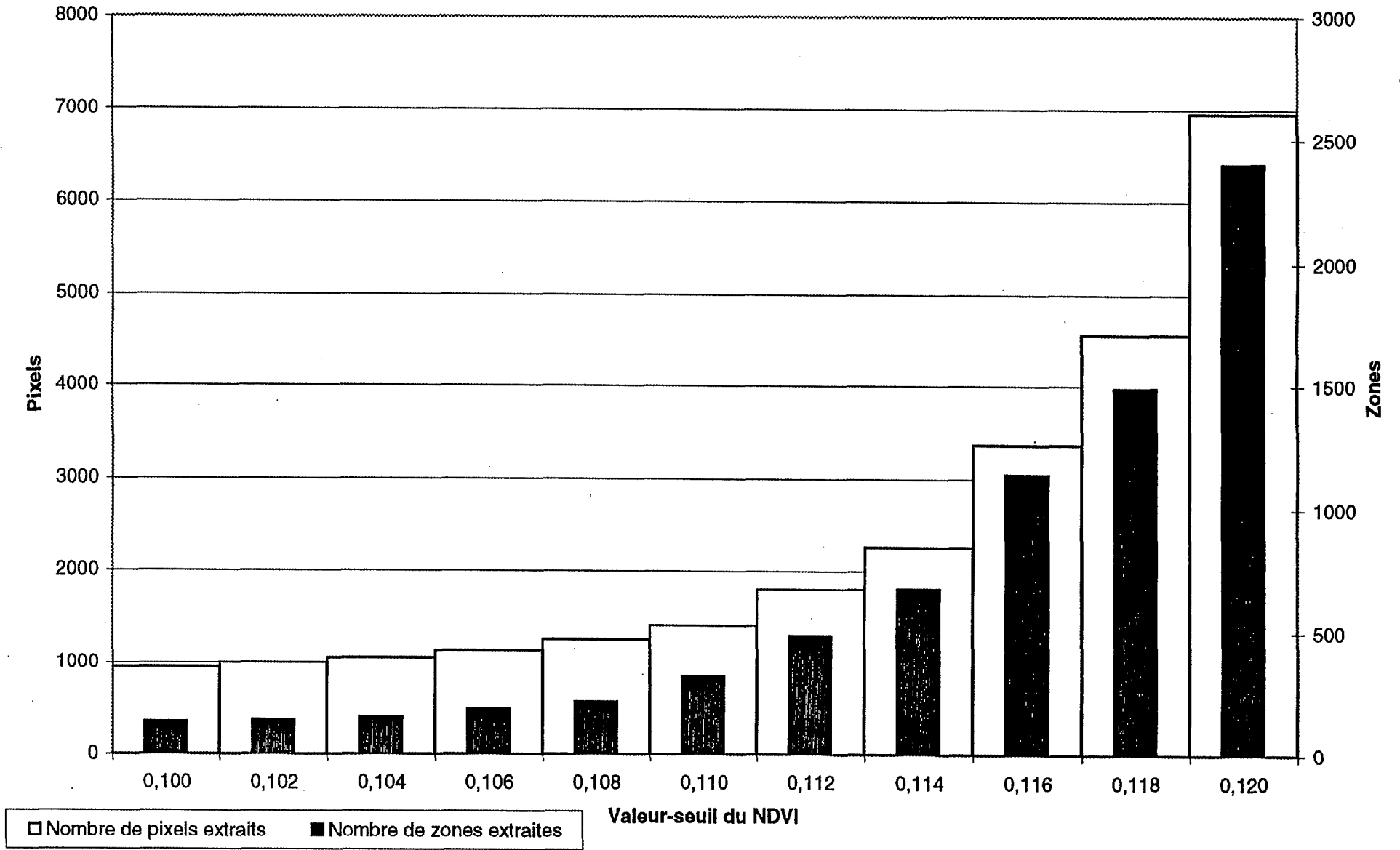
Le niveau 1B prend en considération les caractéristiques de la prise de vue et du système satellite-Terre.

Le niveau 2A est un niveau de précision géoréférencé dans lequel la géométrie de l'image et la localisation sont améliorées. En plus du niveau 1, un deuxième type de corrections est effectué afin de corriger l'image de façon bidimensionnelle, sans points d'appui.

Annexe 4.1. : Répartition des valeurs du NDVI restreinte au voisinage de 3 mares
connues



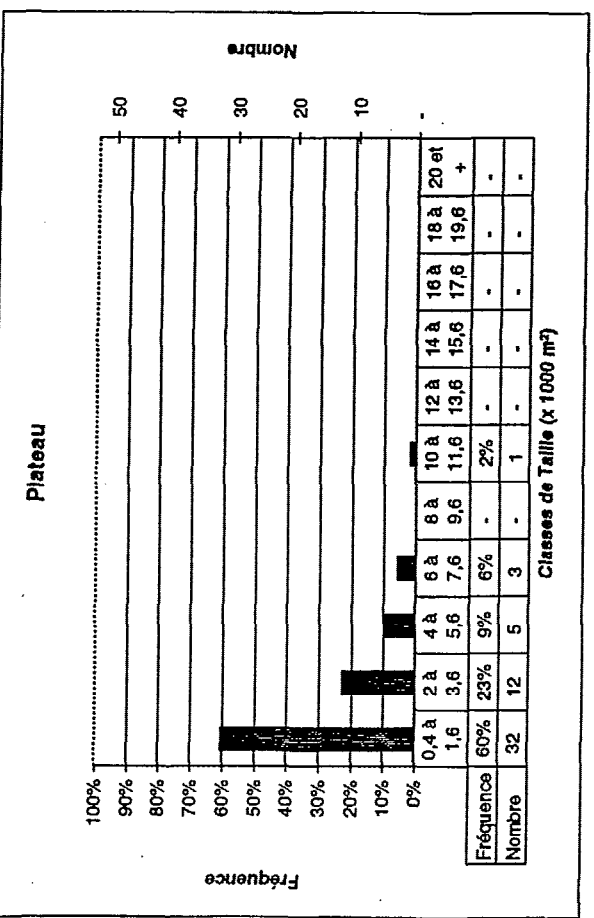
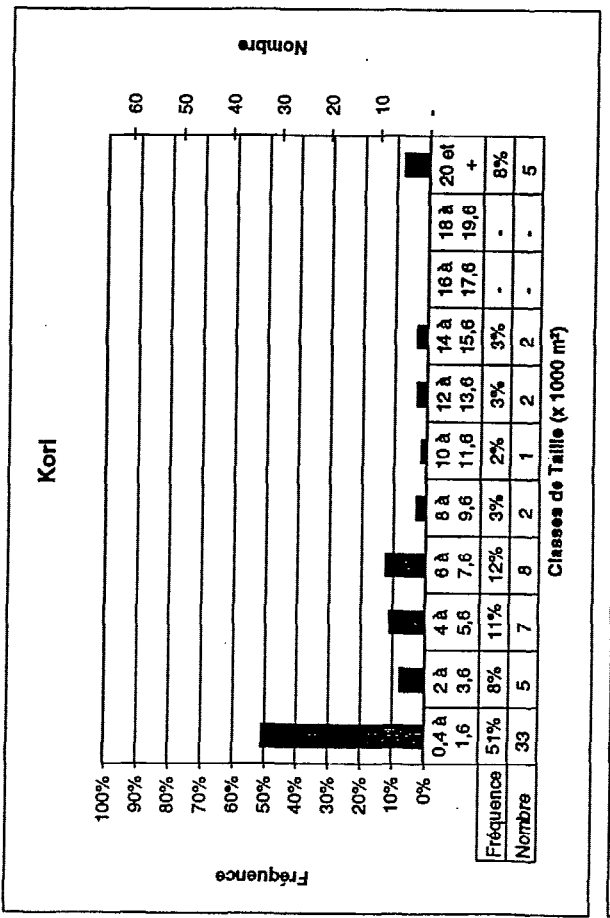
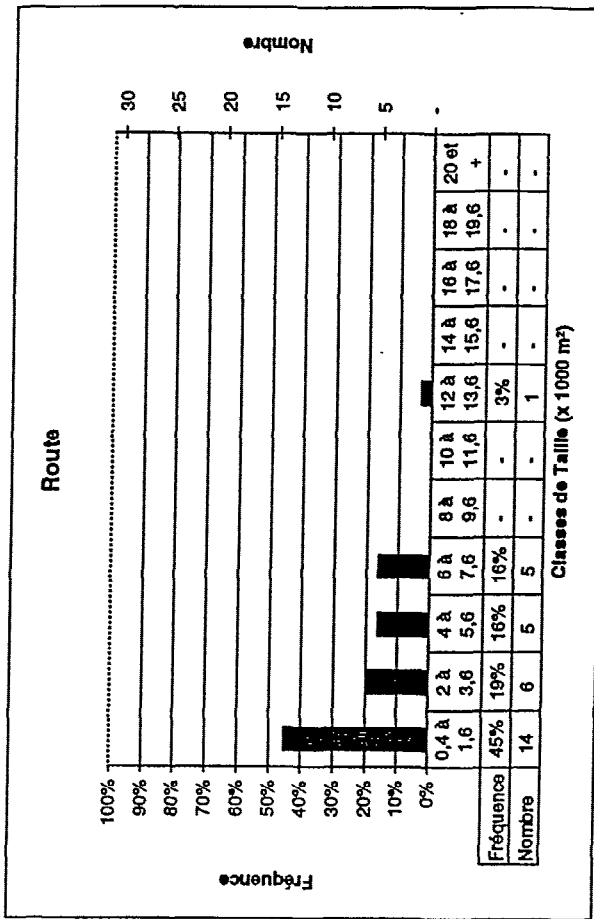
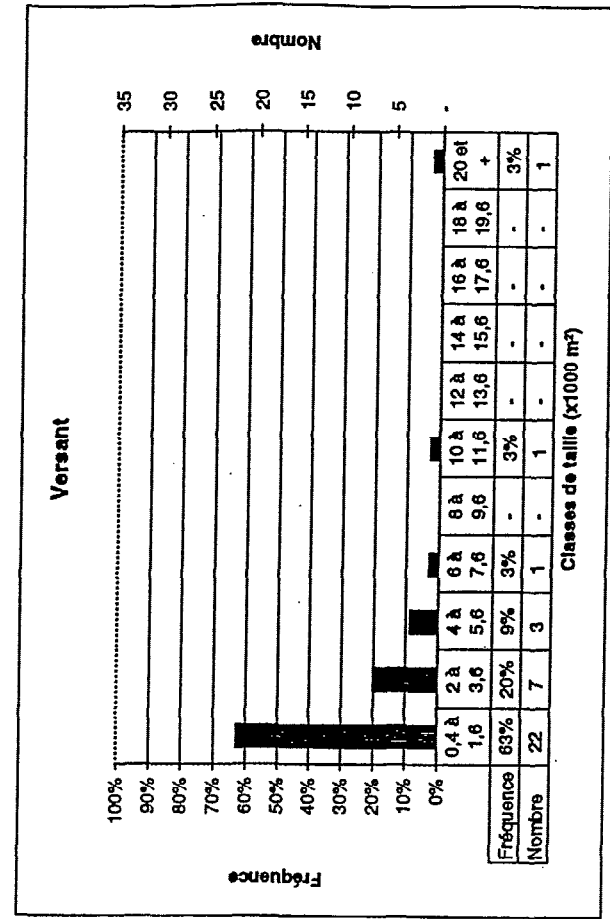
Annexe 4.2. : Nombre de pixels et de zones extraits suivant la valeur du NDVI



n°	nombre de pixels	Appréciation	Moy NDVI	Min NDVI	n°	nombre de pixels	Appréciation	Moy NDVI	Min NDVI
1	1	Dispersé	36,3	0	277	1	Isolé	60,7	41
4	8	Dispersé	54,3	46	278	1	Isolé	48,7	40
9	9	Dispersé	55,5	48	293	1	Isolé	42,0	2
15	1	Isolé	66,7	37	307	1	Isolé	53,0	48
18	1	Isolé	61,0	47	313	2	Isolé	55,2	38
38	2	Isolé	58,2	49	317	1	Isolé	63,3	42
54	6	Dispersé	58,2	49	320	1	Isolé	51,0	39
70	8	Dispersé	55,0	48	326	9	A peu pres sûr	58,7	52
71	2	Isolé	54,3	47	345	2	Isolé	53,5	27
109	1	Isolé	36,7	0	346	1	Isolé	35,0	28
110	2	A peu pres sûr	59,3	56	355	13	A peu pres sûr	57,3	51
111	6	A peu pres sûr	57,3	50	367	9	A peu pres sûr	58,4	48
112	1	A peu pres sûr	60,3	55	390	1	Isolé	53,0	52
118	1	Isolé	36,0	0	394	4	A peu pres sûr	58,8	52
132	1	Isolé	81,3	45	407	5	A peu pres sûr	63,1	51
135	1	Isolé	49,3	25	414	5	A peu pres sûr	57,1	54
146	1	Isolé	61,7	32	418	3	A peu pres sûr	55,9	51
162	1	Isolé	57,3	50	420	1	Isolé	52,3	41
166	2	Isolé	63,2	31	425	1	Isolé	56,3	50
168	1	Isolé	56,0	47	426	1	Isolé	61,7	46
167	1	Isolé	84,3	46	438	1	Isolé	58,3	49
168	2	Isolé	46,7	21	439	2	Isolé	57,2	49
172	1	Isolé	61,0	34	446	1	Isolé	32,3	-25
173	1	Dispersé	33,0	0	457	1	Isolé	56,7	47
177	2	Dispersé	67,5	17	467	1	Isolé	49,7	41
196	1	En plus	74,3	14	468	1	Isolé	66,3	44
223	3	A peu pres sûr	56,7	54	469	2	Isolé	62,7	39
242	3	A peu pres sûr	70,6	54	478	1	Isolé	52,7	46
259	1	Isolé	62,3	42	481	1	Isolé	46,7	26
260	1	Isolé	54,3	43	482	2	Isolé	45,7	20
275	1	Isolé	55,7	49	483	2	Isolé	36,5	8

Annexe 4.3. : Les 62 mares étudiées cas par cas dans la 2ème étape

Annexe 4.4. : Histogrammes de répartition en classes de taille des 4 types de mares



Mares nom	n°	Longitude		Latitude N	Surface 10 ³ m ²	Périmètre (m)	Indice de Forme	Recouplement	Type	Indice de Persistance
		E								
Agharous	29	2°51,11'	13°44,55'	0,4	80			Aucun	Hors-catégorie	1000
Agharous	32	2°51,15'	13°44,21'	0,4	80			Aucun	Hors-catégorie	1000
Agharous	33	2°51,13'	13°44,17'	0,4	80			Aucun	Hors-catégorie	1000
Agharous N25	35	2°49,32'	13°43,95'	0,8	160			Aucun	Plateau	1000
Agharous N25	36	2°49,19'	13°43,37'	0,4	80			Aucun	Route	1000
Agharous N25	37	2°49,21'	13°43,35'	0,4	80			Aucun	Route	1000
Agharous N25	40	2°47,91'	13°42,99'	2	400	1,26		Aucun	Route	1000
Agharous N25	41	2°48,15'	13°43,00'	0,4	80			Aucun	Route	1000
Agharous N25	43	2°47,97'	13°42,93'	0,8	160			Aucun	Route	1000
Agharous N25	50	2°47,94'	13°42,84'	5,2	1040	1,72		Aucun	Route	1110
Agharous N25	51	2°47,87'	13°42,83'	1,6	320	1,41		Aucun	Route	1000
Agharous N25	52	2°47,77'	13°42,76'	1,6	320	1,69		Aucun	Route	1000
Agharous N25	54	2°47,74'	13°42,72'	0,4	80			Aucun	Route	1000
Agharous N25	56	2°47,80'	13°42,69'	2	400	1,51		Aucun	Route	1000
Baboussay	182	2°37,92'	13°23,86'	1,6	320	1,41		Aucun	Versant	1110
Bagoua	166	2°45,94'	13°29,75'	4,4	880	1,53		JCDM5	Kori	1111
Bagoua bis	165	2°45,98'	13°29,79'	0,4	80			Aucun	Kori	1000
Bani Kossey 1	53	2°40,59'	13°42,74'	0,8	160			M25	Plateau	1110
Bani Kossey 2	76	2°42,05'	13°41,26'	0,4	80			M5	Kori	1100
Bani Kossey 2	77	2°41,98'	13°41,19'	6,4	1280	1,69		M5	Kori	1111
Bani Kossey 3	78	2°41,52'	13°40,85'	6	1200	1,17		M5	Kori	1111
Bani Kossey 4	80	2°40,81'	13°40,55'	30	6000	2,08		M5	Kori	1111
Bani Kossey 5	87	2°39,92'	13°40,09'	0,8	160			Aucun	Kori	1111
Banizoumbou 1	155	2°39,74'	13°32,01'	0,4	80			JCD	Kori	0111
Banizoumbou 1	156	2°39,77'	13°31,99'	1,2	240	1,95		JCD	Kori	0110
Banizoumbou 2	157	2°39,89'	13°31,94'	1,6	320	1,13		Aucun	Kori	0001
Bazanga	162	2°35,15'	13°30,34'	6	1200	1,89		JCDM25	Plateau	1110
Birni Koberi 1	81	2°29,29'	13°40,55'	0,4	80			Aucun	Versant	1000
Birni Koberi 2	86	2°28,55'	13°40,09'	1,2	240	1,30		Aucun	Plateau	1110
Birni Koberi 2	89	2°28,67'	13°39,91'	0,4	80			Aucun	Plateau	0110
Birni Koberi 4	95	2°28,69'	13°39,49'	0,4	80			Aucun	Plateau	1100
Dahel	84	2°46,68'	13°40,23'	0,8	160			Aucun	Versant	1000
Dahel	85	2°46,71'	13°40,23'	1,2	240	1,30		Aucun	Versant	1000
Dakalé Kouara 1	2	2°28,60'	13°49,58'	3,2	640	1,40		Aucun	Hors-catégorie	1110
Dakalé Kouara 2	3	2°28,63'	13°49,56'	3,6	720	1,50		Aucun	Hors-catégorie	1110
Dakalé Kouara 3	4	2°30,00'	13°49,25'	6,4	1280	2,40		Aucun	Kori	1010
Dakalé Kouara 4	5	2°29,40'	13°49,07'	1,6	320	1,41		Aucun	Plateau	0110
Dantiandou	124	2°36,87'	13°36,68'	0,4	80			JCD	Versant	1100
Dantiandou 1	177	2°47,13'	13°25,42'	2	400	1,26		Aucun	Kori	0110
Dantiandou 2	181	2°46,82'	13°23,93'	1,2	240	1,30		Aucun	Kori	1000
Dantiandou 3	185	2°44,57'	13°23,15'	0,4	80			Aucun	Kori	0001
Darey 1	117	2°44,45'	13°37,93'	2,8	560	1,28		JCDM25	Versant	1111
Darey 2	123	2°43,86'	13°36,90'	2,4	480	1,15		M5	Plateau	1110
Dey Tégui 1	171	2°47,23'	13°27,01'	0,8	160			Aucun	Kori	0001
Dey Tégui 2	172	2°47,30'	13°26,36'	0,8	160			ZH5	Kori	0110
Dey Tégui 3	175	2°46,04'	13°26,03'	0,8	160			Aucun	Versant	1000
Dey Tégui 3	176	2°46,08'	13°26,01'	1,2	240	1,30		Aucun	Versant	1000
Diri Bangou 1	180	2°32,28'	13°24,40'	1,2	240	1,30		M5	Versant	1110
Diri Bangou 2	179	2°33,80'	13°24,82'	0,8	160			M2	Plateau	0110
Diri Bangou 3	183	2°32,92'	13°23,75'	0,4	80			M2	Plateau	0110
Diri Bangou 4	186	2°34,01'	13°22,85'	3,2	640	1,60		M5ZH2	Plateau	1110
Diri Bangou 5	188	2°34,92'	13°21,97'	0,8	160			ZH2	Plateau	1110
Djouré	13	2°44,49'	13°46,86'	4,4	880	1,36		Aucun	Versant	1010
Djouré	17	2°44,92'	13°46,40'	3,2	640	1,60		ZH2	Versant	1001
Filin 1	96	2°41,60'	13°39,45'	2,4	480	1,61		JCD	Plateau	1111
Filin 2	104	2°42,68'	13°39,16'	2,8	560	1,49		JCD	Plateau	1111
Gagaré 1	159	2°27,48'	13°31,23'	0,4	80			M25	Plateau	1100
Gagaré 1	161	2°27,49'	13°31,17'	10,8	2160	1,52		M25	Plateau	1110
Gagaré 2	167	2°28,19'	13°29,63'	4	800	1,25		Aucun	Plateau	1111
Gogueyzé Kouara 1	108	2°31,49'	13°38,52'	0,4	80			Aucun	Kori	0111
Gogueyzé Kouara 2	110	2°31,61'	13°38,39'	0,4	80			Aucun	Kori	1010
Gogueyzé Kouara 3	128	2°31,77'	13°36,50'	1,2	240	1,63		Aucun	Versant	0001
Gogueyzé Kouara 4	131	2°30,09'	13°36,19'	0,8	160			Aucun	Plateau	1000
Gogueyzé Kouara 5	134	2°30,10'	13°36,03'	0,8	160			Aucun	Plateau	1000
Gogueyzé Kouara 6	136	2°29,80'	13°35,67'	3,2	640	1,60		Aucun	Route	1111
Gogueyzé Kouara Village	121	2°31,66'	13°37,25'	1,2	240	1,30		Aucun	Kori	1100
Gonga 1	8	2°39,51'	13°47,55'	4,4	880	1,70		Aucun	Versant	1110

Mares nom	Longitude		Latitude		Surface 10 ³ m ²	Périmètre (m)	Indice de Forme	Recouplement	Type	Indice de Persistance
	n°	E	N							
Gonga 2	9	2°39,39'	13°47,53'		3,6	720	1,69	Aucun	Versant	1110
Gonga 3	10	2°39,36'	13°47,45'		3,2	640	1,40	Aucun	Versant	1110
Gonga Bangou	6	2°41,53'	13°47,69'		5,2	1040	1,56	M2	Plateau	1000
Gonga Bangou Bis	7	2°41,97'	13°47,57'		1,2	240	1,30	Aucun	Plateau	1100
Hassou Bangou 1	14	2°42,84'	13°46,69'		2	400	1,26	M2	Plateau	1000
Hassou Bangou 1	15	2°42,89'	13°46,69'		0,4	80		M2	Plateau	0110
Hassou Bangou 2	16	2°42,44'	13°46,64'		1,6	320	1,41	M2	Plateau	1110
Hayni Fada 1	18	2°42,81'	13°45,34'		8,4	1680	1,35	Aucun	Kori	1111
Hayni Fada 2	21	2°44,99'	13°45,01'		37,2	7440	1,64	Aucun	Kori	1111
Hayni Fada 3	23	2°43,69'	13°45,00'		7,2	1440	1,46	Aucun	Kori	1100
Hayni Fada 4	25	2°43,46'	13°44,90'		66,8	13360	3,27	ZH5	Kori	1110
Hayni Fada 5	27	2°43,38'	13°44,60'		4	800	2,14	Aucun	Kori	1010
Hayni Fada 6	28	2°43,41'	13°44,57'		0,4	80		Aucun	Kori	0111
Hayni Fada 7	34	2°43,40'	13°44,06'		14,8	2960	1,58	M5	Kori	1111
Inama saguiré Bangou 1	20	2°48,64'	13°45,17'		1,6	320	1,41	M5	Plateau	1010
Inama saguiré Bangou 2	22	2°48,71'	13°45,01'		6,4	1280	1,55	M5	Plateau	1110
Inama saguiré Bangou 2	24	2°48,77'	13°45,01'		1,6	320	1,41	M5	Plateau	1100
Kafina	38	2°44,60'	13°43,17'		2,4	480	1,38	M25	Plateau	1110
Kalasi	160	2°34,57'	13°31,24'		0,4	80		JCD	Versant	0110
Kampa Peul	178	2°40,13'	13°24,90'		2	400	1,26	M25	Versant	0110
Kampa Zarma 1	173	2°38,24'	13°26,14'		4,4	880	1,19	JCDM25	Versant	1110
Kampa Zarma 2	174	2°38,39'	13°26,09'		7,6	1520	1,42	JCDM25	Versant	1110
Karki Kouara	30	2°31,47'	13°44,51'		0,4	80		M2	Plateau	1110
Kida Bazagaizé 1	122	2°33,89'	13°37,22'		2	400	1,26	M5	Route	1111
Kida Bazagaizé 2	120	2°32,66'	13°37,42'		0,4	80		Aucun	Plateau	1000
Kida Tafa Kouara 1	109	2°35,79'	13°38,46'		2,8	560	1,92	Aucun	Versant	0011
Kida Tafa Kouara 1	112	2°37,08'	13°38,30'		0,4	80		Aucun	Plateau	1100
Kida Tafa Kouara 2	113	2°37,05'	13°38,29'		2	400	1,26	Aucun	Plateau	1010
Kida Tafa Kouara 3	114	2°36,81'	13°38,22'		4	800	1,43	Aucun	Plateau	1110
Kida Tafa Kouara 4	116	2°36,78'	13°38,02'		2,8	560	1,49	Aucun	Plateau	1110
Kiran Fandou Béri	26	2°30,97'	13°44,70'		2,4	480	1,38	Aucun	Plateau	1110
Ko Kouarey Peul 1	184	2°26,34'	13°23,48'		2,4	480	1,38	Aucun	Route	1110
Ko Kouarey Peul 2	187	2°28,37'	13°22,10'		0,4	80		M5	Plateau	0110
Ko Kouarey Zarma	170	2°27,96'	13°27,01'		0,4	80		M2ZH5	Plateau	1110
Kobori Kouara 1	139	2°28,85'	13°35,08'		4,4	880	1,36	Aucun	Route	1101
Kobori Kouara 10	151	2°26,14'	13°33,94'		1,6	320	1,41	Aucun	Plateau	1100
Kobori Kouara 2	140	2°28,42'	13°35,01'		0,4	80		Aucun	Versant	1000
Kobori Kouara 3	142	2°28,16'	13°34,68'		4,8	960	1,30	Aucun	Kori	1111
Kobori Kouara 4	144	2°28,21'	13°34,51'		3,6	720	1,69	Aucun	Kori	1111
Kobori Kouara 5	143	2°27,83'	13°34,62'		3,6	720	1,32	Aucun	Kori	1111
Kobori Kouara 6	145	2°27,34'	13°34,46'		2	400	1,26	Aucun	Plateau	1110
Kobori Kouara 7	146	2°27,20'	13°34,31'		0,4	80		ZH5	Plateau	1110
Kobori Kouara 7	147	2°27,20'	13°34,26'		3,2	640	1,20	ZH5	Plateau	1110
Kobori Kouara 8	150	2°27,11'	13°34,17'		0,8	160		ZH5	Plateau	1100
Kobori Kouara 9	149	2°26,47'	13°34,24'		3,2	640	1,60	Aucun	Plateau	1111
Kodjiri Bani Kouara 1	148	2°29,65'	13°34,27'		0,8	160		Aucun	Plateau	1110
Kodjiri Bani Kouara 2	152	2°30,19'	13°33,78'		1,2	240	1,63	Aucun	Versant	1110
Kollo Bossey	31	2°35,29'	13°44,26'		1,2	240	1,30	Aucun	Kori	1000
Kollo Djogonome 1	39	2°36,53'	13°43,03'		1,2	240	1,63	Aucun	Kori	1111
Kollo Djogonome 1	42	2°36,50'	13°42,96'		0,8	160		Aucun	Kori	1010
Kollo Djogonome 1	44	2°36,52'	13°42,90'		1,2	240	1,63	Aucun	Kori	1111
Kollo Djogonome 2	57	2°36,84'	13°42,65'		0,4	80		Aucun	Kori	0110
Kollo Djogonome 2	58	2°36,87'	13°42,63'		0,4	80		Aucun	Kori	0111
Kollo Djogonome 2	60	2°37,01'	13°42,58'		11,6	2320	2,41	Aucun	Kori	1111
Kollo Djogonome 2	61	2°37,13'	13°42,58'		2,8	560	1,49	Aucun	Kori	1111
Kollo Djogonome 2	64	2°37,03'	13°42,55'		0,8	160		Aucun	Kori	1011
Kollo Djogonome 3	46	2°36,98'	13°42,79'		38,4	7680	2,19	M5	Kori	1111
Kollo Djogonome 3	47	2°37,04'	13°42,89'		0,4	80		M5	Kori	1110
Kollo Djogonome 4	45	2°37,13'	13°42,90'		8	1600	1,51	M5	Kori	1110
Kollo Djogonome 4	48	2°37,07'	13°42,88'		0,4	80		M5	Kori	1100
Kollo Djogonome 5	49	2°37,34'	13°42,82'		14,4	2880	1,97	M5	Kori	1111
Kollo Djogonome 6	55	2°37,55'	13°42,69'		0,4	80		Aucun	Kori	1111
Komakoukou 1	164	2°36,88'	13°29,80'		1,6	320	1,41	JCDM2	Plateau	1111
Komakoukou 4	168	2°37,26'	13°29,38'		0,8	160		Aucun	Versant	1110
Korto	163	2°41,44'	13°29,88'		0,4	80		JCD	Kori	0001
Loga	11	2°36,63'	13°47,11'		1,2	240	1,30	Aucun	Versant	1110
Maourey 1	111	2°38,99'	13°38,37'		2,4	480	1,61	JCD	Kori	1110

Mares nom	n°	Longitude	Latitude	Surface 10 ³ m ²	Périmètre (m)	Indice de Forme	Recouplement	Type	Indice de Persistance
		E	N						
Maourey 10	138	2°39,13'	13°35,68'	0,8	160		Aucun	Kori	0001
Maourey 2	115	2°39,23'	13°38,08'	13,2	2640	2,26	JCDM5	Kori	1111
Maourey 3	127	2°39,24'	13°36,49'	7,2	1440	2,13	JCD	Kori	1111
Maourey 6	118	2°39,28'	13°37,67'	0,4	80		M5	Kori	1110
Maourey 7	119	2°39,38'	13°37,54'	6,4	1280	2,40	M5	Kori	1111
Maourey 8	125	2°39,40'	13°36,67'	0,4	80		Aucun	Versant	1000
Maourey 9	129	2°39,16'	13°36,37'	0,4	80		Aucun	Kori	0110
Massi Koubou	1	2°26,11'	13°49,91'	0,4	80		Aucun	Hors-catégorie	0001
Niné Founo Bella 1	65	2°43,49'	13°42,52'	0,4	80		Aucun	Versant	1000
Niné Founo Bella 1	66	2°43,51'	13°42,50'	2,8	560	1,49	Aucun	Versant	1110
Niné Founo Bella 2	68	2°43,62'	13°42,32'	10,4	2080	1,55	M5	Versant	1000
Niné Founo Bella 2	69	2°43,61'	13°42,22'	24	4800	2,33	M5	Versant	1110
Niné Founo Bella 2	71	2°43,55'	13°42,22'	0,4	80		M5	Versant	1100
Niné Founo Bella 3	74	2°42,89'	13°41,60'	4,8	960	1,30	Aucun	Kori	1110
Niné Founo N25	59	2°47,04'	13°42,63'	6	1200	1,46	Aucun	Route	1110
Niné Founo N25	62	2°46,92'	13°42,57'	5,2	1040	1,72	Aucun	Route	1001
Niné Founo N25	63	2°46,75'	13°42,59'	0,4	80		Aucun	Route	1000
Niné Founo N25	67	2°46,50'	13°42,45'	4,8	960	1,30	Aucun	Route	1000
Niné Founo N25	70	2°46,29'	13°42,27'	0,4	80		Aucun	Route	1000
Niné Founo N25	72	2°46,14'	13°42,07'	6	1200	2,04	Aucun	Route	1110
Niné Founo N25	73	2°45,94'	13°41,85'	6,4	1280	1,27	Aucun	Route	1111
Niné Founo N25	75	2°45,85'	13°41,53'	6,8	1360	1,37	Aucun	Route	1111
Poura	107	2°37,07'	13°38,61'	6	1200	1,31	JCDM25	Plateau	1110
Sama Dey 3	133	2°41,75'	13°36,12'	0,4	80		JCD	Plateau	1110
Sama Dey 6	126	2°41,87'	13°36,60'	0,4	80		Aucun	Plateau	1110
Sama Dey 7	130	2°42,24'	13°36,20'	4,8	960	1,30	M2	Plateau	1111
Sama Dey 8	135	2°39,10'	13°35,83'	0,4	80		JCD	Kori	1100
Sama Dey 8	137	2°43,59'	13°35,69'	0,4	80		M2	Versant	1000
Sama Dey 9	141	2°41,11'	13°34,77'	0,4	80		Aucun	Versant	1110
Samsani 4	132	2°34,83'	13°36,11'	0,8	160		JCDM2	Plateau	1110
Sinsan Bangou 1	153	2°32,54'	13°33,69'	0,4	80		Aucun	Versant	0001
Sinsan Bangou 2	154	2°33,29'	13°33,52'	0,8	160		Aucun	Versant	1001
Tchigo Tégui	158	2°47,27'	13°31,37'	0,8	160		Aucun	Versant	1000
Tiou Dawa	189	2°31,81'	13°21,30'	0,8	160		ZH2	Plateau	1110
Tondi Gamey	19	2°39,39'	13°45,18'	98,8	19760	1,79	ZH5	Kori	1111
Touloua Kouarey	169	2°44,48'	13°27,46'	0,8	160		Aucun	Plateau	1000
Wankama ech.	105	2°38,96'	13°38,98'	4,8	960	1,95	JCD	Kori	1111
Wankama ech.	106	2°38,97'	13°38,91'	0,8	160		JCD	Kori	1110
Wankama N25	79	2°44,89'	13°40,67'	0,4	80		Aucun	Route	1100
Wankama N25	82	2°44,73'	13°40,38'	1,2	240	1,30	Aucun	Route	1000
Wankama N25	83	2°44,69'	13°40,37'	0,8	160		Aucun	Route	1000
Wankama N25	91	2°44,07'	13°39,76'	0,8	160		Aucun	Route	1000
Wankama N25	92	2°40,42'	13°39,63'	13,6	2720	1,74	M5	Route	1111
Wankama N25	93	2°43,91'	13°39,64'	0,8	160		Aucun	Route	1000
Wankama N25	94	2°41,80'	13°39,59'	3,6	720	1,32	Aucun	Route	1111
Wankama N25	98	2°42,90'	13°39,41'	4	800	1,25	Aucun	Route	1111
Wankama Village 1	100	2°39,51'	13°39,29'	4,4	880	1,36	JCD	Kori	1111
Wankama Village 2	90	2°39,46'	13°39,80'	4,8	960	1,79	JCD	Kori	1110
Wankama Village 3	88	2°39,36'	13°39,92'	6,4	1280	1,83	JCD	Kori	1110
Wankama Village 5	97	2°39,62'	13°39,45'	0,4	80		Aucun	Kori	1110
Wankama Village 6	99	2°38,96'	13°39,33'	6,8	1360	1,37	Aucun	Route	1111
Wankama Village 7	101	2°39,07'	13°39,23'	7,2	1440	2,26	M5	Kori	1111
Wankama Village 7	102	2°39,19'	13°39,25'	1,2	240	1,30	M5	Kori	1111
Wankama Village 7	103	2°39,24'	13°39,25'	0,8	160		M5	Kori	1111
Windé Béri 1	190	2°28,56'	13°21,08'	4	800	1,25	M25	Plateau	1110
Windé Béri 2	191	2°25,69'	13°20,63'	12,4	2480	1,57	Aucun	Kori	1110
Zouragane	12	2°32,29'	13°46,97'	0,4	80		Aucun	Hors-catégorie	0110

Recouplement :	
JCD	Inventaire de DESCONNETS (1994)
M2	Mare sur carte au 1/200 000 ^{me}
M5	Mare sur carte au 1/50 000 ^{me}
ZH2	Zone Humide sur carte au 1/200 000 ^{me}
ZH5	Zone Humide sur carte au 1/50 000 ^{me}



● : Mares

Annexe 5.2. : Extrait de la cartographie de l'inventaire sur le fond topographique au 1/50 000^{ème} numérisé



☒ : Mares

Annexe 5.3. : Extrait de la cartographie de l'inventaire sur le fond topographique au 1/200 000^{ème} numérisé

E.N.G.E.E.S.
**Ecole Nationale du Génie de l'Eau et
de l'Environnement de Strasbourg**
1, Quai Koch
67070 STRASBOURG CEDEX

Université Louis Pasteur
U.F.R. de Géographie
3, rue de l'Argonne
67000 STRASBOURG

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
MEMOIRE DE DEA Systèmes Spatiaux et Environnement

Auteur :

Sylvain COSTE

Promotion :

ORNE

Titre :

Inventaire des mares et des ravines par télédétection pour
l'élaboration d'un modèle hydrologique en zone sahélienne
(Kori de Dantiandou, Niger).

Année de publication :

1998

Nombre de volumes :

1

Nombre de pages :

Mémoire : 92 pages

Annexes : 20 pages

Nb. Réf. Biblio. :

44

Structure d'accueil :

Laboratoire d'hydrologie
ORSTOM
B.P. 5045
34 032 MONTPELLIER CEDEX 1

Résumé :

Au Niger occidental, un inventaire des mares et des ravines sur une zone de 1 500 km² a servi à initier l'analyse du paysage pour l'extension spatiale d'un modèle hydrologique.

L'inventaire des mares a été effectué en utilisant des cartes du NDVI (indice de végétation) à partir de 3 images du satellite SPOT-XS de 1992, puis complété avec une image de 1996. L'intervention du contexte topographique a permis de sélectionner 191 mares. Des paramètres ont été associés à chaque mare.

Une méthode d'extraction des ravines a été testée. Elle devra être mise au point. De nouvelles données sont prometteuses.

Mots-clés :

Mares, Ravines, Télédétection, SPOT-XS, NDVI, Photographies aériennes, Opérateurs morphologiques, Modélisation hydrologique, Sahel, Niger.