



HAL
open science

Evolution de l'occupation des sols dans l'ouest du Niger : influence sur la cycle de l'eau

Kadidiatou Souley Yero Souley Yero

► **To cite this version:**

Kadidiatou Souley Yero Souley Yero. Evolution de l'occupation des sols dans l'ouest du Niger : influence sur la cycle de l'eau. Sciences de la Terre. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GRENU034 . tel-00864052

HAL Id: tel-00864052

<https://theses.hal.science/tel-00864052v1>

Submitted on 20 Sep 2013

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **GEOGRAPHIE**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Kadidiatou SOULEY YERO

Thèse dirigée par **Luc DESCROIX** et **Nadine DESSAY**

Préparée au sein du **Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement**

Dans l'**École Doctorale TERRE, UNIVERS, ENVIRONNEMENT**

Evolution de l'occupation des sols dans l'ouest du Niger : influence sur le cycle de l'eau

Thèse soutenue publiquement le **18 décembre 2012**,

devant le jury composé de :

Claude Cosandey,

Directeur de recherche CNRS, LGP, Meudon

Rapporteur

Catherine Mering,

Professeure de géographie Université Paris 7

Rapporteur

Eric Delaître,

Chargé de recherche, IRD, MTD, Montpellier

Examineur

Sylvain Bigot,

Professeur, UJF, LTHE, Grenoble

Président du jury

Luc Descroix,

Directeur de recherche, IRD, LTHE, Grenoble

Directeur de thèse

Nadine Dessay,

Ingénieur d'étude, IRD, MTD, Montpellier

Co-directrice de thèse



UNIVERSITE DE GRENOBLE

THESE DOCTORALE
ECOLE DOCTORALE : TERRE, UNIVERS,
ENVIRONNEMENT

**Evolution de l'occupation des sols dans l'Ouest du Niger :
Influence sur le cycle de l'eau**



Soutenue le 18 décembre 2012

Par :

Kadidiatou SOULEY YERO

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été réalisé grâce au financement assuré par le service de coopération et d'action culturelle (SCAC) de l'ambassade de France au Niger, ainsi qu'à l'Institut de Recherche pour le Développement qui a co-financé ce travail à travers l'attribution d'une bourse complémentaire (BSTD de l'AIIRD). Qu'ils trouvent ici toute ma gratitude.

Il a été effectué au sein de deux laboratoires d'accueil, le Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE) et l'UMR ESPACE-DEV.

Au sein du LTHE (Grenoble) notre travail s'inscrit dans le contexte de celui de l'équipe Hydrogéophysique et Bilans Spatialisés (HYBIS) à laquelle nous appartenions. L'équipe HYBIS est fortement engagée dans le programme AMMA, et a choisi l'Afrique de l'Ouest comme chantier privilégié. Et ces activités expérimentales se concentrent principalement sur les deux sites de méso échelle du Service d'Observation (SO) d'AMMA-CATCH (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine - Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique) situés au Niger et au Bénin.

Ce système d'observation a en effet pour objectif le suivi à long terme de la dynamique de la végétation, du cycle de l'eau et de leur interaction avec le climat en Afrique de l'Ouest. Et aussi d'étudier l'impact hydrologique du changement climatique et/ou anthropique de ces milieux.

A l'UMR ESPACE-DEV (Montpellier), à travers l'équipe Approche Intégrée des Milieux et des Sociétés (AIMS), nous avons appris et mis en œuvre des méthodologies par télédétection spatiale appliquées à l'environnement de notre zone d'étude. Cette équipe s'intéresse à l'adaptation et à la résistance des géosystèmes face aux changements globaux par une approche intégrée des "milieux et des sociétés". Elle a aussi comme objectifs de construire et de développer de nouveaux outils et méthodes d'observation, portant sur l'analyse, la gestion et le suivi-évaluation de l'environnement à l'interface "milieux et sociétés".

Je voudrais ici remercier tous ceux qui ont contribué à un niveau ou à un autre à la réalisation de ce travail.

Je tiens d'abord à remercier le président du jury Sylvain Bigot, les rapporteurs Claude Cosandey et Catherine Mering qui ont accepté d'examiner ce travail. Je remercie également Eric Delaître qui a accepté d'être membre du jury et aussi mon directeur de thèse Luc Descroix et ma co-directrice de thèse Nadine Dessay qui depuis le début de mes travaux jusqu'à la soutenance ont encadré ce travail.

Je remercie très sincèrement Eric Delaître qui m'a fait profiter de ses larges connaissances en SIG et Télédétection et qui a su me débloquer lors des traitements d'images. Je remercie également Maud Loireau, Pierre Derioz, Anne-Elisabeth Laques, qui ont beaucoup contribué à la démarche de la lecture paysagère du terrain. Je remercie aussi Christian Depraetere et Bertrand Guerrero de leur contribution.

Je remercie aussi Pierre Hiernaux pour son appui. J'exprime toute ma reconnaissance à Jérôme Demarty et Moussa Malam Abdou qui m'ont donné des scènes SPOT. Je remercie Oke Amogu, Aurélien Claude (LTHE)

Oumarou Marega, Jose Luis San Emeterio, (Paris 7) pour leurs contributions à travers les multiples discussions sur les traitements des images.

Je n'oublie pas de remercier:

Les gestionnaires du LTHE pour leur accueil sympathique et leur gentillesse : Odette Nave, Claire Petracchi, Joseph Germiano, l'informaticien Nechba Wajdi et l'ensemble des membres du LTHE.

L'informaticien Pierre Malard de la maison de télédétection de Montpellier pour sa disponibilité et le temps passé à réparer mon ordinateur qui a cessé de fonctionner à un moment crucial de mon travail et aussi les membres du secrétariat de l'UMR ESPACE-DEV.

Les stagiaires de la plateforme de la Maison de la Télédétection Montpellier avec qui j'ai passé des bons moments.

Je remercie toutes mes proches de leurs soutiens et de leurs encouragements.

Je tiens aussi à remercier Faran Maiga Oumarou et Emmanuèle Gautier pour leur encouragement.

Je remercie les étudiants qui ont collecté les données hydro sur le terrain : Ibrahim Mamadou, Ibrahim Noma, Eric Le Breton, Moussa Malam Abdou, Aghali Ingatan, Abba Bachir.

Je remercie les projets ANR (Agence Nationale de la recherche) ECLIS (Contribution de l'élevage à la réduction de la vulnérabilité des ruraux et à leur adaptabilité aux changements climatiques et sociétaux en Afrique sub-saharienne) et ESCAPE (changements environnementaux et sociaux en Afrique : passé, présent et futur, Environmental and Social Changes in Africa : Past, present and FuturE) qui ont financé mes missions en France, les missions de mes encadrants au Niger.

Je remercie également le CNES de nous avoir permis de bénéficier de la procédure ISIS pour l'obtention d'images SPOT à prix recherche (dossier n°396).

Je dédie ce travail à mes parents

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	3
TABLE DES MATIERES.....	6
LISTE DES FIGURES.....	10
LISTE DES TABLEAUX.....	16
INTRODUCTION.....	16
PREMIERE PARTIE : LE NIGER, UN MILIEU EN MUTATION	23
CHAPITRE 1 : DE FORTES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES ET ANTHROPIQUES ...	22
1.1. LES CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DU MILIEU	22
1.1.1. Climat et sécheresses les plus marquées 1972-1973, 1982-1984.....	27
1.1.2. Cadre morpho-structural imposé par la géologie : quel lien avec l'endoréisme ?.....	30
1.1.3. Sols pauvres et fragiles quelle contribution au cycle de l'eau ?	32
1.2. LES FORMATIONS VEGETALES ET LEUR EVOLUTION.....	34
1.2.1. Les formations naturelles.....	34
1.2.2. Agro-systèmes sahéliens	36
1.2.3. Impacts des sécheresses.....	37
1.3. L'EVOLUTION DEMOGRAPHIQUE DEPUIS LES ANNEES 1950.....	38
1.3.1. Le Niger.....	38
1.3.2. Région de Dantiandou.....	39
1.3.3. Impacts des activités anthropiques sur le milieu	40
1.4. UN ENVIRONNEMENT EN MUTATION RAPIDE	41
1.5. OBJECTIFS ET VEROUS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES	43
CHAPITRE 2 : IMPACTS DES MODIFICATIONS ENVIRONNEMENTALES SUR LE CYCLE DE L'EAU.....	46
2.1. ÉTAT DE L'ART.....	46
2.2. LE DEGRE CARRE UN CAS PAS TOUJOURS REPRESENTATIF.....	53
2.3. IMPORTANCE DES PROCESSUS HYDROLOGIQUES EN ZONE ENDOREIQUE	56
2.3.1. Description des processus hydrologiques.....	56
2.3.2. Rôle de l'occupation du sol dans les processus d'infiltration et de ruissellement	58
CHAPITRE 3 : QUELLES ECHELLES SPATIALES ET TEMPORELLES ?	60

3.1	QUELS INDICATEURS DE TERRAIN POUR L’OBSERVATION DES PROCESSUS HYDRIQUES ?	60
3.2	LES OUTILS D’ANALYSE : LE PAYSAGE ET LA TELEDETECTION	65
3.2.1	<i>Paysage : une vision horizontale intégratrice</i>	65
3.2.2	<i>La télédétection : une perception verticale exhaustive et répétée</i>	67
3.2.3	<i>Historique des classifications</i>	70
3.3	DONNEES DISPONIBLES POUR L’ETUDE	71
3.3.1	<i>Données satellitaires et aériennes</i>	71
3.3.2	<i>Données exogènes</i>	72
3.4	LES DONNEES ACQUISES SUR LE TERRAIN	73
3.5	RECHERCHE D’UN COMPROMIS D’ECHELLE SPATIALE	74
3.5.1	<i>Agrégation – Désagrégation</i>	74
3.5.2	<i>Critique des résultats</i>	75
3.5.3	<i>Compatibilité d’échelles requise pour la modélisation hydrologique et ceux fournis par la télédétection</i>	76

DEUXIEME PARTIE : ETUDE DES DISPARITES SPATIO TEMPORELLES A L’ECHELLE LOCALE ET A CELLE DU DEGRE CARRE **81**

CHAPITRE 4 : VISIONS PAYSAGERE ET SATELLITALE	78
4.1 LECTURE PAYSAGERE DU TERRAIN	78
4.1.1 <i>Typologie des types paysagers</i>	78
4.1.2 <i>Délimitation manuelle à partir des observations de terrain</i>	79
4.1.3 <i>Tableau de synthèse paysagère</i>	79
4.2 MORPHO STRUCTURE + HYDRO VU PAR SATELLITE	87
4.3 SYNTHESE APPORT PAYSAGE + MORPHO STRUCTURE	91

CHAPITRE 5 : DYNAMIQUE DE L’OCCUPATION DES SOLS DANS LA COMMUNE DE DANTIANDOU ET DANS LE DEGRE CARRE DE NIAMEY	93
5.1 METHODES	93
5.1.1 <i>Zone d’étude</i>	93
5.1.2 <i>Critique des données</i>	94
5.2 TECHNIQUES DE PRETRAITEMENT	94
5.3 SIGNATURES SPECTRALES DES ELEMENTS ET DES COMPOSANTS DU PAYSAGE VISIBLE PAR TELEDETECTION	95
5.3.1 <i>Méthodologie générale d’extraction de l’information</i>	95
5.3.2 <i>Analyse</i>	96

5.3.3 Classification	98
5.4 RESULTATS	98
5.4.1 Analyse de la matrice de confusion, et de l'exactitude de la classification pour 1986	98
5.4.2 Analyse de la matrice de confusion, et de l'exactitude de la classification pour 2007	100
5.4.3 Analyse de la matrice de confusion, et de l'exactitude de la classification pour 2010	101
5.5 ANALYSE DE L'EVOLUTION DE L'OCCUPATION DES SOLS	102
5.5.1 Cartographie de l'occupation des sols en 1986, 2007 et 2010.....	102
5.5.2 Analyse de l'occupation des sols en 1986, 2007 et 2010.....	107
5.5.3 Détection des changements intervenus entre 1986-2007, 1986-2010 et 2007-2010	108
5.6. EXTENSION AU DEGRE CARRE	110
5.7. DISCUSSION	112
5.8. CONCLUSION	113

TROISIEME PARTIE : CHANGEMENTS D'OCCUPATION DES SOLS ET DE LEUR FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE : POUR UNE APPLICATION EN HYDROLOGIE DES BASSINS VERSANTS **121**

CHAPITRE 6 : ANALYSE DE LA VARIABILITE SPATIALE ET TEMPORELLE DE 1950 A 2010..... **115**

6.1. INTRODUCTION: RESUME DE MES RECHERCHES ANTERIEURES.....	115
6.2. ANALYSE DE LA VARIABILITE SPATIALE DE L'OCCUPATION DU SOL ENTRE 1950 ET 2010.....	119
6.2.1 Bilan de l'évolution pour le bassin de Wankama.....	120
6.2.2 Bilan de l'évolution pour le bassin de Tondi Kiboro	121
6.3. HISTORIQUE DES CHANGEMENTS D'USAGE DES SOLS ANALYSES PAR PHOTO-INTERPRETATION CORONA 1965/ GOOGLE EARTH 2010	124
6.4. DISCUSSION: CRITIQUE ET COMPARAISON AVEC LES TRAVAUX ANTERIEURS D'AUTRES EQUIPES	130
6.4.1 Sur la commune de Dantiandou	130
6.4.2 Dans d'autres terroirs sahéliens.....	135
6.5. ANALYSE DE LA VARIABILITE SPATIALE DE L'OCCUPATION DU SOL ENTRE 1950 ET 2010.....	139

CHAPITRE 7 : VERS UNE EXTENSION REGIONALE PAR TELEDETECTION: WHAT ABOUT THE RE-GREENING ? **143**

7-1 A L'ECHELLE DU SAHEL.....	143
7-2. RETOUR SUR LES ECHELLES LOCALES ET MESO, PAR TELEDETECTION	154

CHAPITRE 8 : QUELLES EN SONT LES CONSEQUENCES SUR LE CYCLE DE L'EAU ? **162**

8.1. LE ROLE DES NOUVELLES FORMES OBSERVEES COMME INDICATEURS: LES PLAGES DE SOL NU	167
8.2. UN RESEAU HYDROGRAPHIQUE RAJEUNI	173

8.3. L'INFLUENCE DU RELIEF SUR L'HYDROLOGIE	180
8.4. DES DEBITS EN FORTE AUGMENTATION	185
8.5 QUEL LIEN ENTRE LES UNITES DE PAYSAGE ET LE CYCLE DE L'EAU ?	191
CONCLUSION DU CHAPITRE 8. QUELLES CONSEQUENCES REGIONALES ?	194
CONCLUSION GENERALE.....	196
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	201
ANNEXES.....	225

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma montrant l'opposition des processus durant la saison des pluies (mousson) et la saison sèche (hiver)	22
Figure 2. Cartes des différents domaines éco-climatiques d'Afrique de l'Ouest (en haut) et plus précisément du domaine sahélien (en bas, d'après Bobée, 2011)	24
Figure 3. Répartition mensuelle des précipitations (mm) en régime de mousson : moyenne 1951- 2010 des pluies sur le bassin du Niger Moyen (entre Ansongo et Niamey	25
Figure 4 . Répartition mensuelle des températures moyennes à Niamey (Niger)	26
Figure 5 . Diagrammes ombro-thermiques des stations de Niamey et Tillabéri (Niger)	26
Figure 6 : Pluviométrie annuelle des stations de Niamey et Tillabéri entre 1950 et 2009	28
Figure 7. Humidité relative maximale et minimale aux stations de Niamey et Tillabéri entre 1990 et 2009	30
Figure 8. Géologie du Niger Occidentale (d'après Gavaud, 1977)	31
Figure 9. augmentation des débits des cours d'eau sahéliens (d'après Amogu <i>et al.</i> , 2010)	47
Figure 10. Diminution des débits annuels des cours d'eau soudaniens (Amogu <i>et al.</i> , 2010).	48
Figure 11. Evolution de la pluviométrie dans la partie centrale du Sahel (10° W à 10 ° E) d'après Lebel et Ali, (2009)	49
Figure 12. Evolution par décennies de la répartition des pluies par mois durant la mousson (Descroix et al, 2011a)	50
Figure 13. Evolution par décennie de la proportion des évènements pluvieux supérieurs à 20 mm cumulés (Descroix et al, 2011a)	51
Figure 14. La commune de Dantiandou dans le degré carré; et le Degré Carré de Niamey (DCN) dans son contexte régional; le losange représente la zone couverte par les figures 46 et 47 plus bas (chapitre 6) .	54
Figure 15. Remontée moyenne du niveau de la nappe du Continental terminal 3 dans le DCN (partie ouest du bassin sédimentaire des Iullemeden (Leblanc <i>et al.</i> , 2008)	55
Figure 16. La non représentativité du degré carré de Niamey dans l'évolution positive (re-greening) de la végétation au Sahel (d'après Mougin, 2009)	56
Figure 17. Plateaux Latéritiques	60
Figure 18. Talus.....	61
Figure 19. Jachères	61
Figure 20. Jachères dégradées	62
Figure 21. Cultures	62
Figure 22. Placages sableux	63
Figure 23. Sols nus encroûtés hors plateaux	63
Figure 24. Ravines.....	63
Figure 25. Bas-fonds	64
Figure 26. Localisation des sites et bassins hydrométriques	73

Figure 27. Dispositif expérimental des bassins de Tondi Kiboro.....	73
Figure 28. Exemple de changement de la radiométrie des pixels des images satellites quand on passe d'une échelle à l'autre	75
Figure 29. Différents niveaux de massifs, ségrévés par hydro géo morphométrie	88
Figure 30. Types paysagers (voir 4-1, tableau 4) et massifs individualisés par hydrogéomorphométrie..	89
Figure 31. Segmentation hypercube réalisée pour séparer les plateaux du reste du paysage pour éviter les confusions de classes de végétation.....	90
Figure 32 : Lignes de descente et de montée maximale selon Rasemann (2003) (in Depraetere, 2012). On notera que les secondes ne sont pas les inverses des premières.....	91
Figure 33. Localisation de la commune de Dantiandou.....	93
Figure 34. Schéma montrant la méthode adoptée pour extraire l'information	95
Figure 35. Signatures spectrales des zones d'entraînement.....	96
Figure 36. Carte de l'occupation des sols de la commune de Dantiandou en 1986.....	103
Figure 37. Carte de l'occupation des sols de la commune de Dantiandou en 2007.....	105
Figure 38. Carte de l'occupation des sols de la commune de Dantiandou en 2010.....	106
Figure 39. Evolution de l'occupation des sols en 1986, 2007 et 2010.....	107
Figure 40. Carte des changements entre 1986 et 2010.....	109
Figure 41. Carte de l'occupation des sols du degré carré de Niamey en 2010 (SOULEY YERO Kadidiatou, 2012)	111
Figure 42. Cartographie diachronique du bassin de Boubon par photo-interprétation (Souley Yéro, 2007)	117
Figure 43. Cartographie diachronique des bassins de Tondi Kiboro par photo-interprétation (Souley Yéro, 2008)	118
Figure 44. Evolution des superficies des classes d'occupation des sols de 1950 à 1975	120
Figure 45. Evolution des superficies des classes d'occupation des sols de 1965 à 2007	122
Figure 46. Cartographie de l'occupation des sols par photo-interprétation d'images CORONA prises en 1965 de la zone de plateaux du degré carré de Niamey (voir figure 14) (SOULEY YERO K. 2012).....	127
Figure 47. Cartographie de l'occupation des sols par photo-interprétation d'images satellitaires Google Earth de 2010 de la zone de plateaux du degré carré de Niamey (fig.14) (SOULEY YERO K. 2012).....	128
Figure 48. L'évolution de l'occupation des sols 1975-2006 vue par Ali Mahamane (2009).....	131
Figure 49. Evolution de l'occupation des sols du degré carré de Niamey par Leduc et Loireau 1997).....	132
Figure 50. Classification non-dirigée super site d'après Saux-Picart <i>et al.</i> 2009 (en haut) et zoom en 1986 (à gauche) et 2007 (à droite) de la partie centrale de la vallée de Dantiandou (Ottlé <i>et al.</i> , 2007)	133
Figure 51. Grands domaines physiographiques du degré carré (Courault et al. 1991) et leurs principales caractéristiques physiographiques (à partir d'une image NOAA)	134
Figure 52 ; exemple de mise en évidence de la désertification par De Wispelaere (1990).....	135
Figure 53. Schéma montrant le réseau hydrographique du bassin du kori de Kourtéré, en rive droite en face de Niamey (Chinen, 1999) en 1973 et en 1985.....	136

Figure 54. Photos montrant le déclin de l'arbre entre 1957 et 1975 dans une région de l'est du Niger, ainsi que la reprise des arbres par RNA entre 1975 et 2005 (Reij <i>et al.</i> , 2009)	137
Figure 55. Photographies aériennes montrant le recul de la brousse tigrée sur un plateau du degré carré de Niamey de 1950 à 1992 (Leblanc <i>et al.</i> , 2008)	138
Figure 56. Photographies aériennes montrant le recul de la végétation naturelle remplacée par des cultures et jachères, ainsi que la densification du réseau de drainage, entre 1950 et 1992 sur un versant du degré carré de Niamey (Leblanc <i>et al.</i> , 2008).....	138
Figure 57 .Evolution de la couverture végétale sur une portion du Gourma Malien (d'après Kergoat et al. EGU, 2007) : utilisation de la photo-interprétation et de la télédétection.....	138
Figure 58. Evolution de l'occupation des sols du bassin de Kouonbaka (Mali) déterminée par photo-interprétation et télédétection (Ruelland <i>et al</i> 2011, figure 10)	139
Figure 59. Principaux éléments de la toposéquence dans le Fakara et la vallée fossile du kori de Dantiandou ; localisation des bassins expérimentaux de Tondi Kiboro (Descroix <i>et al.</i> , 2012b).....	140
Figure 60. Evolution du rapport PPN/P (RUE) au Sahel de 1961 à 1990 (Prince <i>et al.</i> , 1998, figure 9a) .	144
Figure 61. Tendence de l'évolution du NDVI en Afrique de l'ouest (Eklund and Olsson 2003) (en haut) ; amplitude en bas.....	144
Figure 62. Tendence de l'évolution du NDVI entre 1982 et 1999 d'après Olsson <i>et al.</i> , 2005 (fig 1b)	146
Figure 63. Evolution de l'indice NDVI de 1981 à 2003 au Sahel d'après Anyamba et Tucker 2005 (fig 6)	146
Figure 64. Evolution de la végétation verte vue par le NDVI (NOAA AVHRR) Herrmann <i>et al.</i> , 2005 (fig. 1)	147
Figure 65. Carte de l'évolution de la PPN au Sahel entre 1982 et 1999 d'après Seaquist <i>et al.</i> (2006).....	148
Figure 66. Evolution interannuelle des tendances des résidus des écarts de NDVI par rapport aux valeurs attendues. Seuls les pixels rouges et verts sont significatifs (vert clair et brun = masques humides et hyperarides respectivement ; pixels roses, blancs et verts clairs non significatifs (Prince <i>et al.</i> , 2007, figure 3)	149
Figure 67. Diminution de l'albédo au Sahel due au reverdissement (Govaerts and Lattanzio, 2008 fig 5)	150
Figure 68. La carte ECOCLIMAP II d'occupation des sols en Afrique de l'ouest à travers 37 écosystèmes (Kaptue <i>et al.</i> 2010)	151
Figure 69. Cartes de tendance de régression linéaire de NDVI GIMMS : valeur r (a) et valeur de pente (b) 1982-2007; seules les pentes basées sur des tendances significatives à un seuil de confiance de 10% sont prises en compte dans la carte b. Le Sahel est limité par les isohyètes 150 et 700 mm.	152
Figure 70. C D: Cartes de tendance de régression linéaire de NDVI GIMMS : valeur r (a) et valeur de pente (b) 1996-2007;.....	153
Figure 71. carte de l'évolution des résidus de l'indice NDVI (Huber et al., 2011 fig 8) un net regreening ?	153

Figure 72. Tendence à l'évolution du rapport NDVI/RR sur le territoire nigérien entre 11981 et 1999 d'après Hountondji <i>et al.</i> (2004)	155
Figure 73- Désertification en progrès (1955- 1974) puis en retrait ensuite (Rasmussen <i>et al.</i> 2001, figure 4)	156
Figure 74- Exemples de modifications du couvert végétal sur trois sites du gradient bio-climatique (Ruelland <i>et al.</i> , 2008, figure 9)	157
Figure 75. Evolution du couvert végétal de 1984 à 2002 dans le périmètre de Keita (Tarchiani et Di Vecchia, 2006 fig 2)	158
Figure 76. Occupation du sol sur le bassin versant du Nakambé à Wayen en 1975, 1986 et 2002. On observe une forte diminution du couvert végétal au profit des surfaces cultivées et des sols nus entre 1975 et 2002 (Diello <i>et al.</i> , 2006)	159
Figure 77. Cartographie diachronique de l'extension des zones de sols encroûtés des bassins de Tondi Kiboro (à partir de Souley Yéro, 2008)	163
Figure 78. Cartographie diachronique de l'extension des zones de sols encroûtés dans le bassin de Boubon (à partir de Souley Yéro, 2007)	163
Figure 79. Cartographie diachronique de l'extension des zones de sols nus du bas bassin de la Sirba (Amogu, 2009)	164
Figure 80. a-Evolution de l'extension des zones cultivées au Niger depuis 1950. b- évolution du rendement céréalier moyen durant la même période (Guengant et Banoïn, 2003) en bas.....	165
Figure 81. Dépression hydro-éolienne (DHE) récente sur le plateau de Komakoukou, (Descroix et Yéro, 2010)	168
Figure 82. Vue aérienne de la partie aval du bassin de Wankama, où les DHE sont devenues coalescentes, et constituent un secteur en dégradation totale rapide (courtoisie J-L Rajot, IRD).....	168
Figure 83. Encroûtement sous un rebord de plateau, entraînant un fort ruissellement ayant causé la formation d'une grosse ravine guidée par la piste de KomaKoukou à Banizoumbou, (Descroix et Yéro, février 2010).....	169
Figure 84. Dégradation rapide d'un glacis sous replat latéritique sur la piste de Banizoumbou à Sabara Bangou, juste avant le gué du kori de Sama Dey vers le nord ; déchaussement des <i>Gueira senegalensis</i> (Descroix et Yéro, février 2010)	170
Figure 85. Même secteur : croûte algale sous un gueira, formant corniche, témoignant de la dégradation d'une jachère ancienne (Descroix et Yéro, février 2010).....	170
Figure 86. Evolution du cône de déjection double des deux ravines nord et sud de TondiKiboro entre septembre 2005 et septembre 2007 : progression des dépôts sableux (sources photos pixy).....	172
Figure 87. Arrivée du kori de Wankama dans le kori principal de Dantiandou ; l'eau peut, au gré des atterrissements et du remplissage des mares, aller vers l'amont ou l'aval de la vallée fossile ; mais els deux mares finissent par communiquer si le remplissage de la dépression est complet (Le Breton,, 2012)	172

Figure 88. Cône de déjection formé par le kori de Wankama dans la mare Sud Ouest dans laquelle il se jette par épisodes (sources photos pixy)	173
Figure 89. Evolution De la ravine du drain central du bassin de Wankama de 2004 à 2006 (Le Breton, 2012)	174
Figure 90. Evolution du réseau de ravines à Wankama 1950-2004 (Le-Breton, 2004)	175
Figure 91. Evolution du réseau de ravines dans un secteur du degré carré de Niamey (Massuel, 2005) .	175
Figure 92. Ravine formée par le drain central (à gauche) du bassin de Wankama (Descroix <i>et al.</i> , 2004)	176
Figure 93. Ravinement au bord d'une piste, probablement en lien avec celle-ci (impluvium accru, drain devenant ravine) ; on aperçoit l'encroûtement du sol au premier plan à gauche (route de Torodi à Kantchari) (Descroix et Yéro, février 2010).....	177
Figure 94. Ruissellement de type hortonien sur un plateau latéritique à la pente imperceptible lors du passage d'un grain (pluviographe de Sabara Bangou, plateau du Fakara) (Descroix <i>et al.</i> , 2004)	177
Figure 95. Crue du 30 avril 2004, bien avant le début de la mousson, sur la station Wankama AVZE alors en chantier ; le débit spécifique est fort du fait de l'absence totale d'activité végétale, comme pour els pluies de début de mousson (Descroix <i>et al.</i> , 2004)	178
Figure 96. Sapements de berge observés par Mamadou 2012) en bordure du kori de Boubon ; ces sapements pourvoient l'essentiel du volume de matériaux érodés dans le bassin	179
Figure 97. Sapements de berge et berges sub-verticales dans le bassin du kori de Dantiandou (piste Wankama- Maourey Kouara Zéno) (Descroix <i>et al.</i> , 2006).....	179
Figure 98 . Capture du kori de Wankama amont par le kori parallèle coulant au sud, au cours de la mousson 2005 (sources photos pixy).....	180
Figure 99. Parcelle de mesure constituée de croûte ERO sur le site expérimental du bassin de Boubon (Mamadou, 2012)	182
Figure 100. Dépression créée par la surpression du vent gêné par l'obstacle d'un <i>Balanites aegyptiaca</i> , très touffu même en saison sèche (Luxereau et Roussel, 2009).....	183
Figure 101. Evolution du cône de déjection du kori de Kourtéré en amont immédiat de Niamey, rive droite du fleuve Niger, apparu à partir de la crue de 1998 (Amogu, 2009).....	183
Figure 102. Cône de déjection du kori de Kourtéré en amont immédiat de Niamey, rive droite du fleuve Niger, apparu à partir de la crue de 1998 (photo Emmanuèle Gautier, 2007)	184
Figure 103. Confluent du Kourtéré en 1984 (à gauche) et en 1999 (à droite) juste après l'apparition du cône de déjection (Amogu, 2009)	184
Figure 104. Ruptures d'endoréisme observées et supposées dans le Confluent du Kourtéré en 1984 (à gauche) et en 1999 (à droite) juste après l'apparition du cône de déjection (Mamadou 2012).....	187
Figure 105. Bassin intermédiaire du fleuve Niger entre Ansongo (Mali) et Niamey ; la partie hachurée représente le bassin versant (rive droite et rive gauche) entre les stations de Kandadji et Niamey à l'exclusion des bassins du Dargol et de la Sirba (rive droite) (Amogu, 2009).....	187

Figure 106. Différence entre le débit du Niger à la station de Niamey et la somme des débits du Niger à Kandadji sommé de celui des deux grands affluents intermédiaires entre les deux stations : le Dargol et la Sirba (in Descroix <i>et al.</i> , 2012b).....	188
Figure 107. Augmentation des débits des cours d'eau sahéliens (Amogu <i>et al.</i> , 2010 ; Descroix <i>et al.</i> , 2012b).....	189
Figure 108. Mise en évidence de l'augmentation du débit du fleuve Niger en début de mousson entre Kandadji et Niamey après 1996 (Amogu <i>et al.</i> , 2010 ; Descroix <i>et al.</i> , 2012b).....	190
Figure 109. Evolution de la crue annuelle de la Sirba dans les années 1960 puis les années 1980 : on remarque une survenue de la crue de plus en plus précoce (Amani et Nguetora, 2002)	190
Figure 110. Mise en évidence de l'augmentation du débit du fleuve Niger en début de mousson entre Kandadji et Niamey après 1996 (Descroix <i>et al.</i> , 2012b).....	191
Figure 111. Affleurement de la nappe du CT3 au fond du Dallol Bosso ; photo prise en pleine saison sèche (Descroix <i>et al.</i> janvier 2004).	193
Figure 112. Affleurement de la nappe du CT3 au fond de la vallée du kori de Dantiandou, en bordure du village de Boula KouaraTegui (novembre 2006). Une photo bien plus ancienne de cette mare, alors plus réduite, figure dans la thèse de Guillaume Favreau (2000)	193
Figure 113. Bassins versants dont le comportement est connu : diminution ou augmentation des écoulements (actualisé de Amogu <i>et al.</i> , 2010)	195
Figure 114. Schéma synthétisant les fonctionnements principaux des zones sahéliennes, en zone exoréique (en haut) et en zone endoréique (en bas) (Le Breton, 2012)	196
Figure 115. Photos de l'inondation historique d'hivernage d'août 2010 à Niamey (photo I. Mamadou) .	198
Figure 116. Evolution de la crue 2012/2013 comparativement aux plus importantes crues connues à Niamey (Sighomnou, 2012).....	199
Figure 117. Carte de changements entre 1986 et 2007	218
Figure 118. Carte de changements entre 2007 et 2010	219

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION

- **Problématique générale et contexte de la thèse**

L’Afrique de l’Ouest en général et le Niger en particulier connaissent depuis la fin des années 1960 un contexte de changements environnementaux et sociétaux. En effet le Sahel était caractérisé depuis quelques décennies par une extension des activités agricoles et pastorales qui ont engendré une pression accrue sur les ressources naturelles et aussi par un accroissement de la population entraînant de profondes mutations socio-économiques ; à cela s’ajoute la variabilité climatique qui s’est traduite par une baisse considérable des précipitations à partir de la fin des années 1960 avec des sécheresses sans précédent au milieu des années 1970 et des années 1980 (Ruelland *et al.*, 2011).

Au Niger les contraintes naturelles récurrentes (sècheresses, prédateurs, ...) rendent plus ou moins permanente la menace de ne pas atteindre l’autosuffisance alimentaire, provoquant d’importants mouvements de populations, bouleversant ainsi leurs modes de vie (sédentarisation des nomades, exode rural). Par ailleurs, l’accroissement démographique provoque l’accélération de la pression sur les ressources naturelles. Selon les données disponibles à l’institut national de la statistique, le Niger aurait évolué de 2 300 000 habitants en 1950 à 7 250 000 en 1988 pour passer à 11 060 000 en 2001 selon le dernier recensement général (RGPH 2001) et 15 millions en début 2010 (estimation ONU FAO). On constate qu’entre 1950 et 1988 le Niger avait triplé sa population en moins de 40 ans.

Des études montrent que la longue sécheresse qu’a connue l’Afrique de l’Ouest après 1968 s’atténue partiellement dans sa partie orientale (Niger-Tchad, est du Mali et du Burkina Faso) depuis le milieu des années 1990 (Ali et Lebel, 2009 ; Lebel et Ali, 2009).

Pourtant, des observations ont montré que, dès la fin des années 1970, en zone sahélienne, le ruissellement et le débit des cours d’eau augmentaient en dépit de la baisse de la pluviométrie (Albergel, 1987). Par contre plus au sud en zone soudanienne, une baisse des débits est observée avec la baisse de la pluviométrie (Liéno *et al.*, 2008). Cela a été expliqué par l’abondance des réservoirs dans ces zones plus humides, réservoirs dont la vidange progressive a accentué la baisse de la ressource globale (Descroix *et al.*, 2009).

Par ailleurs, plus de 30 ans après le début de la sécheresse, une augmentation du niveau de la nappe phréatique a été observée dans la région de Niamey (Leduc *et al.*, 2001), ce qui correspond à une conséquence de l’augmentation du ruissellement. Cette dernière-ci se traduit en zone endoréique par une augmentation du nombre et du volume des mares; or ces dernières ont été déterminées comme étant la principale zone de recharge de la nappe (Desconnets *et al.*, 1997, Leduc *et al.*, 1997), d’où la remontée du

niveau phréatique, qui est de plus en plus rapide. Par contre, dans le reste de l'Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne, on observe une baisse de la nappe : moins d'infiltration donc plus de ruissellement, cela conduit à un appauvrissement des réserves en eau des interfluves; par ailleurs dans les zones de climat soudanien, les réservoirs naturels du sol se sont peu à peu vidés depuis le début de la sécheresse, en alimentant d'abord l'écoulement de base, puis en se rétrécissant au fur et à mesure de la diminution de l'alimentation par infiltration. On remarque toutefois, dans au moins deux zones où des aménagements de terroirs en vue de la conservation des sols ont été opérés, une remontée de la nappe non liée à la croissance des mares, mais à l'augmentation de l'infiltration sur l'ensemble du terroir; c'est le cas au Yatenga (nord du plateau central burkinabé) et dans la région de Keita (Ader, Niger) (Reij *et al.*, 2005 ; Larwanou *et al.*, 2006 ; Reij *et al.*, 2009).

Plusieurs travaux ont mis en évidence le rôle de l'Homme et de la Société à travers la dynamique spatiale des occupations des sols. Ainsi sur l'ensemble du Sahel, on observe deux types d'évolution de l'occupation du sol qui se traduisent :

- soit par une « récupération » de la végétation arborée. Ce phénomène est observé après les décennies 70 et 80, années qui ont été les plus sèches depuis le début des observations. Citons par exemple: la région de Dori au Nord du Burkina (Rasmussen, 2001); l'Est Nigérien (régions d'Aguié, de Keita, Est de Zinder, (Larwanou *et al.*, 2006) où la reprise de la végétation est liée à l'action de sa restauration volontaire, en particulier la pratique de la RNA « régénération naturelle assistée » (Reij *et al.*, 2005). On note que pour certaines régions, l'émigration de la population active vers les villes ou plutôt vers l'Europe provoque une diminution de l'activité agricole. Les apports des émigrés suffisent à assurer le bien-être des ménages ruraux (Boundou, Sénégal Oriental, Descroix et Lasserre, 2007),
- soit par un recul de la végétation naturelle observé généralement au profit des cultures, des jachères, et, de plus en plus, des terrains dégradés, des sols dénudés et érodés par l'érosion hydrique et l'érosion éolienne.

De ce fait le Sud-Ouest du Niger connaît une forte croissance démographique qui se manifeste par un profond changement dans l'occupation des sols et une très forte baisse de la biomasse. Il est donc important de signaler que cela n'est pas forcément représentatif de l'ensemble du Sahel ni de l'Afrique de l'ouest, comme nous venons de le signaler. De fait, de nombreux auteurs évoquent un net « reverdissement » du Sahel et un recul de la désertification (Prince *et al.*, 1998; Anyamba et Tucker, 2005; Olsson *et al.*, 2005; Prince *et al.*, 2007; Fensholt et Rasmussen, 2011), ce que nous aborderons dans les prochaines pages. Cette dynamique des états de surface influe sur le cycle de l'eau au travers de:

- la couverture végétale. Sa modification explique l'évolution du ruissellement. Elle intercepte une partie des précipitations et elle diminue l'énergie cinétique des gouttes d'eau arrivant à la surface du sol. La végétation facilite l'infiltration de l'eau à travers les couches superficielles du sol et du sous-sol. Elle favorise l'évapotranspiration (ETR) par l'absorption de l'eau infiltrée par le système racinaire des plantes. Elle puise dans les réserves en eau des nappes (comme le gao « *Faidherbia albida* » au Sahel) et modifie la

teneur en eau et le stock d'eau dans une grande partie de la zone non-saturée. L'absence de végétation conduit à l'encroûtement du sol qui accélère le ruissellement, limitant donc infiltration et l'ETR. Enfin l'humidité du sol est préservée par la végétation qui permet l'infiltration immédiate lors de la pluie.

- Des cultures. Elles ont un rôle particulier du fait de leur extension, de leur taux de recouvrement. L'accélération des rotations (cultures/jachères) est une des causes de la dégradation des sols (encroûtement, formation de dépressions hydro-éoliennes). Pourtant quand elles sont bien menées et les sols non-dégradés, les cultures sont les surfaces les moins ruisselantes. Elles sont en phase de forte extension spatiale.

- des zones de sol nu. Elles s'étendent très vite sur les secteurs où cultures et jachères alternent trop vite. Au début il s'agit de simples « trous », peu à peu le sol est décapé et le ruissellement accéléré. Petit à petit ces plages de sol nu s'étendent, deviennent coalescentes, et en quelques années, l'essentiel de la surface est glacé, encroûté, et la végétation ne subsiste plus que par plages de plus en plus réduites, les racines sont mises à nu.

En effet, l'occupation des sols est un élément clé de l'évolution de la ressource en eau au niveau local et régional. De ce fait, la dynamique des états de surface et son influence sur le cycle de l'eau guideront le questionnement scientifique de cette thèse. L'occupation du sol ayant été définie comme le facteur principal de l'évolution des ressources en eau, il est nécessaire de mieux l'analyser, ainsi que de déterminer son évolution dans l'espace et le temps. De nombreuses cartographies de l'occupation des sols ont été réalisées en Afrique de l'Ouest ces dernières années (Loireau, 1998 ; Hiernaux et Ayantunde, 2004 ; Otlé *et al.*, 2007 ; Saux Picard *et al.*, 2009 ; Hiernaux *et al.*, 2009, etc), permettant de disposer de zones de validation. Mais il reste à actualiser ces données, à les homogénéiser, et à étendre l'information sur l'ensemble de la zone du degré carré de Niamey, Ces trois éléments sont le fondement de cette thèse qui s'appuiera en particulier sur la région uniquement endoréique.

Cette thèse s'intègre, en effet, dans le prolongement du programme AMMA, dans l'ORE AMMA Catch, ainsi que dans l'ANR ECLIS (Elevage, vulnérabilité et adaptabilité rurales aux changements climatiques et sociétaux en Afrique de l'Ouest sub-Saharienne). Cette thèse a en effet bénéficié de l'apport du travail d'ECLIS (dans le cadre de l'évaluation de la biomasse disponible pour les éleveurs), puis du programme ANR ESCAPE 2012-2015 (qui traite de la vulnérabilité des populations).

Ce travail a été financé par une bourse d'étude MAE/SCAC entre février 2009 à février 2012, avec le soutien d'ECLIS pour les missions effectuées surtout dans le cadre de la tâche ECOS consacrée à l'étude des éléments de l'écosystème. Enfin, un complément de bourse IRD a été obtenu pour la période de juillet 2011 à juin 2012. Le travail a été réalisé dans deux laboratoires d'accueil LTHE (Grenoble) et ESPACE-DEV (Montpellier).

- **Objectifs scientifiques**

Ainsi l'objectif global de ce travail de thèse est de mieux comprendre l'impact de l'évolution des occupations des sols sur le cycle de l'eau dans la zone endoréique du degré carré de Niamey.

- **Organisation du mémoire**

Le présent document est organisé en trois parties:

- La première partie présente tout d'abord le cadre général de cette étude, son contexte scientifique, dans la poursuite des programmes HAPEX puis AMMA, cette dernière expérience ayant permis de disposer d'un important réseau de mesures hydro-pluviométriques offrant la possibilité de contrôler de multiples manières l'impact des changements d'usage des sols sur le cycle de l'eau. On montre comment les sols fragiles sont protégés d'une pluie tombant en grande partie avec de fortes intensités tant que le couvert végétal est conséquent, et comment la croissance démographique et une accélération d'un système cultural par définition extensif ont pu mener à des déséquilibres hydrologiques. Cette évolution démographique et ce contexte sont vus depuis l'échelle du Sahel et du Niger jusqu'à celle de la commune de Dantiandou qui va être le cœur de cette étude. On s'intéresse, avant de passer à la deuxième partie, aux problèmes d'échelle spatiale et temporelle, problèmes éminemment géographiques.
- La deuxième partie aborde la thématique scientifique sous l'angle de l'analyse des paysages : comment cette analyse peut-elle mettre en évidence le lien profond entre le couvert végétal, son exploitation et sa transformation par les sociétés rurales d'une part, le cycle de l'eau et en particulier la part respective de l'infiltration et du ruissellement dans le bilan de l'eau à l'échelle de la parcelle, du versant, du terroir, du bassin, de la région? On décrit ensuite la manière dont la télédétection est utilisée ici afin de déterminer la chronique de l'évolution des occupations des sols. La deuxième partie s'achève sur un des produits les plus attendus de ce travail, à savoir une cartographie de l'occupation des sols par télédétection de la commune de Dantiandou pour 1986 et 2010, ce qui permet de bien cerner l'évolution et, en partie, d'en distinguer les causes naturelles (sécheresse) des causes anthropiques (changements d'usage des sols); elle s'accompagne d'une carte pour 2010 d'une grande partie du degré carré de Niamey.
- La troisième et dernière partie de ce mémoire de thèse replace l'étude diachronique des occupations des sols dans leur contexte spatial et temporel, comparant cette évolution avec d'autres périodes et surtout ce qu'on observe dans les autres parties du Sahel, et dans celui-ci dans son intégralité. Tout d'abord, le deuxième produit attendu est une comparaison de l'occupation du sol réalisée entre la situation actuelle et celle qui prévalait avant la sécheresse (1965) ; celle-ci est réalisée par photo-interprétation, et, débutant avant cette sécheresse, permet

de constater les effets cumulés de cette sécheresse et des activités socio-économiques. On s'est attachée ensuite à comparer ces produits avec les nombreuses cartographies proposées dans la littérature, en tentant d'éviter les écueils méthodologiques et – peut-être – idéologiques? Enfin, cette troisième partie se termine par une synthèse de toutes les modifications observées du cycle de l'eau, du ravinement et du sapement de berge à la généralisation des espaces encroûtés qui expliquent l'augmentation généralisée des écoulements au Sahel, telle qu'elle avait été mise en évidence par Jean Albergel dès 1987.

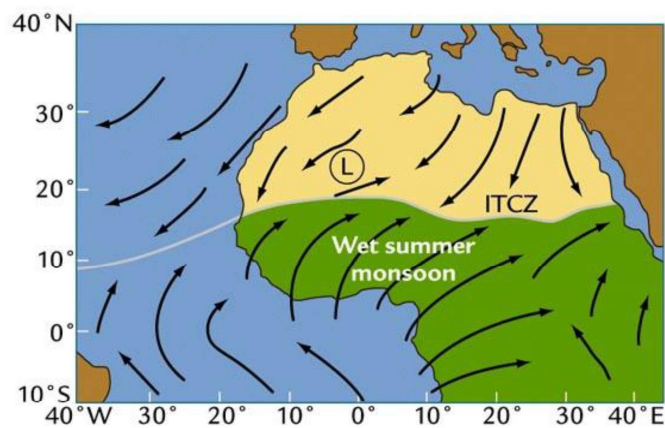
PREMIERE PARTIE

Le Niger : un milieu en mutation

CHAPITRE 1 : De fortes contraintes environnementales et anthropiques

1.1. Les caractéristiques hydrologiques du milieu

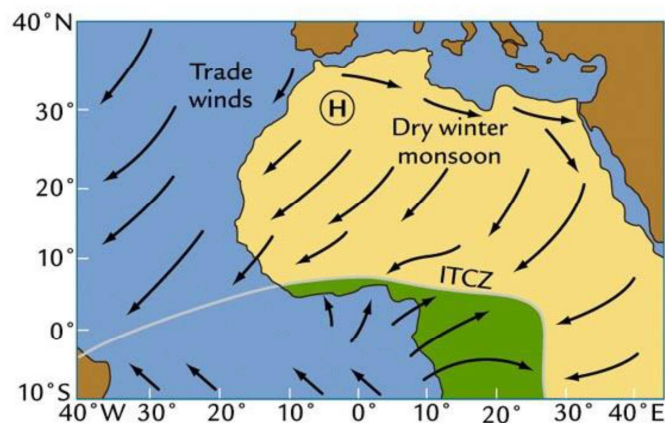
L'Afrique de l'Ouest a un climat de mousson presque partout monomodal, avec une saison sèche (hiver boréal) et une saison des pluies (été boréal). Ce système est dirigé par le déplacement en latitude de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT) et de sa trace au sol, le Front Inter-Tropical (FIT), respectivement surface inclinée et ligne marquant la rencontre entre les masses d'air sec liées aux alizés continentaux de l'hémisphère nord (vent d'est appelé « harmattan ») et les masses d'air humides provenant de l'Atlantique tropical Sud (alizé maritime provenant du Sud-Est), déviées vers le Nord-Est par la force de Coriolis à leur passage de l'Equateur. Cette déviation et le long parcours océanique de ces masses d'air suffisent à expliquer l'adoption du terme mousson, originaire de l'Océan Indien, pour décrire le fonctionnement du climat Ouest-Africain (Figure 1).



A Northern hemisphere summer

Période de mousson (JAS)

Fort flux de mousson de Sud-Sud Ouest et faible Harmattan de Nord-Nord Est



B Northern hemisphere winter

Période hivernale (DJF)

Faible flux de mousson de Sud-Sud Ouest et fort Harmattan de Nord-Nord Est

Figure 1. Schéma montrant l'opposition des processus durant la saison des pluies (mousson) et la saison sèche (hiver)

Le FIT stationne au sud de l'Equateur pendant l'été austral avant de repartir vers le nord et revenir sur le continent, vers mars-avril et provoquer des pluies abondantes sur son tracé; sa position la plus septentrionale est atteinte fin juillet - début août, et le FIT est alors situé au Nord du Sahel, vers 17-18° de latitude Nord. Il redescend alors vers le sud, délaissant fin novembre le littoral du Golfe de Guinée. Dans les zones proches de ce dernier, de ce fait, on observe un régime de pluies bimodal puisqu'une petite saison sèche apparaît entre les deux passages du FIT, en juillet et août. Cela se traduit, uniquement dans les zones proches du littoral, par un régime bimodal des cours d'eau, qui connaissent deux crues annuelles et deux périodes de basses-eaux, alors que, dès le 8^{ème} degré de latitude nord, toute la région connaît un régime pluviométrique et hydrologique à deux saisons, l'une sèche, d'autant plus longue que l'on se déplace vers le nord, et l'autre humide, qui ne dure que 2 ou 3 mois au nord du Sahel. La relative abondance des précipitations au sud, et la forte intensité des évènements, dans toute la zone, justifient également l'adoption du terme « mousson » pour caractériser la saison des pluies, localement nommée « hivernage ».

On a l'habitude de distinguer, dans cette vaste région, et passée la zone littorale qu'on peut qualifier de « tropicale humide à régime équatorial », trois sous types de climat principaux, du Sud au Nord:

- le climat « guinéen », caractérisé par un montant de précipitations annuelles supérieures à 1300-1500 mm suivant les auteurs, la longueur de l'hivernage étant de 5 à 7 mois; guinéen car typique des zones proches du golfe de Guinée et des montagnes du pays éponyme du climat, c'est un climat tropical humide;

- le climat « soudanien », qui reçoit de 600 - 750 mm à 1300 - 1500 mm par an et connaît une saison des pluies de 4 à 5 mois; ce climat tropical est sub-humide au Sud et semi-aride au Nord;

- le climat « sahélien » est un climat tropical semi-aride à aride, il passe progressivement au nord au climat « saharien » aride à hyper-aride; le « Sahel », dont le nom provient de l'arabe « rivage » est caractérisé par des précipitations de 100-200 mm au nord jusqu'à 600 - 750 mm au Sud.

La figure 2 montre l'extension géographique des zones climatiques.

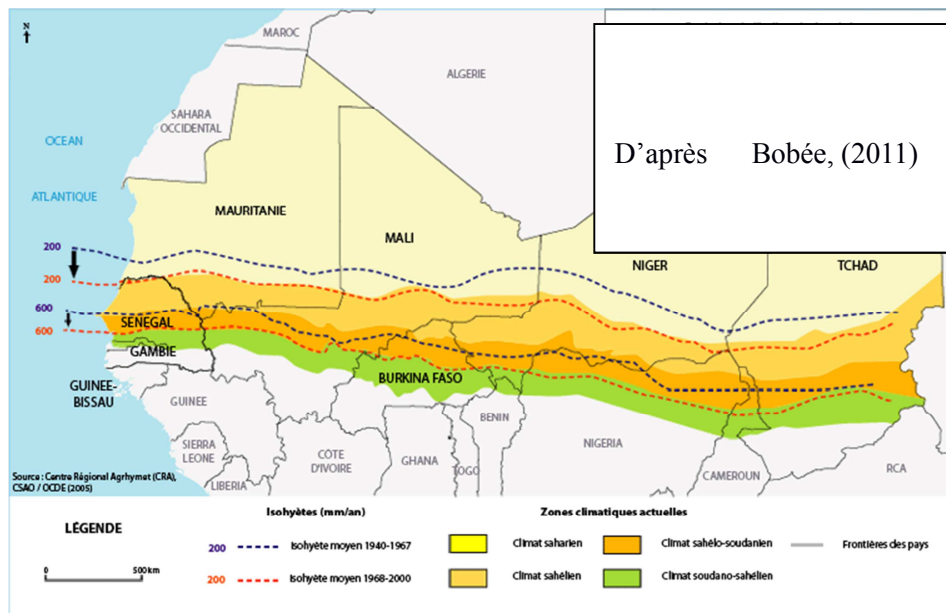
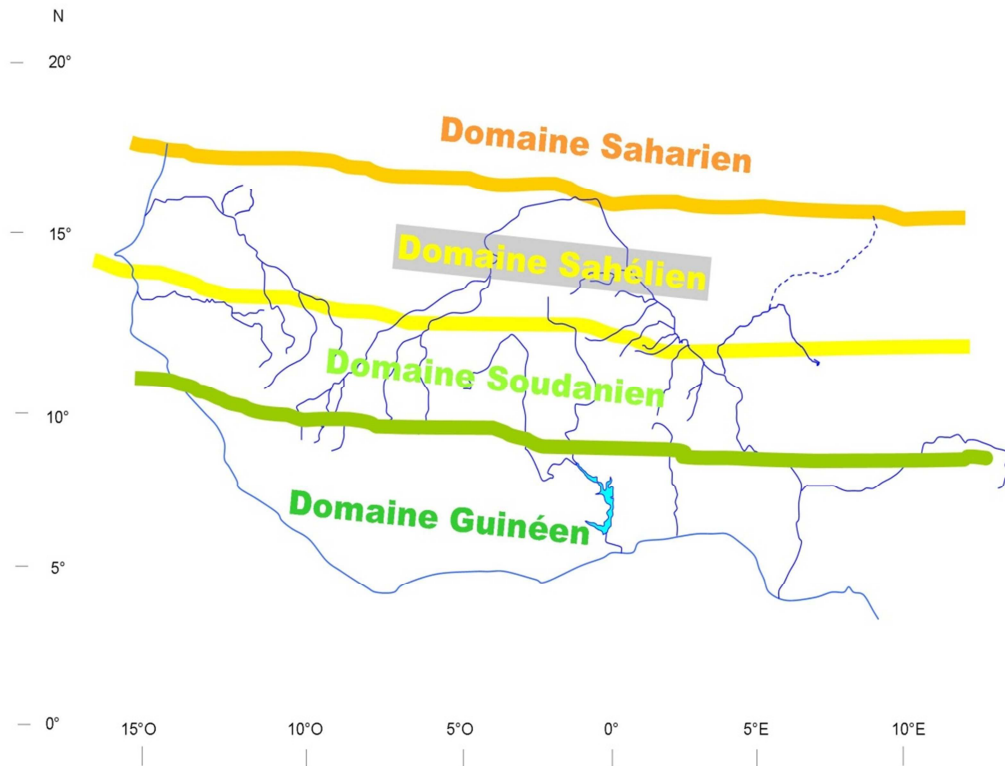
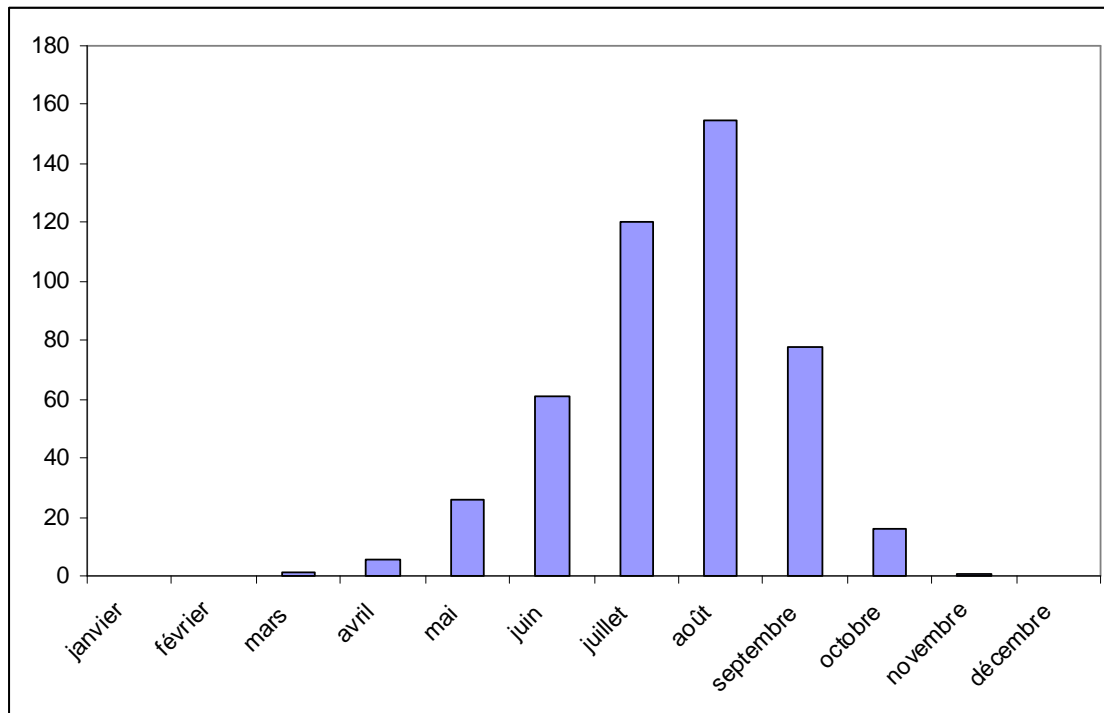


Figure 2 . Cartes des différents domaines éco-climatiques d’Afrique de l’Ouest (en haut) et plus précisément du domaine sahélien (en bas, d’après Bobée, 2011)

Le climat sahélien a une saison des pluies qui dure de deux mois et demi à 4 mois maximum au sud, commençant en général fin juin et s’achevant fin septembre. L’essentiel des pluies tombe sous la

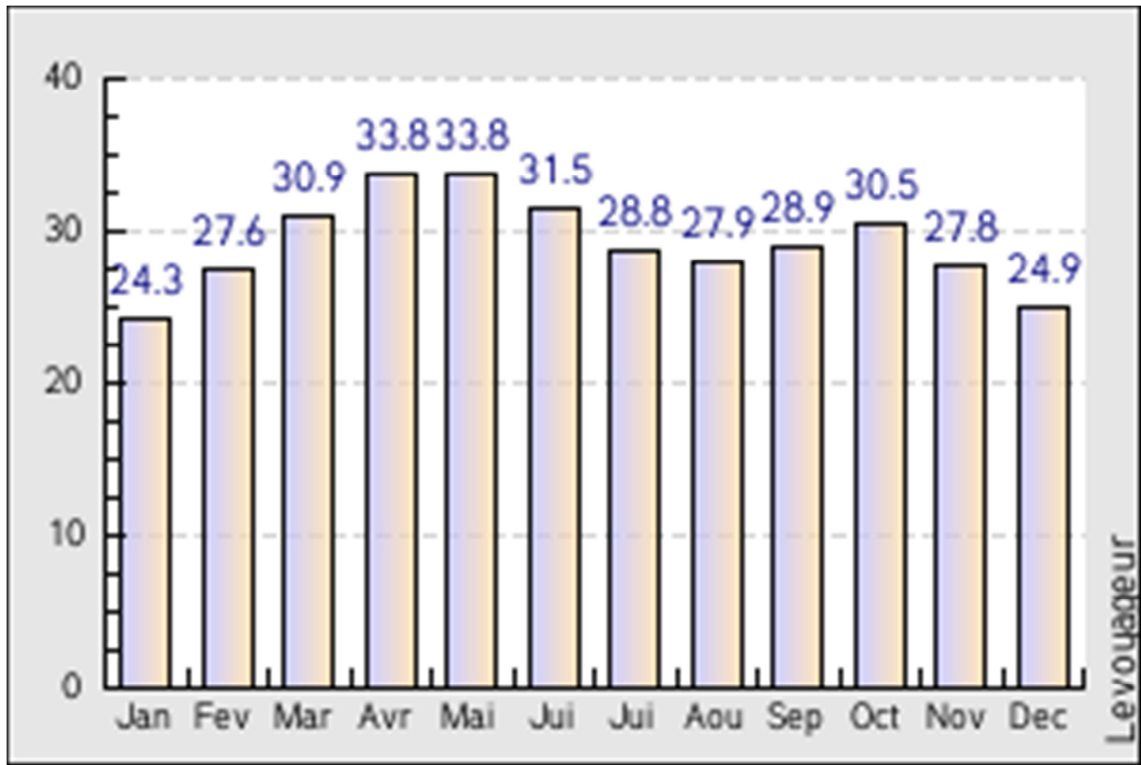
forme d'averses de forte intensité (45% avec une intensité supérieure à 60 mm/h, Le Breton, 2012). Ces pluies sont pour l'essentiel liées au passage de lignes de grain (entre 15 et 30 durant la saison), le reste étant dû à des systèmes convectifs isolés. L'intensité de la pluie est très forte au début, durant 30 à 90 minutes (phase convective du grain), puis une traine peut durer plusieurs heures ensuite, donnant des précipitations de faibles intensités (phase stratiforme du grain). Le mois le plus pluvieux est août, suivi le plus souvent de juillet puis septembre et juin (Figure 3).

Les températures, elles, connaissent presque partout un régime bimodal, avec des températures minimales annuelles en décembre-février (saison sèche « fraîche », puis un maximum annuel lié au renforcement de l'harmattan de mars à juin (saison sèche « chaude »); l'arrivée des pluies se caractérise par une baisse relative des températures qui forment un minimum secondaire en juillet-septembre, avant de remonter sensiblement en octobre novembre où elles constituent un maximum secondaire (Figure 4).



Source: Descroix et al., 2012b

Figure 3. Répartition mensuelle des précipitations (mm) en régime de mousson : moyenne 1951- 2010 des pluies sur le bassin du Niger Moyen (entre Ansongo et Niamey



Source: <http://www.levoyageur.net/climat-ville-NIAMEY-AERO.html>

Figure 4 . Répartition mensuelle des températures moyennes à Niamey (Niger)

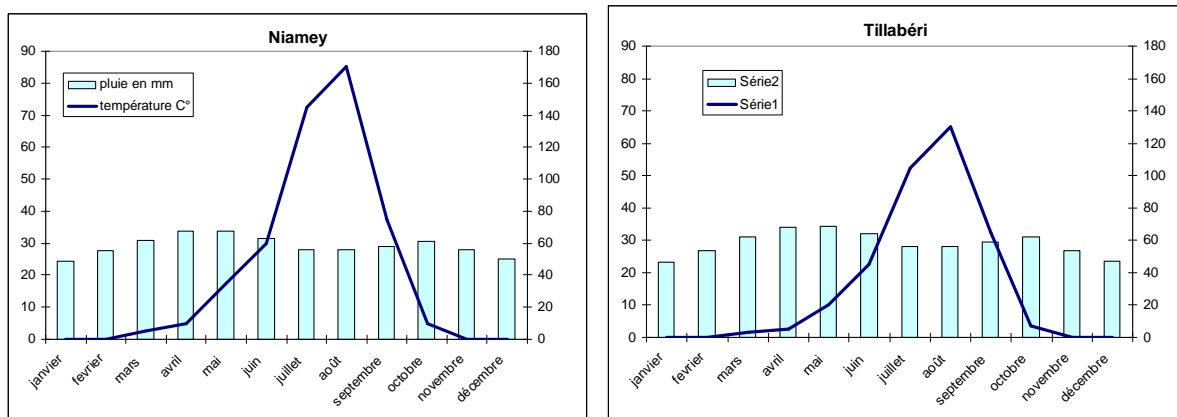


Figure 5 . Diagrammes ombro-thermiques des stations de Niamey et Tillabéri (Niger)

Du fait de la longueur de la saison sèche (9 mois en moyenne au Sahel), le climat est très nettement semi-aride, voire aride au nord. Les diagrammes ombro-thermiques donnent de 9 à 11 mois secs en général (Figure 5).

Ce climat a pour conséquence une végétation adaptée à l'aridité, constituée naturellement d'une brousse buissonnante aujourd'hui à peu près disparue, d'une steppe ponctuée d'arbustes xérophytes

dans les sites les plus secs ; deux types de zones particulières comportent des végétations plus denses:

- les **bas-fonds**, où de grands arbres témoignent de la concentration des écoulements, plus généralement aussi les secteurs bas où la nappe phréatique est proche, souvent ponctués de « *Faidherbia albida* » le « gao » (nom utilisé aussi bien haoussa qu'en zarma) qui est l'arbre emblématique du Sahel;
- les plateaux de **brousse tigrée**, cette végétation contractée typique des zones semi-arides à arides, où une partie de la surface collecte de l'eau pour des bandes de végétation profitant ainsi, en surplus des eaux pluviales reçues directement, des eaux de ruissellement d'un impluvium naturel situé immédiatement en amont (Galle *et al.*, 1999) ; elle occupe ici les plateaux latéritiques cuirassés qui constituent de 10 à 30% des paysages suivant les secteurs.

Plus on se déplace vers le Nord, et plus la végétation est constituée d'herbacées et de graminées, la proportion de plantes annuelles croissant vers le Nord.

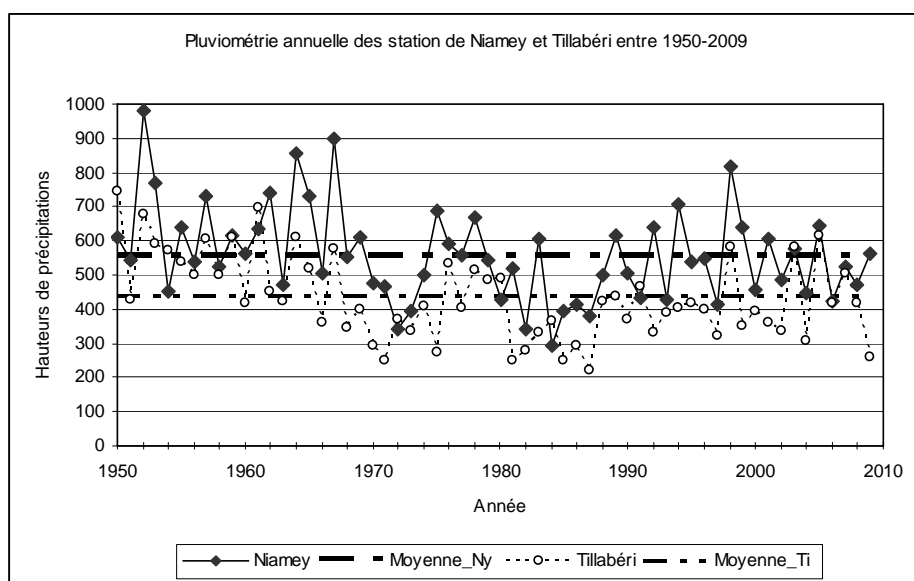
Toutefois, de nos jours, l'essentiel des secteurs non cuirassés est occupé par l'agro-système cultures/jachères, et hormis les grands arbres il subsiste peu d'éléments de la végétation « naturelle ».

1.1.1. Climat et sécheresses les plus marquées 1972-1973, 1982-1984

La région d'étude, située par 13-14° de latitude nord, est caractérisée par un climat de type tropical semi-aride, avec un seul régime pluviométrique contrôlé par la mousson ouest africaine. Pour caractériser la pluviosité de notre zone d'étude, nous avons utilisé en plus de la station de Niamey - qui est souvent utilisée pour la caractérisation de cette zone du fait de sa longue série d'enregistrements, commencée au tout début du 20^{ème} siècle - la station de mesure de Tillabéri qui dispose également d'une longue chronique de données. Sur la figure 6 sont présentées les hauteurs pluviométriques totales annuelles enregistrées durant la période (1950-2009). Les figures révèlent la très forte variabilité interannuelle des précipitations de la zone. L'analyse des deux courbes met en évidence une alternance de périodes plus ou moins sèches. On observe que des années de déficit pluviométrique contrastent avec des périodes relativement plus humides.

Lorsqu'on compare les données des deux stations, on constate que la moyenne de la pluviométrie annuelle de Niamey était de 559 mm pour la période 1950-2009 alors que celle de Tillabéri elle était de 437 mm pour cette même période. La comparaison des hauteurs pluviométriques montre que Tillabéri a été plus affectée par des déficits pluviométriques que Niamey. L'observation des courbes révèle que les années 1950 – 1969 constituent une période plus arrosée. Cette période était caractérisée par une pluviométrie relativement homogène et cela avant le point de rupture qui se produit en 1966 pour Tillabéri. Par contre les décennies

1970 - 1989, ont été globalement sèches pour les deux stations, toutefois, la sécheresse a été beaucoup plus marquée à Tillabéri qu'à Niamey où la chronique est ponctuée par quelques années relativement humides (1975, 1978, 1983, 1989). Notons que pour Tillabéri les déficits pluviométriques ont commencé à être enregistrés dès 1966. Et sur ces 25 ans on n'a enregistré que trois années 1967, 1976 et 1978 où la pluviosité était supérieure à 500 mm respectivement 576,1 mm 532,5 mm et 514,5 mm. Pour les autres années, elle était inférieure à 500 mm et elle a enregistré sa plus faible pluviométrie en 1987 avec 219,2 mm de précipitations annuelles. En ce qui concerne la période 1990 - 2009, elle était caractérisée par la présence de quelques années excédentaires (1992, 1994, 1998, 1999, 2001, 2003, 2005, 2009) pour Niamey et (1991, 1998, 2003, 2005 et 2007) pour Tillabéri, mais la tendance globale reste déficitaire par rapport à la moyenne 1950-2009 surtout pour Tillabéri qui a enregistré une année très déficitaire en 2009 avec 259,8 mm.



Source des données : Direction de la Météorologie Nationale

Figure 6 : Pluviométrie annuelle des stations de Niamey et Tillabéri entre 1950 et 2009

Sur 19 ans on n'a enregistré que huit années humides pour la station de Niamey et cinq pour Tillabéri (Figure 6). Les deux dernières décennies sont donc globalement plutôt déficitaires malgré une remontée relative des précipitations après 1995; mais elles se caractérisent surtout par une augmentation sensible de l'irrégularité interannuelle (Ali et Lebel, 2009).

Pour ce qui est de la moyenne décennale du nombre de jours de pluies aux stations de Niamey et Tillabéri durant la même période 1950 - 2009 (Tableau 1), on note également à ce niveau une très forte différence entre les deux stations. Pour la décennie 1950 - 2009, le nombre de jours de pluies enregistré à Niamey était supérieur à celui enregistré à Tillabéri. On constate que d'une décennie à l'autre, on assiste à une diminution du nombre de jours de pluies et ce jusqu'à la décennie 1980 - 1989. Et pendant la décennie 1990 - 1999, on a assisté à une ré-augmentation du nombre de jours de pluie par rapport à la décennie 1980 - 1989, pour les

deux stations. Avant d'enregistrer à nouveau une légère diminution pour la période 2000 - 2009. Cette baisse dans le nombre des jours pluvieux est en effet plus sensible à Tillabéri qu'à Niamey.

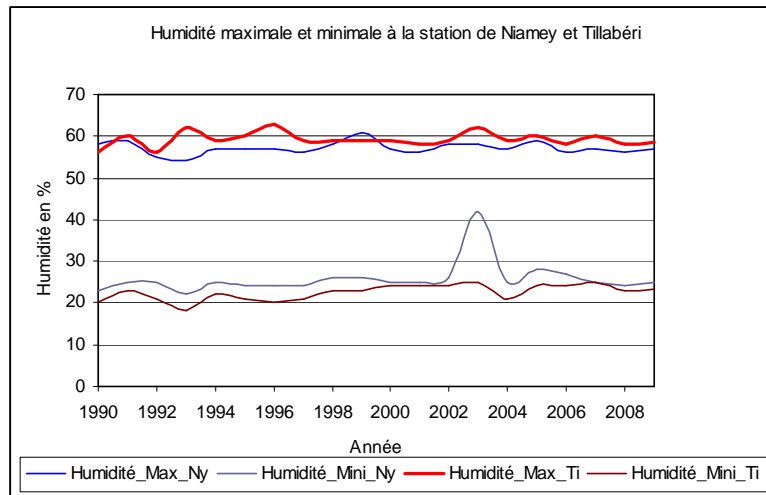
Sur la figure 7, sont présentées les valeurs de l'humidité relative maximale et minimale de la région d'étude. On observe à ce niveau que les valeurs de l'humidité maximale à Tillabéri sont plus élevées qu'à Niamey. Par contre pour ce qui est des minimales, elles sont plus faibles par rapport à celles de Niamey. L'humidité ne dépasse guère 63%, dans cette région affectée par des fortes variations thermiques.

Quant aux températures, elles sont variables selon les saisons, mais restent en permanence partout élevées. Les températures maximales mensuelles les plus élevées se situent en avril (41,2°C) et mai (40,2°C) alors que les minimales se rencontrent en janvier avec 16,60°C, en décembre 16,90°C, et en février 18,90°C (Souley Yéro, 2008). Ces fortes températures accélèrent l'évaporation qui entraîne par conséquent l'assèchement du sol (Faran Maiga, 2000). Sur le plan hydrologique, la très forte évaporation limite le nombre et le volume des plans d'eaux libres permanents ou semi-permanents, cette intense et rapide évaporation fait disparaître rapidement aussi l'humidité du sol même après une importante pluie dans cette région. Au plan géomorphologique, elle favorise la remontée et la recristallisation en surface des sels dissous. Quant aux sols sableux desséchés par évaporation, ils deviennent plus meubles et vulnérables à la déflation ou à la corrosion (Faran Maiga, 2004).

Tableau 1. Nombre moyen de jours de pluie par an suivant les décennies, à Niamey et à Tillabéry

Année	Moyenne décennale_Niamey	Moyenne décennale_Tillabéri
1950-1959	61	53
1960-1969	59	50
1970-1979	51	44
1980-1989	47	35
1990-1999	50	45
2000-2009	49	43

Source des données : Direction de la Météorologie Nationale du Niger



Source des données : Direction de la Météorologie Nationale du Niger

Figure 7. Humidité relative maximale et minimale aux stations de Niamey et Tillabéri entre 1990 et 2009

1.1.2 Cadre morpho-structural imposé par la géologie : quel lien avec l'endoréisme ?

Le Niger occidental est subdivisé au niveau géologique en deux grandes régions naturelles (figure 8) : à l'ouest du fleuve s'étend le massif de socle du Liptako - Gourma où affleurent les terrains précambriens et leur lithomarge d'altération ; à l'est du fleuve se termine le bassin sédimentaire des Iullemeden dont les formations sédimentaires reposent sur le socle, la vallée du fleuve constituant souvent la dépression de contact entre les deux ensembles ; ces terrains sédimentaires correspondent à des séries de grès argileux supérieurs (Ct3) dont l'épaisseur maximum est de 50-100 m et sont composés de mélanges solidifiés de quartz, oxydes de fer et kaolinite de textures diverses (Greigert et Pougnet 1967). Les formations de la région du socle (Liptako – Gourma) appartiennent au système birrimien qui est constitué de granite, et plus localement de roches sédimentaires non ou peu métamorphiques. On distingue des schistes dans ces formations métamorphiques d'après (Machens, 1967). On note aussi des séries plus métamorphiques qui sont des gneiss à muscovite, à deux micas ou à biotite, des roches métamorphiques d'origine incertaines dont les amphibolites. La lithologie et la structure de ces roches (schistes) sont sensibles au ruissellement et à l'érosion.

Concernant le bassin des Iullemeden, son histoire sédimentaire s'étend du cambrien au quaternaire (Favreau, 1996). Ce bassin a connu plusieurs transgressions marines du Turonien au Thanétien (Greigert, 1966) et des épisodes continentaux. Ces transgressions en provenance du nord-est puis du nord-ouest, ont déposé des sédiments à dominance carbonatée, calcaires blancs et marnes, typiques des mers chaudes épicontinentales.

Les principales formations d'origine continentale qui se superposent dans le bassin sont le Continental Intercalaire, le Continental Hamadien, et le Continental Terminal (Kilian, 1931 ; Greigert, 1966, in Massuel 2005). Les formations sédimentaires du bassin des Iullemeden qui constituent la structure géologique de nos terrains d'études sont composées des grès argileux du Moyen Niger (CT3). Les formations plus gréseuses (Ct3) affleurent sur tout le centre du bassin des Iullemeden et celles plus argileuses au Nord (Ct.2) (Gavaud M., 1977). Il s'agit des grès silteux à argileux ocre, le plus souvent jaunâtres à rougeâtres, à granulométrie fine. Les sédiments du CT3, issus du manteau d'altération développé pendant la longue période chaude et humide du Paléocène-Eocène se sont déposés en milieu continental oxydant, d'où une quasi-absence de trace organique (Massuel, 2005). La surface de la lithomarge des roches du socle et des formations du Continental Terminal, après un aplanissement généralisé au Néocène supérieur, a ensuite été profondément disséquée par les cours d'eau Quaternaires (Ambouta, 1997). Le relief tabulaire ferrugineux qui domine le paysage actuel est donc né de l'entaillement du Continental Terminal par les cours d'eau durant la période humide du Quaternaire (Desconnets, 1994). Cet épisode d'érosion intense lié à un climat humide a précédé des périodes arides au cours desquels se sont mis en place des systèmes dunaires d'âges différents (plus anciens 40 000BP et plus récent 20 000 à 15 000BP) (Peugeot, 1995). Ce paysage a connu un dernier épisode d'ensablement récent pendant lequel les parties inférieures ont été envahies par des sables éoliens d'origine locale qui constituent l'actuelle couverture sableuse des larges vallées fossiles (dallols et koris).

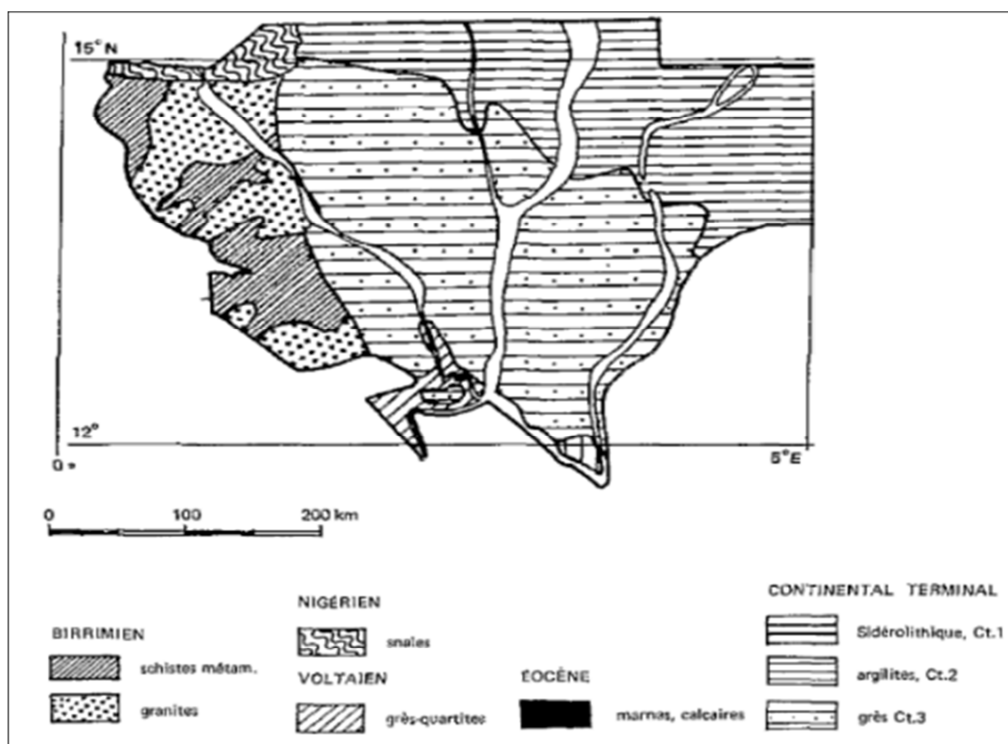


Figure 8. Géologie du Niger Occidental (d'après Gavaud, 1977)

La géologie du substratum a influencé différemment l'écoulement des eaux souterraines et le ruissellement de surface de la région du socle et celle du bassin des Iullemmeden. Les facteurs tectoniques et lithologiques ont joué un rôle important dans la mise en place du système de dégradation du réseau hydrographique de ces deux zones. Ces formes de dégradations sont aussi conditionnées par le climat et le système des pentes. Le cadre morpho-structural imposé par l'histoire géologique au cours du Quaternaire a donné ainsi naissance à l'endoréisme dans le bassin des Iullemmeden et à l'exoréisme dans la région du socle.

La région du socle est caractérisée par la présence des cours d'eau qui génèrent des écoulements vers le fleuve, contrairement à la région du bassin des Iullemmeden où on est en présence d'un réseau hydrographique fossile. Ce réseau fossile constitue par contre une importante réserve en eaux souterraines à cause de la proximité de la nappe phréatique. Inversement, dans la région du socle les aquifères sont très limités.

Dans la zone endoréique, l'écoulement est, en effet, dirigé par les pentes de surface vers les dépressions fermées intérieures. L'ensemble du degré carré de Niamey est caractérisé par une hydrologie de ce type endoréique. Les vallées fossiles (koris) sont fractionnées en micro-bassins créant une conformation d'endoréisme limitant l'écoulement des eaux de pluie à une zone réduite au niveau de leur impluvium (Le-Breton, 2004). Les écoulements de ces bassins versants sont intermittents. Les écoulements concentrés sont en effet insuffisants pour s'interconnecter durablement lors de la saison de pluie (Massuel, 2005). Pendant la saison des pluies, le ruissellement se concentre dans les ravines naissantes sur les talus des plateaux. Ces ravines se rejoignent et s'amoindrissent dans les zones d'épandage pour se regrouper en aval et créer des mares dans les bas-fonds (Audrin, 2005).

1.1.3 Sols pauvres et fragiles quelle contribution au cycle de l'eau ?

L'état général des sols dans cette région, souvent amenuisés et remaniés, est très mauvais, et ce d'autant plus que le climat est sec (Gavaud, 1977). La plupart de ces sols, ayant subi des pédogénèses multiples (remaniements mécaniques profonds et des transports latéraux), ont été enrichis en surfaces par des apports éoliens (Rodier, 1969). Ce caractère polygénique des matériaux originaux fait que les sols sont souvent constitués de minéraux résiduels, sans grand intérêt agricole. Ils sont pour la plupart sableux (Rodier, 1969). Des études ont montré que dans les zones semi-arides ouest-africaines certaines différenciations pédologiques sont liées au fonctionnement hydrique (Pedro *et al.*, 1987 in Casenave et Valentin, 1989). D'après ces études les caractères de la surface du sol déterminent la part de l'eau qui s'infiltré et celle qui ruisselle. En se référant à la typologie détaillée des croûtes par Casenave et Valentin (1989), nous présentons sur chaque unité les principaux états de surfaces observés et leur contribution au cycle de l'eau.

Pour étudier la distribution des sols à l'échelle du paysage, il est intéressant de s'appuyer sur la connaissance du relief et de son évolution (Casenave et Valentin, 1989). En effet, la géomorphologie de notre zone d'étude

présente de formes de relief très peu marquées. Le paysage présente trois grandes unités géomorphologiques et est caractérisé par une description de ses composantes édaphiques.

i) **Le domaine cuirassé**, comprend les sommets des plateaux et les talus. Les surfaces des plateaux s'étendent sur les formations géologiques du Continental Terminal. Ses sols à faciès ferrugineux présentent à certains endroits des blocs de cuirasses ferrugineuses provenant du démantèlement sur place de la cuirasse sous-jacente. Et aux endroits où elle n'affleure pas on trouve des lithosols peu évolués avec souvent de fortes charges caillouteuses. Ces cuirasses ferrugineuses sont aujourd'hui couvertes de brousse tigrée. L'unité brousse tigrée est une alternance de bandes nues et de bandes boisées. Cet état de surface est constitué du couple surface nue encroûtée – fourré (Casenave et Valentin, 1989). La zone nue du plateau fortement encroûtée avec une succession de surfaces de types ERO (croûte d'érosion), G (croûte à charge grossière), ST3 (croûte structurale), RUI (croûte de ruissellement) et DEC (croûte de décantation), offre un pédoclimat très sec, tandis que la bande boisée située à l'aval reçoit les eaux de ruissellement de la surface nue qui s'y infiltrent aisément et intégralement du fait d'une porosité ouverte en surface (Casenave et Valentin, 1989). D'après Peugeot (1995), la présence de croûtes peu perméables (croûte d'érosion essentiellement) et qui n'évoluent pas au cours du temps sont à l'origine de la forte aptitude au ruissellement des sols nus des plateaux. Et les bandes végétalisées de la brousse tigrée sont supposées être des zones d'infiltration. La nature cuirassée des plateaux réduit considérablement le travail de perforation par le couvert végétal et participe grandement à l'augmentation des coefficients de ruissellement (Le Breton, 2004). Quant aux talus, ils sont plus ou moins abrupts et forment une zone de transition entre les versants sableux et les sommets des plateaux. Ils sont composés de sols gravillonnaires (de type G) couverts de blocs d'éboulis de tailles hétérométriques. Ces talus sont entaillés dans les grès du Continental Terminal. Sur ces talus le ruissellement est très important. L'érosion est très intense (matériaux arrachés au versant). En général, les zones nues des plateaux jouent un rôle très important dans l'augmentation actuelle des écoulements et surtout des pertes en sols dans les bassins situés en aval.

ii) **Le domaine des formations sableuses éoliennes**. On distingue deux ensembles d'après ce modelé : les piedmonts dégradés et les glacis sableux. Les sols ferrugineux peu lessivés à ensablement sporadique occupent ce paysage. Les piedmonts dégradés se développent sur les longues pentes de raccordement entre le bas des talus et les glacis sableux. Ils sont constitués de matériaux sableux indurés. Il s'agit des glacis encroûtés et dégradés par le ravinement. Les états de surfaces présents sont de types ERO et G à certains endroits. Ces états de surface traduisent l'intensité de la dégradation en relation avec l'érosion hydrique. Le faible taux de couverture végétale et les encroûtements tendent à accentuer le ruissellement (Mougenot et Cailleau, 1995). En ce qui concerne les glacis sableux, ces sols présentent généralement des conditions favorables à l'infiltration, (Casenave et Valentin, 1989). Toutefois, les surfaces de types ST3, ERO, DES (croûte

de dessiccation), et RUI, présentes sur ce domaine peuvent, même en l'absence de surexploitation du milieu, révéler des taches encroutées correspondant soit à d'anciennes termitières arasées, soit à l'action de l'érosion hydro-éolienne (Gavaud 1968 ; Gavaud, 1971 ; Chamard et Courel, 1979 ; Casenave et Valentin, 1989). L'érosion en nappes et en ravines est aussi observée sur les surfaces occupées par les jachères et les cultures. En général la zone sableuse est propice à l'infiltration. Selon Peugeot (1995), certaines pluies peuvent provoquer un ruissellement important sur ce type de sols sableux (parcelle de mil) mais l'aptitude au ruissellement de la surface du mil est plus faible que celle des autres surfaces.

- iii) **Le domaine des bas-fonds ou vallées fossiles**, les sols des vallées et bas-fonds sont fréquemment de texture sableuse fine, localement argileuse ou grossière dans l'axe des cours d'eau fossiles (Favreau, 1996). Ces vallées sèches qui ne connaissent plus d'écoulement continu même en saison des pluies sont constituées de sols peu évolués d'apport alluvial. Ils passent à des sols plus hydromorphes dans les zones inondables fonctionnant comme des cuvettes de décantation, qui sont le siège d'une sédimentation de matériel argileux ou limono-argileux. Du point de vue contribution hydrologique, les bas-fonds constituent les grands axes de drainage des eaux, les eaux de ruissellement s'y écoulent et les nappes phréatiques s'y rechargent (Casenave et Valentin, 1989).

Tout le réseau de ravines naissant dans les bordures des plateaux aboutissent au niveau du kori de Dantiandou, entraînant l'augmentation de la charge sableuse du kori de Dantiandou dans son ensemble (Le Breton, 2004). L'augmentation des apports sédimentaires au niveau des mares engendre un exhaussement du fond de la mare (Le Breton, 2004). Les éléments les plus grossiers (sables) s'accumulent au niveau du cône de déjection, les plus fins (limons) progressent quant à eux jusqu'au centre de la mare. Cela induit une mobilité de la mare par modification du modelé du terrain (Le Breton, 2004).

Dans cette zone, la fraction de la pluie qui ruisselle est généralement très importante (Casenave et Valentin, 1989). Les sols pauvres en matière organique et mal protégés par la végétation peu développée, ont tendance, sous l'effet de ces fortes intensités, à subir des réorganisations superficielles importantes qui limitent l'infiltration (Casenave et Valentin, 1989) et favorisent le ruissellement.

1.2 Les formations végétales et leur évolution

1.2.1 Les formations naturelles

Les formations naturelles du milieu sont celles présentes des plateaux cuirassés aux vallées fossiles. L'étude de ces formations végétales s'appuiera, en effet, sur les ensembles géomorphologiques qui composent le paysage à savoir les plateaux, les versants sableux et les bas-fonds.

Sur les plateaux on observe une végétation forestière de type brousse tigrée qui est une alternance de surfaces nues et de surfaces boisées. La mise en place de tel type de formation végétale contractée est due à la faible rétention en eau des bandes de sols nus cuirassés des plateaux qui sont peu épais et induisent des forts coefficients de ruissellement (Le Breton, 2012) et qui alimentent en conséquence la bande boisée. Cette zone boisée est constituée d'espèces ligneuses dominées par les *Guiera*, et les *Combrétacées*. C'est le seul cas de forêt qu'on peut noter sur la zone d'étude. Malheureusement cette brousse tigrée subit un défrichage, secondairement pour la mise en culture, essentiellement pour l'approvisionnement en bois de feu et de construction en raison de sa proximité des centres urbains. C'est le cas par exemple de la ville de Niamey, où les habitants sont approvisionnés par les fourrés d'une bande de 70-80 km de rayon autour de la ville. Pour Ambouta (1997), cette végétation contractée subit une très forte pression anthropique, faisant craindre à terme sa disparition. En plus de l'action anthropique, notons aussi qu'elle évolue sous l'influence du climat. L'irrégularité de la pluviométrie transforme la brousse (Ambouta, 1997) ; ainsi, en période de déficit, elle dégénère (maigrir) sans jamais disparaître « à moins que les conditions ne deviennent totalement drastiques » (Ambouta, 1997) et durant la période humide, elles s'élargissent (Ambouta, 1997).

En ce qui concerne les versants sableux ou glacis, ils étaient couverts dans les années 1950 par une brousse dense. Cela a été révélé par plusieurs études basées sur l'interprétation des photos aériennes. Cependant, cette « brousse », localement ressemblant à une « savane » quand se distinguaient une strate herbacée et une strate arborée, est remplacée actuellement par une steppe herbeuse ou arbustive, présente surtout dans les jachères et qui est composée de *Cenchrus biflorus*, *Eragrostis tremula* et *Digitaria gayana* ; de *Guiera senegalensis* et *Combretum micranthum*, etc... et la steppe arborée représentée par des parcs à Gao (*Faidherbia albida*) et à acacia très dispersés et discontinus. Dans cette zone, les formations naturelles ont très vite cédé la place aux fonctions de productions agricoles ayant profondément modifié la représentation des formations végétales (Le Breton, 2012).

Les formations végétales présentes dans les bas-fonds constituent des fourrés plus ou moins denses composés de ligneux le plus souvent hydrophiles telles que *Piliostigma reticulatum*, *Acacia nilotica*. On trouve aussi des espèces tels que *Faidherbia albida* mais très dispersés. La strate herbacée est dominée par *Cenchrus biflorus*, *Aristida longiflora*, *Andropogon gayanus*, etc. Toutefois, la couverture de la végétation a évolué de manière considérable tant du point de vue qualitatif que quantitatif en raison du déséquilibre pluviométrique mais aussi des actions de l'homme.

Les formations végétales actuelles qui composent notre zone d'étude sont, bien entendu, le reflet d'un cadre bioclimatique sahélien et aussi d'une exploitation très ancienne par l'Homme (Le Breton, 2012).

1.2.2 Agro-systèmes sahéliens

Les agro-systèmes sahéliens se caractérisent par la coexistence d'activités agricoles et d'élevage sédentaire et pastoral. Au Sahel, les différentes options d'association agriculture -élevage et leurs évolutions au cours des dernières décennies répondent à des situations et à des besoins diversifiés (d'Aquino, 1998).

L'écosystème sahélien en général et nigérien en particulier subit de très fortes modifications humaines. L'agriculture et l'élevage constituent les principales activités des populations des zones semi-arides de l'Afrique de l'Ouest. Selon Djaby (2010), ils occupent plus de 80% de la population sahélienne. Depuis la grande sécheresse des années 70-80, les problèmes climatiques associés à la croissance démographique ont considérablement augmenté la pression sur les terres cultivables, posant ainsi des problèmes de surexploitation et de dégradation des sols (érosion, perte de fertilité). Plusieurs pays du Sahel n'arrivent pas à équilibrer leurs bilans alimentaires. Ils doivent faire face régulièrement à des déficits de leur production agricole (Djaby, 2010). Les conditions climatiques et pluviométriques déterminent largement ces potentialités agricoles (Guengant et Banoin, 2003).

La forte croissance de la population soumet aussi ces systèmes agraires traditionnels à de fortes pressions. Comme nous le savons l'agriculture sahélienne est en grande partie une agriculture de subsistance (Masse 2007).

Au Niger, les activités rurales demeurent la ressource principale de près de 90 % de la population. Les exploitations sont en général de type familial et traditionnel. Cependant l'agriculture est exercée dans des conditions peu favorables caractérisées par un zonage climatique contraignant. Les contraintes géo-climatiques s'aggravent du fait de l'irrégularité pluviométrique, de la pauvreté de la ressource en eau, des moyens de culture rudimentaires, des sols pauvres, des possibilités financières réduites, de la poussée démographique importante qui dans plusieurs régions, appauvrit la terre par réduction ou par suppression des jachères. Ainsi, la baisse du rendement et la forte demande accélèrent la modification du milieu naturel en milieu culturel (agro-systèmes) qui devient un domaine d'action fortement interactif. La pauvreté des sols étant en effet un des problèmes majeurs de cette agriculture, le rôle du bétail dans le recyclage de la matière organique et des éléments minéraux azote, phosphore et potassium peut constituer un atout pour l'augmentation de la production agricole et animale et assurer une sécurité alimentaire durable (Djaby, 2010). En plus de la pauvreté d'origine des sols, plusieurs pratiques participent à cette baisse de matière organique des sols comme la réduction de la durée et la pratique des jachères, le brûlis, et la collecte du bois mort, des pailles et chaumes (Djaby, 2010).

Au Niger, l'élevage constitue une des plus importantes ressources du pays. Une grande partie du pays, notamment la zone comprise entre les isohyètes 300 et 100 mm, est une zone à vocation essentiellement pastorale. Dans cette zone, l'élevage est l'unique ressource des pasteurs peulhs et touaregs. Deux types d'élevage se pratiquent au Niger. L'élevage nomade qui est mené par un groupe de personnes mobiles, sans implantation fixe, et l'élevage des agro-pasteurs, qui sont attachés à des villages ou à des champs. Ainsi, 56

% de cet élevage nomade (RGAC 2005/2008) se fait en interne dans le pays au nord entre les isohyètes 300 et 100 mm. Le reste de la mobilité de l'élevage se fait par transhumance vers le Bénin (2%), le Burkina (3,3%), le Cameroun (0,2%), le Nigeria (34, 9%) le Tchad (1,7%), le Togo (0,4%) et enfin le Mali (1,6%) (RGAC 2005/2008). Pour ce qui est de l'élevage pratiqué par les agro-pasteurs, il joue un grand rôle dans l'exploitation familiale, par son apport de fumier. La production et l'utilisation de fumure sur les champs représentent des transferts de fertilisants de l'aire sylvo-pastorale vers l'aire agricole, (Serpantié, 1986). L'agriculture et l'élevage sont toutefois complémentaires, bien qu'ils soient en perpétuelle compétition du point de vue de l'occupation de l'espace.

Les productions agropastorales nigériennes sont confrontées à un certain nombre de contraintes telles que la rareté des terres disponibles, la faiblesse des parcours techniques et l'irrégularité et l'insuffisance des pluies (Guengant et Banoin 2003). Au lendemain des sécheresses des années 70 et 80, le potentiel productif nigérien était complètement affaibli par la mort d'une grande partie du cheptel et la disparition d'une grande proportion des arbres. Prenant conscience de ce phénomène et devant la nécessité d'agir pour survivre, tous les acteurs (autorités, techniciens, paysans) se sont mis ensemble en vue de trouver des solutions alternatives pouvant servir de tremplin pour renverser la tendance. Des stratégies alternatives ont été adoptées parmi lesquelles la protection de la régénération naturelle soit à travers le défrichement amélioré, soit à travers le repérage, l'entretien et la protection de la régénération naturelle. La sensibilisation prônée par les agents de vulgarisation a bien réussi dans certains secteurs de la partie sud du Niger, comme la Maggia, la région de Keita, celle d'Aguié, etc (Larwanou *et al*, 2006).

1.2.3 Impacts des sécheresses

Les formations végétales et leur évolution sont sans aucun doute liées à la variable pluviométrie. Cette région est caractérisée par une irrégularité interannuelle des précipitations. Une des conséquences de cette forte irrégularité interannuelle est l'apparition fortuite de périodes de sécheresse dont les effets sont catastrophiques dans la zone sahélienne (Casenave et Valentin, 1989).

Ces effets de la sécheresse sur le couvert végétal ont été extrêmement graves. De nombreuses études régionales ont tenté de mesurer la dégradation du milieu en comparant des couvertures aériennes à deux époques séparées par la période de sécheresse (Bernus *et al*, 1984).

Les effets désastreux occasionnés par la sécheresse qui a affecté le Sahel depuis 1968 avec deux périodes de crises en 1972-1973 et 1982-1984 ont provoqué des changements tels que la baisse de la fertilité des sols, la baisse de la production végétale et la réduction des couvertures boisées et herbacées.

L'une des conséquences est aussi la disparition des espèces pérennes au profit des annuelles. Déjà peu abondantes avant la période de sécheresse, les herbacées pérennes qui se localisent dans les dépressions ont presque toutes disparu (Casenave et Valentin, 1989).

Cette région était considérée comme assez fournie en formations végétales jusqu'aux dernières sécheresses (1972/84) qui ont vu disparaître certaines des espèces végétales. Après la sécheresse de 1972-73, on a constaté des modifications quantitatives et qualitatives des espèces végétales. Les arbres des parties basses et en particulier ceux qui possèdent un enracinement en profondeur (*Balanites aegyptiaca*) ont peu souffert. Ainsi les herbes annuelles résistantes à cycle court (*Cenchrus biflorus*, *Tribulus terrestris*) se sont répandues aux dépens d'autres espèces pérennes telles *Schoeijefelrlia gracilis* ou *Aristida mutabilis*. Le broutage excessif autour des mares temporaires ou des forages a provoqué également une transformation du couvert végétal (Bernus *et al*, 1984).

La sécheresse a eu des impacts considérables sur les formations ligneuses avec la mortalité de nombreux arbres et arbustes. Elle a entraîné aussi une pression croissante sur le milieu et une diminution de la production fourragère. Ce phénomène est caractéristique d'une forte dégradation de la végétation.

L'influence de la sécheresse (surtout les épisodes très secs de 1972-73 et 1983-84) sur le couvert végétal a fait l'objet de plusieurs études à travers l'analyse des photographies aériennes. Les résultats qui en découlent sont généralement similaires, on assiste d'une part, à une diminution importante des zones boisées et de la végétation en général et, d'autre part, à une augmentation remarquable des sols dégradés (Hountondji *et al* 2004). Un reverdissement général du Sahel est pourtant observé par une majorité d'experts, mais il est attribué à une progression des annuelles et des herbacées et graminées et n'est pas incompatible avec la dégradation de la strate ligneuse.

Cependant l'effet du climat sur la végétation est très complexe, et il faut aussi par ailleurs prendre en compte l'action de l'homme (Bernus *et al*, 1984).

1.3 L'évolution démographique depuis les années 1950

1.3.1 Le Niger

Avant l'indépendance du Niger, aucune étude scientifique d'envergure nationale de la population n'avait été réalisée. Les informations démographiques disponibles provenaient essentiellement des recensements administratifs et de l'état civil. Il est fort probable que ces données fournies par ces deux principales sources étaient incomplètes et peu fiables.

D'après les estimations à partir de ces recensements administratifs (1905 - 1955), l'effectif de la population du Niger était à 2 300 000 d'habitants en 1950.

Cependant, au lendemain des indépendances, deux enquêtes démographiques ont été réalisées l'une en zone sédentaire (1960) et l'autre en zone pastorale (1963 -1964). Et elles ont été pendant longtemps la base d'estimations des paramètres démographiques du Niger.

En 1977, le Niger réalisa son premier recensement général de la population et faisait état de 5,1 millions d'habitants. L'effectif de la population nigérienne est donc passé de 3 200 000 en 1960 à 5,1 millions en

1977 et à plus de 7 millions en 1988 qui était l'année du second recensement général de la population. On retiendra de ces enquêtes que l'une des principales caractéristiques de la population nigérienne est sa croissance rapide.

Et selon les résultats définitifs du troisième recensement général de la population et de l'habitat en 2001, le Niger comptait 11 060 291 d'habitants. Ainsi entre 1988 et 2001 la population a augmenté en moyenne de 3,3% par an, ce qui constitue l'un des taux les plus élevés du monde. Le taux d'accroissement annuel du Niger était de 2,7% entre 1960 -1977, puis il est passé à 3,3% de 1978 à 1989. En 1990, il a augmenté de 3,1% jusqu'en 2000 avant d'atteindre son taux de 3,3% en 2001 et ce jusqu'à aujourd'hui (2010). Le recensement de 2001 a compté environ 10 millions d'habitants et des estimations donnaient une population de 13 millions en 2007 et 16 millions en 2012.

Selon les projections de l'institut national de la statistique la population du Niger s'élevait à 15 203 822 d'habitants en 2010. L'évolution de la population nigérienne a été très spectaculaire durant ces cinquante dernières années. Le Niger a vu par ailleurs son taux de fécondité repasser récemment au-dessous de 8 après être passé de 7,5 en 1990 à 8,2 au recensement de 2001 ; enfin, le taux de mortalité infantile (260 pour mille en 2001) et d'analphabétisme (près de 80% de la population en 2001) sont parmi les plus élevés du monde également.

1.3.2 Région de Dantiandou

La commune de Dantiandou se trouve dans le département de Kollo qui est lui-même inclus dans la région de Tillabéri. C'est une région qui est située à l'ouest du Niger. Selon la Projection de l'institut national de la statistique (RGPH, 2010), la population de la région de Tillabéri est estimée à 2.500.454 habitants avec une superficie de 97.251 km². La région est administrativement divisée en six départements dont celui de Kollo. Elle comprend également 39 communes rurales et 6 communes urbaines avec 31 cantons, et 8 groupements nomades.

En effet, avant le premier recensement général de la population de 1977, les estimations de l'effectif de la population issues des recensements administratifs ne donnaient pas les effectifs de la population par département ni par arrondissement. Donc le résultat donné concernait l'effectif de la population nationale.

Alors, à partir du RGPH de 1977, les résultats de recensement de la population étaient donnés également par région et par département. Mais on ne disposait pas encore de données au niveau des communes encore moins des villages. En 1977 on connaît seulement l'effectif de la population du département de Kollo. Il était de 131 145 avec une densité de 13,1 habitants/km². Il a fallu attendre le Recensement de 1988 (RGPH, 1988) pour pouvoir disposer des données sur l'effectif de la population de la commune de Dantiandou qui en ce temps était l'ancien canton du Fakara, ils avaient les mêmes limites administratives. Il comptait 37 localités (villages), et sa population totale s'élevait à 18 661 habitants. Le troisième RGPH de 2001 donnait 52

localités à la commune de Dantiandou avec 37 villages, 12 hameaux et 3 campements. La population totale de la commune s'élevait à 24 948 habitants. Et à partir de ce recensement de 2001 des projections ont été effectuées pour les années à venir. C'est ainsi qu'en 2007 la commune a atteint une population de 31 946 habitants, et est passée à 32 891 habitants en 2008, puis 33 853 en 2009 et enfin en 2010 l'effectif de la population de Dantiandou était estimé à 34 832 habitants. Selon le plan de développement communal (PDC, 2009), la commune de Dantiandou a une densité moyenne de 37 habitants au km² et un taux d'accroissement de 3,6%. Soit un taux supérieur de 0,3% à celui du taux national. Toutefois, on constate que la densité de 37 hbts/km² est une moyenne, et que les taux sont plus importants le long de la vallée du Dallol Bosso que sur les plateaux et collines où la densité est inférieure à cette valeur.

Quand on analyse les données de la population, on constate qu'entre 1988 et 2001 les effectifs de la population de Dantiandou ont augmenté et ce jusqu'en 2010. Ce qui pourrait poser un problème en ce qui concerne la demande en besoins et les ressources disponibles dans la commune.

La population de Dantiandou est répartie en trois groupes socio-linguistiques, dont l'un englobe près de 98% (zarma) de l'effectif de la population. Les 2% restant sont composés par les Peuls et les Touaregs qui sont des pasteurs.

1.3.3 Impacts des activités anthropiques sur le milieu

Les principales activités pratiquées par la population dans cette région sont l'agriculture, l'élevage et le prélèvement de bois. L'agriculture reste cependant l'activité la plus pratiquée en mobilisant presque toute la population. Cette agriculture souffre de son extension et de la pauvreté des sols. Les ressources naturelles sont en effet menacées par l'action de l'homme qui modifie le paysage et à cela s'ajoute la grande variabilité de la pluviométrie. Ces déficits pluviométriques (sécheresse) ont provoqué une diminution des teneurs en matière organique sous l'effet de la réduction du couvert végétal, mais aussi de l'activité biologique des sols. Ainsi, face à la diminution des rendements, les paysans tendent à accroître les surfaces cultivées, ce qui revient, très souvent, à réduire la durée des jachères, de plus la culture prolongée entraîne elle aussi une diminution sensible des teneurs en matière organique (Casenave et Valentin, 1992).

L'augmentation démographique très rapide pousse aussi les agriculteurs à modifier leurs pratiques culturales. Une des réponses adoptées face à la faiblesse des rendements est l'extension des cultures (Albergel et Valentin, 1988). Cela a exposé les sols à l'agressivité des pluies, causant une intense érosion et une baisse de la fertilité des sols, et augmentant par conséquent le risque de désertification.

Ainsi, les surfaces très érodées que l'on peut considérer comme impropres à la culture ont été à peu près multipliées par vingt entre 1956 à 1980 (Albergel et Valentin, 1988). D'une manière générale, le système de production agricole pratiqué dans la zone d'étude influence fortement les occupations du sol. En plus de

cela, l'augmentation de la pression sur les ressources naturelles est très forte du fait de sa proximité de la ville de Niamey. Mais aussi d'autres centres urbains de la région.

Selon Ozer *et al* (2010), la population sahélienne a plus que triplé durant la deuxième moitié du 20^e siècle et les prévisions pour 2050 avancent un facteur de croissance de l'ordre de 10. Les taux de croissance urbaine sont encore plus impressionnants et entraînent chaque jour d'importants bouleversements environnementaux. Une telle pression anthropique engendre un déboisement incontrôlé pour satisfaire les besoins en énergie des populations, la demande en bois d'œuvre et l'expansion agricole.

Au Niger, l'approvisionnement en bois-énergie est un secteur économique très développé et se traduit par des emplois en milieu rural (bûcherons, transporteurs) avec un chiffre d'affaires annuel de 2 à 3 milliards de francs CFA pour la seule ville de Niamey (Mahamane et Montagne, 1997). Cette activité provoque une exploitation anarchique croissante menaçant le potentiel de production (Mahamane et Montagne, 1997). En effet, la forte croissance de la demande en bois dans la ville de Niamey, est due en partie à l'accroissement démographique. Cette population est fortement dépendante du bois-énergie pour se nourrir. L'utilisation des ressources ligneuses à des énergétiques concerne plus de 98% des ménages pour les besoins culinaires (Mahamane et Montagne, 1997).

Une des conséquences de cette demande en bois-énergie, (en bois et charbon de bois), est la création des auréoles de déboisement autour des villes et le long des axes routiers reliant les agglomérations (Ozer *et al*, 2010).

Cette zone fait aussi l'objet de pâturages extensifs, de parcours (Ozer *et al*, 2010). Le surpâturage est une des conséquences directes de la croissance démographique; on note une augmentation du cheptel dans toute la région. Ce développement du cheptel est lié à l'espérance des exploitants d'augmenter leurs revenus (Ozer *et al*, 2010).

1.4 Un environnement en mutation rapide

L'environnement de notre zone d'étude varie de manière très rapide. Les causes de ces transformations sont la variabilité spatiale et temporelle des précipitations, les pratiques culturelles, et surtout les sols à cause de leur pauvreté qui entraîne très vite leur dégradation. La diminution des pluies en Afrique de l'Ouest depuis 35 ans s'est surtout accompagnée d'une évolution de l'environnement, fragilisant un milieu à pression anthropique croissante (Mahé et L'Hôte, 2004).

La grande variabilité spatiale de la pluviométrie sur de courtes distances est l'une des caractéristiques remarquables dans cette région (Esteves et Lenoir, 1994). Peugeot *et al* 1997, ont démontré qu'au moment de l'évènement une forte variabilité spatiale de la pluviométrie est observée particulièrement pour les averses les plus abondantes, et des différences de plus de 25% ont été enregistrées d'une station de mesure à une

autre, par exemple 56,2 mm sur le sol nu de plateau à 40,2 mm sur la jachère dans le même petit bassin, à quelques centaines de mètres l'un de l'autre. Toutefois, la distribution temporelle des averses varie selon les saisons.

Si la hauteur de la pluie annuelle constitue un indicateur important de sécheresse, c'est davantage la fréquence des pluies de forte intensité qui détermine la gravité de l'érosion hydrique (Valentin, 1994). Or nous savons que l'état hydrique de la surface du sol avant les pluies conditionne sa résistance à la désagrégation. (Valentin, 1994). L'humectation rapide de sols secs provoque la compression de l'air dans les pores fermés et l'éclatement des agrégats (Valentin, 1994).

Pourquoi ces milieux changent-ils de façon spectaculaire? Parce que l'infiltration à l'échelle locale est contrôlée par les organisations pelliculaires superficielles et leur organisation en surfaces élémentaires (Esteves et Lapetite., 2003, Casenave et Valentin 1989).

Plusieurs mécanismes interviennent dans la modification du milieu, notamment dans le type d'organisation superficielle des sols. Selon Valentin (1994), le ruissellement et le vent ne peuvent pas directement entraîner les agrégats de terres, ils doivent, au préalable, être fractionnés en micro-agrégats ou en particules élémentaires (sable, limon, argile), avant d'être entraînés par le vent ou le ruissellement pour former des croûtes superficielles. La formation des croûtes obéit ainsi à des processus variés, qui peuvent se produire simultanément ou pas. Sous l'action de la pluie ou du vent, la structure de l'horizon superficiel du sol se modifie, les gouttes de pluie, par leur énergie cinétique, provoquent le fractionnement des agrégats et la dispersion de la phase argileuse. Ces pellicules détachées peuvent ensuite être déplacées par projection et rejaillissement de fines gouttelettes (effet « splash ») (Peugeot, 1995 ; Casenave et Valentin, 1989).

En milieu sahélien la déforestation, le défrichage, puis la mise en cultures, entraînent une augmentation de la susceptibilité des sols au ruissellement de surface, surtout en début de saison des pluies quand le sol est à nu et fraîchement labouré (Mahé, 2006). En général, le défrichage s'accompagne nécessairement d'un déséquilibre par augmentation des pertes, la minéralisation brutale des réserves et d'une diminution des apports biologiques (Roose 1983). Lorsque le défrichage est de type traditionnel (ce qui est le cas dans cette région), au début la dégradation du sol est limitée, elle devient progressive et ne se manifeste qu'au bout de 3 à 5 ans (Roose 1983).

Les travaux de Casenave et Valentin, (1989), ont démontré que c'est surtout la réduction du couvert végétal qui constitue le point de départ de cette mutation. En effet, la diminution de la couverture biologique expose les sols aux agents de dégradation que sont l'intensité de la pluie, le ruissellement et le vent (Hien *et al.*, 1996). Et cause ainsi une extension des croûtes superficielles. La principale conséquence du développement des organisations pelliculaires superficielles est donc la diminution très importante de la conductivité hydraulique des horizons de surface. Ce mécanisme a montré que des sols sableux, présentant avant dégradation des conductivités hydrauliques élevées, peuvent être à l'origine de ruissellements considérables (Esteves et Lapetite, 2003).

Les résultats d'Esteves et Lapetite. (2003), obtenus sur la zone d'étude pour deux parcelles situées côte à côte sur le même sol avec des pentes voisines, mais présentant des états de surfaces différents, l'une située sur une jachère herbeuse et la seconde sur un sol nu encroûté ont révélé le rôle prépondérant de l'état de surface dans l'augmentation des ruissellements. Des observations sur les champs cultivés ont montré que pour les petites averses, les zones de pentes nues localisées à proximité des ravines sont des surfaces contributives (Esteves et Lapetite, 2003), cependant les sols sableux des ravines possèdent une forte capacité d'infiltration.

Pour les surfaces cultivées à l'échelle du bassin versant, la variété de la topographie, des types de sols, des surfaces encroûtées ou végétalisées entraînent des processus additionnels tels que le stockage de l'eau dans des micro-reliefs ou l'infiltration dans des surfaces plus perméables (Esteves et Lapetite, 2003). De telles surfaces contribuent à absorber les flux de ruissellement avec un effet particulier surtout quand elles sont localisées à l'aval des zones potentielles de ruissellement élevé (Esteves et Lapetite, 2003).

Pour Esteves et Lapetite (2003), il existe une grande variabilité temporelle dans les réponses de la surface aux précipitations, même à l'échelle du m². Le travail du sol et la pluie modifient les propriétés géométriques et hydrodynamiques des sols agricoles. Ces modifications affectent la redistribution de l'eau de pluie pendant les averses. Après chaque travail du sol (labour, sarclage), une partie de la surface du sol retrouve une infiltrabilité importante. Celle-ci se réduit ensuite petit à petit sous l'effet des impacts de gouttes de la pluie et la redistribution des particules de sol par le ruissellement (Esteves et Lapetite, 2003). Et aussi en fonction de l'orientation du travail du sol par rapport à la pente topographique, les directions de l'écoulement de l'eau s'en trouvent modifiées. En effet si le sens du travail du sol n'est pas celui de la pente générale, le ruissellement va d'abord être canalisé par les sillons et s'écouler dans une direction différente de la grande pente topographique jusqu'à rencontrer un drain ou provoquer une rupture par débordement (Esteves et Lapetite, 2003).

On voit bien que les effets d'échelles sur le ruissellement, associés à la variabilité spatiale des propriétés des sols, sont des problèmes bien connus et sur lesquels sont fondées de nombreuses études (citées par Esteves et Lapetite, 2003). Selon ces auteurs, plusieurs études ont montré que les dynamiques temporelles de l'excès de l'infiltration et de l'écoulement terrestre peuvent avoir un impact important sur les effets d'échelle.

1.5 Objectifs et verrous scientifiques et techniques

On cherchera surtout à mettre en relation l'occupation du sol, l'évolution démographique et les paramètres liés aux processus hydriques.

Les objectifs spécifiques de cette thèse consisteront à :

- Faire une analyse des disparités spatiales de l'occupation du sol et sa dynamique depuis les années 1950 jusqu'en 2010.

- Mettre en relation leurs liens avec les sécheresses les plus marquées, la croissance démographique et les périodes les plus remarquables de dégradation de la végétation et des sols
- Enfin, d'apporter des éléments de réponse aux hypothèses liant les changements d'usage des sols de cette région à l'évolution des écoulements.

Pour réaliser cette étude une cartographie des occupations des sols doit se faire à différentes échelles spatiales et temporelles. Permettant l'évaluation et le suivi de la dynamique des occupations des sols. Il s'agit pour nous de montrer à travers l'analyse diachronique du milieu, les effets de la pression humaine sur les occupations des sols. Et aussi la part de la variabilité climatique sur la baisse de la productivité poussant la population à étendre les terres de cultures à travers le défrichement et la réduction du temps de jachère. Et enfin, les conséquences qu'ils induisent du point de vue de l'augmentation des coefficients des ruissellements et des formes d'érosion. Pour cela nous utiliserons des données multi-sources issues de photographies aériennes, des images Corona (satellites militaires américains des années 1960, leurs données ont été déclassifiées et rendues publiques il y a quelques années) ainsi que d'autres images satellitaires.

Ce travail a aussi pour but de présenter une méthodologie rationnelle permettant l'élaboration d'une cartographie de l'occupation des sols applicable au Sahel dans le traitement diachronique des occupations des sols.

Pour arriver à nos fins, deux principaux verrous seront à lever :

- l'un est purement scientifique et est fondé sur un faisceau de données, nombreuses (trop ?) et parfois contradictoires au sujet de l'évolution de la couverture végétale au Sahel. Le grand public et les scientifiques sont peut être atteints d'une trop grande croyance dans des truismes dont les medias mais aussi parfois les parutions scientifiques se repaissent : la désertification serait inéluctable et en particulier en Afrique, les agro-systèmes se dégraderaient tellement vite que la production agricole ne pourrait que diminuer, l'érosion augmentant du fait de la mise à nu de surfaces de plus en plus étendues ; or depuis une quinzaine d'années, la plupart des études fondées sur la télédétection font état d'un reverdissement, le fameux « re-greening » du Sahel, un regain de végétation attesté par la croissance quasi générale de l'indice de la différence normalisée de la végétation (le NDVI) fourni par les produits satellitaires. Qu'en est-il vraiment, et l'utilisation d'indices de végétation est-elle bien la méthode à employer pour arriver à nos fins?
- le deuxième verrou est lui bien plus technique: une telle quantité de produits s'offrent à nous de nos jours pour caractériser l'utilisation des terres que l'on peut être tentée d'utiliser de nombreux produits différents ; or cette utilisation conjointe oblige à de nombreuses manipulations techniques, visant à rendre géométriquement ou radiométriquement compatibles des produits d'origine diverse; on en arrive à passer plus de temps à tenter de rendre cohérente l'utilisation de deux produits très différents, qu'à faire l'analyse comparative qu'on se promettait de faire à l'origine.

D'autres verrous apparaîtront peut être dans notre cheminement mais de prime abord, on peut déjà noter que notre parcours sera semé d'au moins une embûche scientifique et un obstacle plus technique.

CHAPITRE 2 : Impacts des modifications environnementales sur le cycle de l'eau

2.1 État de l'art

Depuis le début des années 50, les hydrologues de L'ORSTOM ont étudié plusieurs petits bassins représentatifs du Sahel (Dubreuil *et al.*, 1972; Casenave et Valentin, 1992 ; Albergel, 1987 ; Nouvelot, 1993). Le but principal de ces études était de mettre en relation les paramètres caractéristiques de l'écoulement et du ruissellement, particulièrement ceux des crues décennales (volume, débit maximal, forme de l'hydrogramme), et ceux représentatifs du milieu et de la physiographie des bassins (surface, forme et pente, nature des sols, de la végétation ou de la lithologie, caractéristiques du climat etc. . . .) (Casenave et Valentin, 1992).

C'est au cours de ces expériences que de nombreux auteurs, tels que Vuillaume (1968), Roose (1974 et 1983), Albergel (1987), Collinet (1988), Casenave et Valentin (1989 et 1992), ont observé un accroissement important des ruissellements, lié aux pertes rapides d'infiltrabilité dues essentiellement au colmatage de surfaces initialement poreuses.

Ces études ont montré qu'il y a très peu de lien entre le ruissellement et le total de la pluviométrie annuelle. C'est surtout l'influence de la sécheresse (retard de la pluviométrie) qui a été mise en évidence parce qu'elle entraîne le retard de la protection des sols par la couverture végétale (Roose, 1974). Or la dénudation des sols joue un rôle très important dans l'érosion hydrique et éolienne.

Le ruissellement peut donc être très considérable dans cette région où les sols, pourtant très pauvres en limons et sables fins, sont facilement glacés en surface par le rejaillissement de l'eau sur les surfaces nues (« splash ») lorsque la végétation disparaît (Roose, 1974).

Ces modifications au niveau de la parcelle et du bassin versant expérimental ont fini par avoir des conséquences au niveau des grands bassins. Les études hydrologiques menées depuis une vingtaine d'années en Afrique de l'Ouest ont montré que les coefficients d'écoulement ont fortement augmenté sur certains hydro-systèmes du Sahel, en dépit d'une diminution marquée de la pluviométrie régionale (Diello *et al.*, 2006).

Amani et Nguetora (2002) ont remarqué qu'à Niamey le niveau de la crue locale a dépassé le niveau de la crue guinéenne 4 fois depuis 1984, alors que cela ne s'était jamais produit depuis le début des observations en 1923. Ceci a été attribué à l'augmentation des écoulements des affluents de rive droite du fleuve Niger, venant du Burkina-Faso (Mahé *et al.* 2003). Mahé *et al.* (2002) montrèrent également que les écoulements augmentaient malgré la diminution des pluies observées depuis 1970 sur le bassin de Nakambé au Burkina Faso. Et pour le bassin de la Sirba et ceux situés plus au nord, les chercheurs de la même équipe ont

déterminé que les coefficients d'écoulement augmentaient à partir de 1972 (Mahé *et al.*, 2003). Toutefois, ils montrèrent qu'à partir du Goroubi, les écoulements diminuaient vers le sud, sauf pour la Tapoa où ils augmentaient légèrement.

D'une manière générale, on constate que la baisse de la pluviométrie à la fin des années 1960 a eu un impact considérable sur l'augmentation des ruissellements. En effet, les premières observations en ce qui concerne les changements des coefficients d'écoulements ont été faits durant cette période.

Par contre plus au sud en zone soudanienne, une baisse des débits, plus attendue, est observée avec la baisse de la pluviométrie. Cela a été expliqué par l'abondance des réservoirs dans ces zones plus humides, réservoirs dont la vidange progressive a accentué la baisse de la ressource globale (Descroix *et al.*, 2009).

Amogu (2009) puis Amogu *et al.* (2010), ont confirmé la hausse des débits des affluents de rive droite du Niger ainsi que du Nakambé (Figure 9); ils ont également dessiné une répartition régionale de ces évolutions que nous évoquerons à la fin de ce mémoire (chapitre 8).

On appelle cette situation paradoxale le « paradoxe hydrologique du Sahel » (Peugeot, 2003 ; Descroix *et al.*, 2009).

Par contre, on observe une diminution des débits des affluents de la rive droite du fleuve Niger en zone soudanienne, ainsi que de l'Ouémé au Bénin comme le montre la figure 10 ci-dessous.

Alors qu'un accroissement des écoulements est observé dans les bassins sahéliens exoréiques affluents du fleuve Niger, dans les secteurs endoréiques sahéliens, c'est la remontée du niveau des nappes phréatiques qui a été démontré (Desconnets *et al.*, 1997 ; Leduc *et al.*, 2001 ; Favreau *et al.*, 2002) (cf. § 2.2).

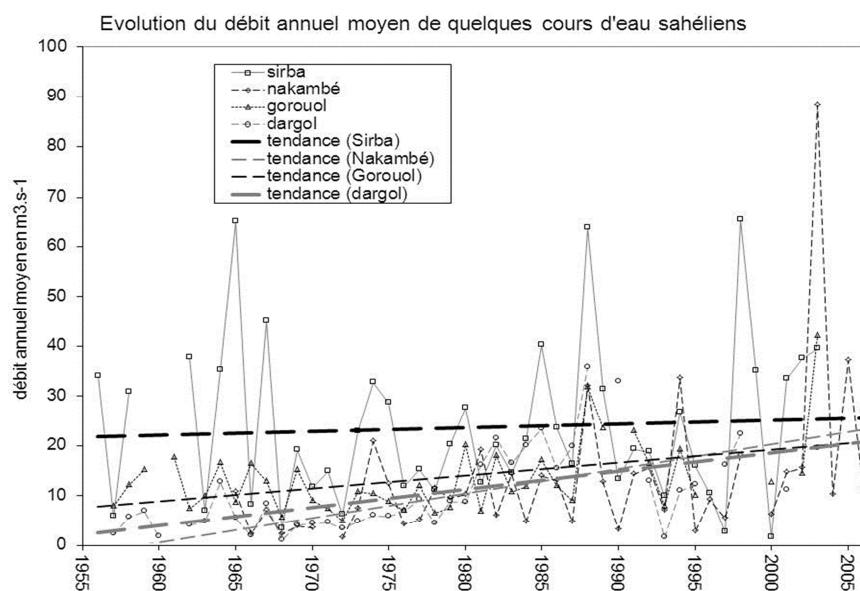


Figure 9. augmentation des débits des cours d'eau sahéliens (d'après Amogu *et al.*, 2010)

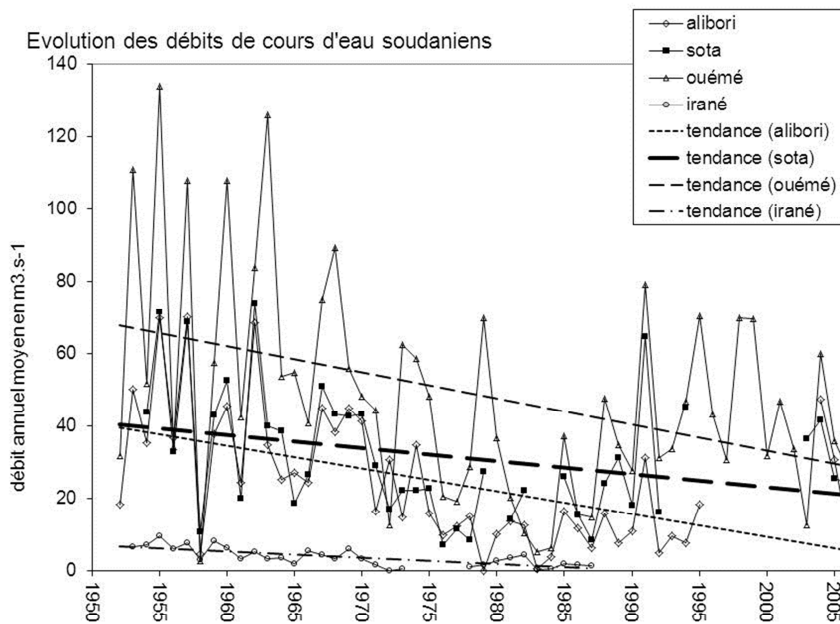


Figure 10. Diminution des débits annuels des cours d'eau soudaniens (Amogu *et al*, 2010).

Par contre, dans le reste de l'Afrique de l'Ouest soudano sahélienne, on observe une baisse de la nappe : plus de ruissellement donc moins d'infiltration, cela conduit à un appauvrissement des réserves en eau des interfluves. Par ailleurs dans les zones de climat soudanien, les réservoirs naturels du sol se sont peu à peu vidés depuis le début de la sécheresse, en alimentant d'abord l'écoulement de base, puis en se rétrécissant au fur et à mesure de la diminution de l'alimentation par infiltration.

On constate donc qu'il y a de plus en plus de ruissellement en zone sahélienne, ce qui se traduit par une augmentation des écoulements en zone exoréique, et par une remontée de la nappe dans les zones endoréiques.

Or, comme on l'a évoqué, on a connu durant toute cette période un déficit pluviométrique très marqué, et aucune tendance dans l'évolution des caractéristiques des précipitations ne peut expliquer un accroissement des ruissellements. Ali et Lebel (2009) ont démontré que la sécheresse est réelle et continue au Sahel. En comparant les résultats de la période 1950 à 1969 et ceux de 1970 à 1989, ils ont observé une diminution remarquable de la pluviométrie annuelle cumulative d'environ 36% et du nombre des jours pluvieux d'environ 30%. Ils ont également mis en évidence la très forte variabilité interannuelle des années actuelles par rapport aux 40 années précédentes où la pluviométrie est caractérisée principalement par des modifications abruptes d'une phase humide à une phase sèche sur tout le Sahel.

Pour Mahé et Paturel (2009), les pluies ont certes augmenté au Sahel depuis la fin des années 1990, mais leur moyenne annuelle demeure nettement plus basse que durant la période humide des années 1950 et 1960. D'après Nicholson (2005), il est clair qu'il y a une certaine récupération par rapport aux conditions de sécheresse qui prévalaient pendant les 30 années 1968 -1997. Mais les changements étaient évidents dans le cycle saisonnier, avec la diminution importante de la pluviométrie du mois d'août (qui est généralement le mois le plus humide durant la saison) dans les années actuelles. Ceci est corroboré par Lebel et Ali (2009). Le déficit pluviométrique est resté inchangé dans l'ouest du Sahel, en effet la moyenne pour la période 1990 - 2007 est égale à celle de la période 1970 -1989, étant bien plus faible que la moyenne de la période 1950-1969 (Lebel et Ali, 2009). Par contre le Sahel central a enregistré progressivement des années plus humides à la fin de la décennie 1990, mais ce rétablissement est limité puisque la moyenne pluviométrique de 1990 à 2007 est seulement supérieure de 10% par rapport à la moyenne de 1970 à 1989, et qu'elle reste toujours plus faible que la moyenne de la période humide à savoir 1950 -1969 (Lebel et Ali, 2009). Sur la figure 11 ci-dessous, on peut remarquer que la variabilité interannuelle montre des tendances décennales: on constate que la période 1950-1969 est nettement plus humide par rapport aux deux autres périodes 1970-1989 et 1990-2007. Et pour la période dite de récupération (1990 -2007), on observe qu'elle n'a reçu que quatre années humides (1994, 1999, 2003 et 2007) sur 17 ans, donc c'est une période relativement peu humide. Surtout, cette période depuis 1990 se caractérise par une très forte variabilité interannuelle.

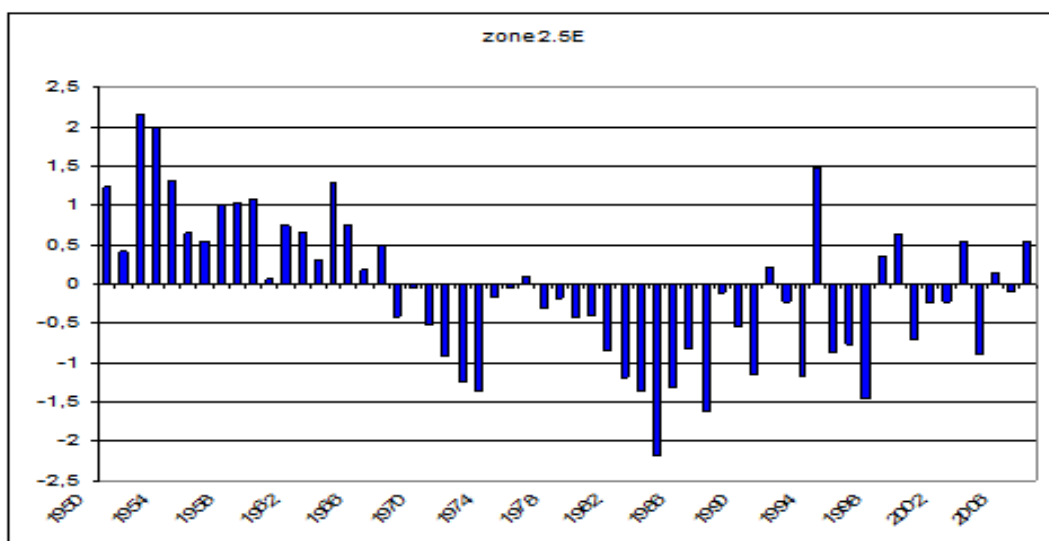


Figure 11. Evolution de la pluviométrie dans la partie centrale du Sahel (10° W à 10 ° E) d'après Lebel et Ali, (2009)

Lebel et Ali (2009) ont aussi révélé des différences remarquables entre le cycle saisonnier de la période humide 1950-1969 et celui de la période récente 1990-2007. Pour la période 1950-1969, ils ont observé une augmentation progressive de la pluviométrie décennale de début avril à la fin du mois de mai, le « saut de

mousson » durant les 10 derniers jours de juin après un « plateau » puis une nouvelle augmentation des précipitations décadaires qui atteignent leur maximum de 70 mm à la fin du mois d'août, après un léger repli début août. Ces traits sont maintenus durant la période récente 1990-2007 mais le maximum de fin août se produit maintenant début août, le repli fin juillet au lieu de début août.

Concernant la répartition des pluies dans la saison, des travaux récents et en cours (Descroix et al., 2011a ; Descroix *et al.*, 2012b) montrent que l'évolution de la pluie peut difficilement expliquer l'augmentation des ruissellements et des débits. Les deux figures 12 et 13 permettent de décortiquer l'évolution, qui a été faible. En particulier, on ne note aucune augmentation des pluies en début de mousson qui pourrait expliquer l'avancée des crues, de plus en plus précoces (figure 12). De même que si on considère le nombre d'évènements pluvieux à forts cumuls, celui-ci n'augmente pas non plus (figure 13). On constate également que sa répartition dans le temps et dans la forme n'a pas changé de manière drastique. Comme l'ont dit Lebel et Ali, (2009), la principale source des déficits pluviométriques durant la période de la sécheresse marquée (1968-1995) est la plus faible occurrence des jours pluvieux, et non pas le montant de pluie tombé à chaque évènement.

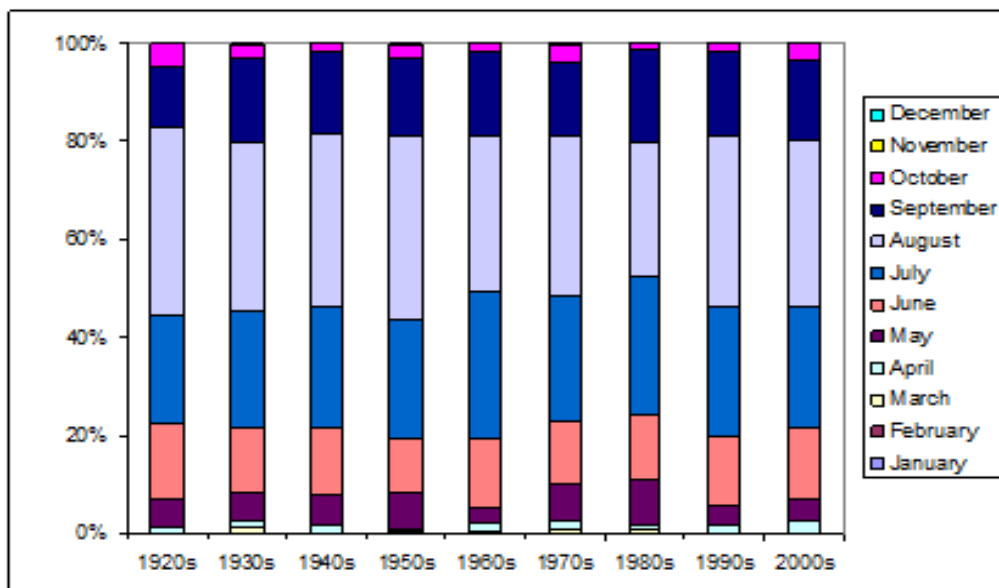


Figure 12. Evolution par décennies de la répartition des pluies par mois durant la mousson (Descroix et al, 2011a)

Donc ni l'évolution de la répartition mensuelle des pluies, ni l'évolution des évènements à forts cumuls ne peuvent expliquer l'augmentation des ruissellements, donc cela est dû à un autre facteur qui pourrait être le changement d'usage des sols. Donc on suppose que l'accroissement des eaux de surface (cours d'eau en zone exoréique et mares en zone endoréique) est dû à la modification des occupations des sols et des états de surface associés.

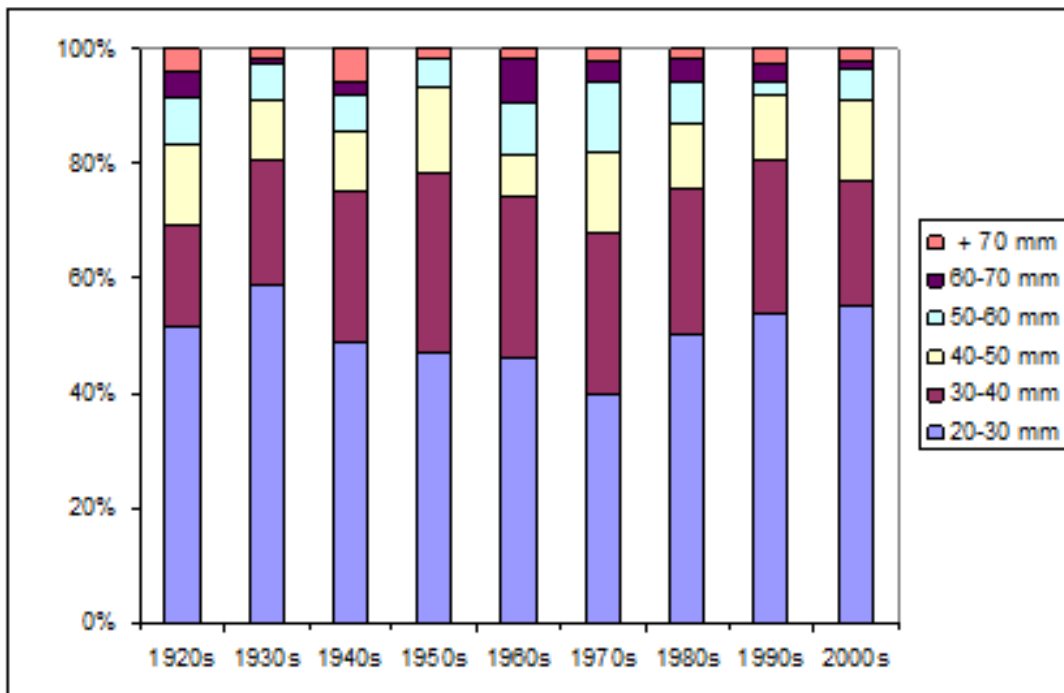


Figure 13. Evolution par décennie de la proportion des évènements pluvieux supérieurs à 20 mm cumulés (Descroix et al, 2011a)

Comme cela a d'ailleurs été montré par Albergel et Valentin, (1988) c'est le changement d'usage des sols qui était à l'origine de cette augmentation des écoulements; on observe moins de pluie, mais un coefficient d'écoulement fortement accru.

Cette augmentation des débits a été aussi reliée à l'augmentation des surfaces des sols cultivés et des sols nus aux dépens des surfaces en végétation naturelle sur le bassin depuis 30 ans (Mahé *et al.* 2003). Ceci entre en contradiction avec les mesures qui montrent que les terrains cultivés sont ceux où l'infiltration se fait le mieux du fait du travail du sol et du système racinaire des cultures. Mais Ambouta (1994) et D'Herbès et Valentin (1996) ont montré que l'accélération des rotations cultures/jachères provoquait une fatigue des sols qui elle-même entraînait une diminution de la capacité d'infiltration des sols et leur encroûtement, bien décrit par Casenave et Valentin (1989).

Certains auteurs ont ainsi montré la relation directe entre l'augmentation des surfaces cultivées (Guengant et Banoin, 2003, au Niger) et des sols nus et l'augmentation des écoulements (Amogu *et al.*, 2010). L'impact des activités humaines sur l'environnement Sahélien accélère les changements d'occupations des sols. La population a besoin de défricher pour augmenter les surfaces de production agricole, ce qui produit d'autres conséquences négatives sur la relation sol-végétation et rend les couches supérieures des sols très sensibles à la pluviométrie avec l'apparition des surfaces encroûtées et imperméables responsables de l'accroissement des surfaces ruisselantes et de la diminution de la capacité de rétention en eau (Mahé et Paturel, 2009).

Pour Albergel (1987), les modifications qui sont responsables des conditions de ruissellement plus favorables, sont dues à l'action conjuguée de l'homme et des nouvelles conditions climatiques. Il a ainsi

montré que la diminution du couvert herbacé et l'extension des zones cultivées favorisaient les tassements de la surface du sol et le développement de pellicules imperméables ainsi que l'extension de régions très érodées. Pour Roose (1974), le ruissellement dépend essentiellement de la surface du sol non couverte par la végétation, des travaux culturaux et de l'humidité du sol préalable à la pluie. L'impact des changements d'occupation des sols sur le comportement hydrologique (ruissellement et infiltration) des hydro systèmes Sahéliens met en évidence l'hydrodynamique superficielle contrôlée essentiellement par le couvert végétal et les organisations pédologiques de surfaces (Albergel *et al.* 1985). Le couvert végétal a, en effet, un rôle extrêmement important dans le bilan de l'eau et des matières circulant à la surface et dans le sol car il absorbe l'énergie des gouttes de pluie, évite le glaçage des terres et accélère l'évaporation des réserves hydriques du sol (Roose, 1974).

De nos jours, les terres encore arables sont, pour la plupart, exploitées sans interruption (pas de jachère). Les terres, qui jadis, étaient considérées comme marginales, et, plus encore, les espaces abandonnés car dégradés, sont (re)colonisés en faisant appel à de nouvelles pratiques de conservation et de restauration des sols (zaï, demi-lune, cordons pierreux, ...). Néanmoins, les derniers espaces encore en végétation sont défrichés et transformés en champs (Diello *et al.*, 2006).

La proportion des sols nus ou surfaces dégradées dans la région du degré carré de Niamey s'est considérablement accrue depuis 1950 (Massuel, 2005). L'occupation progressive par l'homme de l'environnement a entraîné la saturation des espaces cultivés. Selon Loireau (1998), en l'espace d'un demi-siècle le paysage dans la région du degré carré de Niamey - sur un terroir représentatif de 25 km² - s'est complètement transformé. Ceci avait été démontré auparavant par Ada et Rockstrom (1993) sur un terroir typique du Zarmaganda (au nord de Niamey). On est passé d'un paysage peu artificialisé avec seulement 12% des surfaces sous l'emprise des cultures en 1950 à 70,5% en 1992. Plusieurs études, réalisées à partir des photographies aériennes et d'images satellitaires à haute résolution spatiale au Sahel ont révélé la très forte diminution de la végétation naturelle en général, ainsi qu'une augmentation remarquable des sols nus et dégradés (Ada et Rockstrom, 1993 ; Chinen, 1999 ; Le Breton, 2004-2005 ; Leblanc *et al.* 2008 ; Amogu, 2009).

Par ailleurs d'autres études, basées sur l'interprétation d'indices de végétation issus de l'imagerie satellitaire à basse résolution spatiale (Rasmussen *et al.* 2001 ; Anyamba et Tucker, 2005 ; Hermann *et al.* 2005), ou l'évolution de l'albédo (Govaerts et Lattanzio, 2008) ont révélé un accroissement de la couverture végétale au Sahel.

Cependant des études, contemporaines, de Hountondji *et al.* (2004) puis Hein et de Ritter (2006) ont mis en évidence les limites des indices de végétation pour la détermination de l'évolution de la couverture végétale à partir de images satellitaires à très basse résolution (AVHRR, SPOT/VGT). Ces auteurs recommandent l'utilisation du rapport NDVI/P ou PPN/P (productivité primaire nette/pluie) au lieu d'un indice de végétation. D'autres travaux récents s'opposent à ceux de Hountondji *et al.* (2004) et de Hein et de Ritter (2006), en particulier Prince *et al.* (2007) qui propose une « réinterprétation » de la « réinterprétation » de

ces derniers, en confirmant le « reverdissement » du Sahel, à travers une petite mais systématique augmentation du RUE (efficacité de l'utilisation de la pluviométrie) pour le Sahel en entier de 1982 à 1990, bien que certaines surfaces contenues dans la région aient des valeurs continuellement faibles du RUE (Prince *et al.* 1998). Dernièrement, Fensholt et Rasmussen (2011) ainsi que Huber *et al.* (2011) se disent partisans du « reverdissement » mais leurs cartes montrent toutefois clairement une diminution de la couverture végétale dans certaines parties de l'Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne, en particulier l'Ouest du Niger et l'Est du Burkina Faso, tout comme celles de Prince *et al.* (2007). Les résultats de Fensholt et Rasmussen (2011), montrent surtout pour la période 1982 – 2007 une augmentation de la somme du NDVI dans la zone Sahélienne, tandis que pour la période 1996 – 2007, l'évolution de la somme du NDVI a été beaucoup plus complexe, avec à la fois des régions avec des tendances positives et d'autres aux tendances négatives.

A l'échelle plus locale, Ruelland *et al.* (2011) et Gardelle *et al.* (2010) ont observé une diminution de la couverture végétale dans deux secteurs du Sahel Malien, ainsi que par Leblanc *et al.* (2008) dans l'Ouest du Niger. On montrera au chapitre 6 comment nos propres travaux s'insèrent dans cette série riche d'étude à diverses échelles. On reviendra également sur ces nombreux travaux en chapitre 8.

On observe en effet, un changement important dans l'utilisation des terres avec des temps de jachère de plus en plus restreints (Courel, 1984) ne permettant plus à la savane de recoloniser ces terres. Ces changements d'utilisation des terres, avec les changements de la couverture végétale, rendent les sols plus sensibles à la dégradation, favorisant le développement de zones à fort ruissellement (Albergel et Valentin, 1988 ; D'Herbès et Valentin, 1996 ; Ambouta *et al.* 1996 ; Boulain, 2004 ; Hiernaux *et al.*, 2009). La physionomie du sol constitue un facteur important pour les processus hydrologiques (Casenave et Valentin 1989). Ces auteurs ont surtout montré le rôle déterminant des états de surface sur le contrôle de l'infiltration en zone sahélienne (Casenave et Valentin, 1989).

Les sols sableux Sahéliens naturellement pauvres (Yamoah *et al.* 2002), voient donc leur productivité diminuer. Cela reflète la dynamique interactive population- environnement (Raynaud, 2001).

2.2 Le degré carré un cas pas toujours représentatif

Tout d'abord on se doit de définir ce qu'est le degré carré de Niamey ; et pourquoi l'avoir défini comme objet d'étude? Il s'agit simplement du degré carré dans lequel se situe la ville de Niamey; il est situé entre 13° et 14° de latitude Nord, entre 2° et 3° de longitude est, à l'Ouest du Niger.

Pourquoi le prendre comme objet d'étude? En fait, comme on est en zone endoréique, le bassin versant est peu pertinent. Nous avons donc jugé que pour étudier un secteur représentatif de ces zones endoréiques, le degré carré de Niamey (DCN) bien connu et documenté car objet d'étude des expériences HAPEX et

AMMA, était en fin de compte tout à fait justifiable. Le « degré carré » de Niamey est du point de vue hydrologique tout à fait représentatif des caractéristiques de la bande sahélienne (Le Breton, 2012). De nombreuses études réalisées sur le degré carré de Niamey ont révélé les comportements hydrologiques de ce

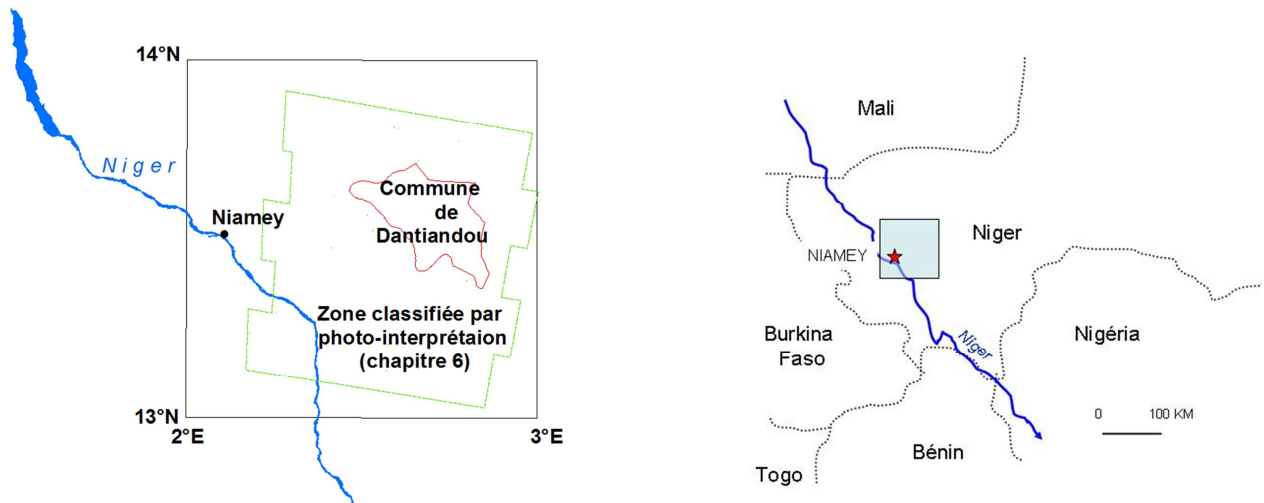


Figure 14. La commune de Dantiandou dans le degré carré; et le Degré Carré de Niamey (DCN) dans son contexte régional ; le losange représente la zone couverte par les figures 46 et 47 plus bas (chapitre 6)

milieu à travers des petits bassins versants expérimentaux. Si les observations ont montré une hausse paradoxale des écoulements malgré la baisse de la pluviométrie depuis plusieurs décennies au niveau de la plupart des bassins versants sahéliens, dans le degré carré de Niamey ceci s'est traduit du fait de l'endoréisme par une augmentation du nombre des mares, de leur volume et de la durée en eau de ces mares. Ainsi, plus de 30 ans après le début de la sécheresse, l'augmentation du niveau de la nappe phréatique a été observée dans certains secteurs endoréiques Nigériens (Desconnets *et al.*, 1997 ; Leduc *et al.*, 2001 ; Favreau *et al.*, 2002). Cela est sans nul doute la conséquence de l'augmentation du ruissellement. Les mares ont été définies comme étant les principales zones de recharge de la nappe, d'où la remontée du niveau phréatique, qui est de plus en plus rapide. Dans ce cas particulier du bassin des Iullemeden qui couvre un gros tiers centre-ouest du Niger, les écoulements alimentent de petites dépressions endoréiques qui sont des lieux privilégiés de recharge des nappes. L'augmentation des écoulements de surface provoque une hausse du niveau de l'eau dans ces dépressions et une plus importante recharge des nappes (Fig. 14) (Mahé *et al.* 2003, Leblanc *et al.*, 2008).

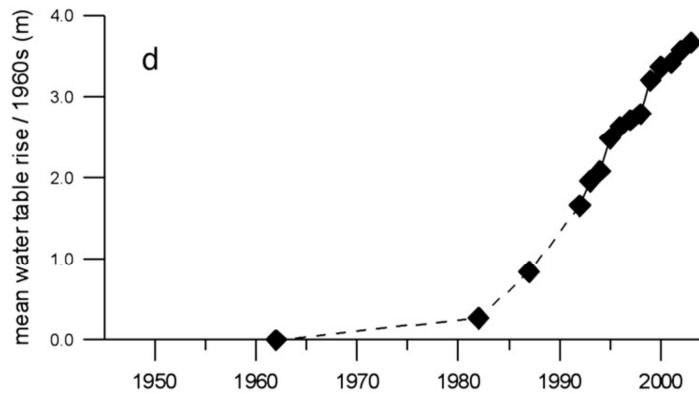


Figure 15. Remontée moyenne du niveau de la nappe du Continental terminal 3 dans le DCN (partie ouest du bassin sédimentaire des Iullemmenden (Leblanc *et al.*, 2008)

Sur la Figure 15 est présentée l'évolution du niveau de la nappe phréatique calculée pour la période 1963 à 2003. Leblanc *et al.*, (2008), ont montré que l'essentiel de l'augmentation de la recharge de la nappe s'est produit pendant les décennies 1980 et 1990. Ils ont également observé une relation quasi linéaire entre le taux de défrichements sur les pentes sableuses et l'augmentation de la densité du réseau de drainage dans le degré carré de Niamey. On a appelé cette remontée de la nappe en période de sécheresse « le paradoxe de Niamey » (Leduc *et al.*, 2001).

L'évolution importante du milieu naturel (défrichements, érosion, encroûtement des sols) entraîne certes un accroissement significatif des ruissellements mais aussi une érosion active entraînant des dépôts sableux en forte expansion favorisant ainsi l'apparition de ces mares de plus en plus nombreuses dans la zone causant l'infiltration profonde de l'eau et par conséquent la hausse des nappes phréatiques. L'étude des écoulements au sein des réseaux de drainage des bassins dans la zone d'étude a permis à Le Breton (2012) de mettre en évidence le rôle des facteurs fortement morphogènes qui vont des précipitations de forte intensité à des états de surface à forts coefficients de ruissellement. Ces états de surfaces tels que les croûtes d'érosion sont les plus actifs dans l'exportation de sédiments vers l'aval des bassins. Ces travaux lui ont permis de mettre en exergue la concomitance des coefficients de ruissellement et les fortes concentrations en sédiments transportés sur ces surfaces encroûtées. Il a également mis en avant le rôle croissant des ravines dans la modification du cycle hydrologique. Il a ainsi démontré que les fonds de ravines constituent des vrais écrêteurs de crues. Pour lui, la forte extension spatiale de ces surfaces entraîne aussi la perte de surfaces cultivables.

L'augmentation de la capacité du ruissellement causant la hausse de la nappe phréatique est due surtout aux impacts anthropiques qui semblent être très importants, par le biais de certaines pratiques culturelles, qui entretiennent et accélèrent la destruction des sols, avec pour conséquence ultime un sol nu encroûté en cas de surexploitation (Mahé *et al.* 2003). En gros, le système de culture traditionnel sur ces sols sableux pauvres et peu fertiles qui caractérisent le Sahel est extensif et basé sur la restauration de la fertilité des sols par des périodes assez longues de jachères (15 ans traditionnellement, mais 95% de la fertilité est rétablie au bout de

8 ans). Or ce système n'est pas intensifiable et le raccourcissement, puis la disparition, progressive, de la jachère, devrait être compensée par un apport de fertilisants, et un travail amélioré et plus profond du sol, ce qui ne s'est pas encore produit, sauf localement. C'est ce processus de diminution de la jachère qui entraîne la fatigue des sols sableux a priori très filtrants.

Toutefois la reprise de la pluviométrie depuis 1994, accroît aussi les écoulements en augmentant l'eau disponible en surface sans permettre à la végétation de recouvrir les plages des sols nus et encroûtés. Même si par ailleurs certaines hypothèses se fondent sur la croissance de la biomasse et de la couverture végétale par l'imagerie satellitaire à basse résolution (NOAA/AVHRR, TERRA/MODIS, SPOT-VGT,...), et malgré cela on constate une poursuite de l'augmentation des débits.

Toutefois, il est important de préciser à ce stade que le degré carré de Niamey, sur lequel nous étendrons en chapitre 5 la classification validée sur la commune de Diantiandou, n'est pas forcément représentatif des régions de même latitude au Sahel. Mougin (2009) a montré que le « re-greening » en tout cas la tendance au reverdissement signalée dans une grande partie du Sahel, ne s'appliquait pas à la région en question: peut être la proximité de Niamey suffit-elle à expliquer qu'elle ne « reverdisse » pas que donc, elle n'obéit pas à la tendance générale et semble elle, en voie de dégradation plus accentuée encore (figure 16).

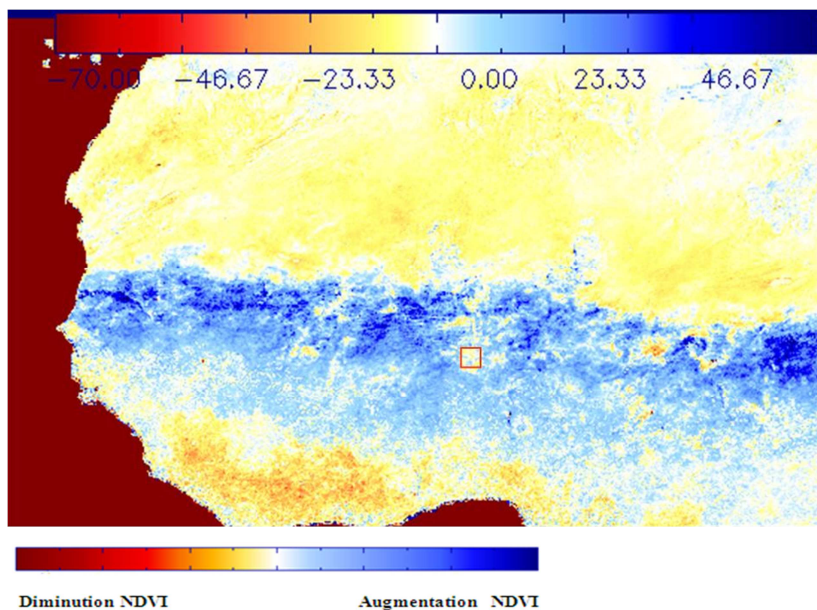


Figure 16. La non représentativité du degré carré de Niamey dans l'évolution positive (re-greening) de la végétation au SaheL (d'après Mougin, 2009)

2.3 Importance des processus hydrologiques en zone endoréique

2.3.1 Description des processus hydrologiques

Du fait de la durée des épisodes pluvieux (2-3 heures maximum, dont 15-45 minutes de très forte intensité), on négligera à ce stade **l'évapo-transpiration**. Nous n'envisagerons donc comme processus que le

ruissellement et l'infiltration. On considérera donc qu'une partie de l'eau tombant sur le sol lors d'une **précipitation** s'infiltré dans le sol, se soustrayant au ruissellement, l'autre partie restant en surface où, soumise aux lois de la gravité, elle pourra ruisseler en fonction de la pente. On parlera d'écoulement plutôt que de ruissellement dès que l'impluvium intéressé permettra la concentration des filets d'eau.

La description des processus hydrologiques (ruissellement et infiltration) en liaison avec ces indicateurs (états de surface, la couverture végétale) a été réalisée à différentes échelles (du m², puis 10 m² à 100 m²) dans cette zone d'étude.

Pour comprendre comment ces processus hydrologiques sont liés à ces indicateurs, l'étude des formations superficielles est un préalable indispensable (Casenave et Valentin, 1989, Desconnets *et al.*, 1995). Une typologie générale a été proposée par Casenave et Valentin sous la forme d'un catalogue. Dans cet ouvrage ils ont montré que les processus hydrologiques sont sous la dépendance quasi-exclusive de l'état de la surface du sol : encroûtement, micro-relief, végétation.

En se référant aux études réalisées sur la zone, nous décrirons les processus hydrologiques en lien avec les indicateurs cités ci-dessus.

Sur les plateaux, des études sur parcelles ont montré que sur les zones de sol nu l'infiltration ne dépasse pas le premier mètre du fait de la présence d'un fort encroûtement superficiel (Descroix *et al.*, 2012a). Pour Desconnets *et al.* (1995), la lame ruisselée sur le sol nu du plateau représente plus de la moitié de la lame précipitée, et sous la végétation, l'eau s'infiltré au-delà de la profondeur maximale des mesures d'humidité (6m). L'expérience AMMA a montré que c'était le cas jusqu'à plus de 12 mètres de profondeur (Descroix *et al.* 2011b). Sur les parcelles de jachère des glacis sableux, Desconnets *et al.* (1995) ont montré que l'encroûtement prononcé limite la profondeur d'infiltration à 2 m, le ruissellement représente 21-25% de la lame précipitée, la quantité restante étant entièrement restituée à l'atmosphère par évaporation. Quant aux parcelles de mil (glacis sableux), le travail du sol (semis, sarclage) induit une forte variabilité temporelle et spatiale de l'infiltration et du ruissellement (Mounirou, 2012). Lors de la destruction des croûtes, on constate une augmentation significative de l'infiltration après les sarclages, mais au fur et à mesure des averses successives et de la reconstitution des pellicules superficielles, le ruissellement augmente (Desconnets *et al.*, 1995).

Ainsi, les surfaces à fort potentiel de production de ruissellement se localisent dans les zones les plus élevées. Ce sont d'abord les surfaces cuirassées des plateaux et de leur bordure, lorsqu'elles ne sont plus couvertes par des dépôts sableux, puis les zones fortement encroûtées en haut de versant, au contact du talus. Les surfaces à faible aptitude au ruissellement sont situées dans les parties basses, dans la zone de raccordement avec la cuvette, et sur les dépôts sableux qui recouvrent les plateaux (Esteves et Lenoir, 1994). Cependant, les zones de forte capacité de rétention en eau sont les fourrés de brousse tigrée, les zones d'épandage à mi-versant et les mares. Dans le cône d'épandage les quantités d'eau infiltrées, provenant du ruissellement, sont importantes et le front d'infiltration descend rapidement (Desconnets *et al.*, 1995 ; Descroix *et al.*, 2012a).

Concernant les relations fonctionnelles de la végétation au ruissellement et à l'infiltration, elles ont été mises en évidence par plusieurs études. Lorsque le couvert végétal disparaît, le sol nu se couvre de croûtes structurales, rapidement relayées par des croûtes d'érosion. Le sable mobilisé lors de la formation des croûtes structurales subit la déflation et s'accumule là où subsistent des plantes herbacées, formant ainsi des micros dunes. Si la pluviosité redevient suffisante, les versants de ces micro-dunes s'érodent, les sables recouvrent à nouveau la croûte d'érosion, piègent des graines et favorisent l'infiltration. Le couvert peut retrouver ainsi son état initial. Si la sécheresse persiste, ou si les conditions pédologiques sont moins favorables que dans le cas précédent, la végétation des micros dunes ne protège plus suffisamment le sol pour s'opposer à la formation de croûtes structurales, puis, le cas échéant, de croûtes d'érosion (Valentin, 1994). Les eaux de ruissellement se concentrent ainsi sur la croûte d'érosion. Peu à peu, des rigoles et ravines affouillent les horizons gravillonnaires sous-jacents où se forment des croûtes gravillonnaires. En effet, d'une surface couverte et perméable, cette spirale de dégradation conduit à une surface purement minérale à très faible capacité d'infiltration. Cette dégradation progressive des facteurs d'infiltration conduit à une aridité accrue et à une auto-accélération du processus (Valentin, 1994).

2.3.2 Rôle de l'occupation du sol dans les processus d'infiltration et de ruissellement

La modification des états de surfaces constitue le facteur prépondérant de la genèse et de la dynamique des processus de ruissellement et d'infiltration (Souley Yéro, 2008).

Les changements d'occupation des sols à travers le déboisement, la coupe de bois de chauffage et le surpâturage, entraînent la dégradation du milieu. L'extension des zones cultivées, la forte diminution de la durée des jachères, le défrichement des zones marginales lors des années très déficitaires et la pluviométrie qui tend à laisser le sol nu, sont les facteurs qui favorisent la dégradation des sols par érosion hydrique éolienne, et provoquent leur aptitude croissante au ruissellement (Valentin et Ruiz Figueroa, 1985 in Albergel et Valentin, 1988).

L'accélération de la rotation entre les cultures et les jachères entraîne la fatigue progressive des sols et surtout leur encroûtement superficiel qui bloque l'infiltration et génère des ruissellements. Plusieurs études ont démontré que la dégradation de la végétation dans cette zone a provoqué une érosion active, avec la présence de plus en plus de ravines, et la formation des cônes de déjection et des zones de dépôts sableux en aval, qui constituent des zones d'infiltration profonde de l'eau. En zone sahélienne, une des conséquences de la sécheresse était, paradoxalement, la diminution de l'infiltration et l'augmentation du ruissellement (Casenave et Valentin, 1989). Les sécheresses récentes ont provoqué de très fortes extensions des croûtes superficielles (Casenave et Valentin, 1992). La diminution du couvert herbacé, due à un régime hydrique des sols moins favorable à la croissance des plantes, avait entraîné le développement d'organisations pelliculaires de surfaces qui réduisaient l'infiltration de l'eau (Casenave et Valentin, 1989).

Des études menées par Albergel et Valentin (1988) ont montré que malgré la pluviométrie très déficitaire en 1984 l'écoulement annuel restait comparable à celui observé pour les années anciennes plus humides. Les modifications des états de surface ont eu des répercussions sensibles sur l'écoulement des bassins versants sahéliens (Casenave et Valentin, 1989). Pour Albergel et Valentin, (1988) l'augmentation des ruissellements doit trouver son explication dans une transformation de grande ampleur des états de surface. L'appauvrissement de la végétation et l'accroissement des zones dénudées appauvries en matières organiques les rendent sujettes à l'érosion et ou aux phénomènes d'encroûtement (Albergel et Valentin, 1988). Ces processus ont provoqué l'augmentation des volumes ruisselés et une infiltration dans les bas-fonds et zone d'épandage sableuse.

CHAPITRE 3 : Quelles échelles spatiales et temporelles ?

Avant d'en venir aux échelles des processus, il faut savoir de quels processus on parle et comment en tirer des indicateurs du ruissellement et surtout des indicateurs de dégradation du milieu, donc essentiellement des indicateurs d'érosion hydrique ; si on ne prétend pas traiter ici spécifiquement de l'érosion éolienne, nous évoquerons forcément de temps à autre ces processus puisqu'ils sont intimement liés aux processus hydriques, dans le temps et dans l'espace.

3.1 Quels indicateurs de terrain pour l'observation des processus hydriques ?

On se propose ici de définir quelques indicateurs de dégradation (ou résilience) de l'éco-système, fondés sur l'observation des processus hydrologiques, que l'on décrit donc auparavant.

Les indicateurs observables au sol varient en fonction de la morphologie et du paysage. A partir de nos travaux de terrain, nous décrivons les indicateurs observés au niveau de chaque unité de notre zone d'étude.

Sur les plateaux latéritiques (fig. 17), on observe une proportion importante de croûtes (sols nus) et de graviers. On observe aussi des cailloux, des cuirasses ferrugineuses et une faible proportion de sables. Les formations sableuses sont surtout observées au niveau des bandes boisées. Le taux de couverture végétale sur ces types d'unité est très irrégulier voir nul à certains endroits. Toutefois on retrouve comme type de végétation sur les plateaux, la végétation contractée de la brousse tigrée.



Photos : (Descroix & Yero)

Figure 17. Plateaux Latéritiques

Au niveau des talus (fig.18), on observe comme formations superficielles des sols nus cuirassés avec la présence de fourrés le long des ravines.

Au niveau des jachères non dégradées et dégradées des glacis et jupes sableuses (fig.19 et 20), on trouve comme types de formations des sols sableux meubles et indurés, couverts de croûtes d'érosion à certains

endroits. La végétation est constituée de ligneux bas de *Guiera senegalensis*. On trouve aussi une couverture herbacée faible à moyenne selon l'état des jachères. Les jachères sont fréquemment très dégradées (comme on peut le voir sur les figures 19 et 20) avec plus de 80% d'encroûtement. La végétation est composée de quelques ligneux bas de *Guiera senegalensis* déchaussés. La hauteur des racines à nu témoigne de l'épaisseur de sol déjà disparue (figure 20). On note aussi la présence d'une faible proportion de graviers.



Photos : (Descroix & Yero)

Figure 18. Talus



Photos : (Descroix & Yero)

Figure 19. Jachères

Dans les surfaces culturales (mil) (figure 21), les sols sont sableux fins meubles, à tendance limoneux, couverts de pellicules culturales. La couverture végétale très ouverte, est constituée principalement de ligneux et d'herbacées annuelles. On trouve fréquemment sur les plateaux cuirassés des placages sableux ; on est alors en présence de sols sableux et indurés à certains endroits. Le couvert végétal est composé de quelques ligneux hauts et le couvert herbacé est très faible (figure 22).



Photos : (Descroix & Yero)

Figure 20. Jachères dégradées



Photos : (Descroix & Yero)

Figure 21. Cultures

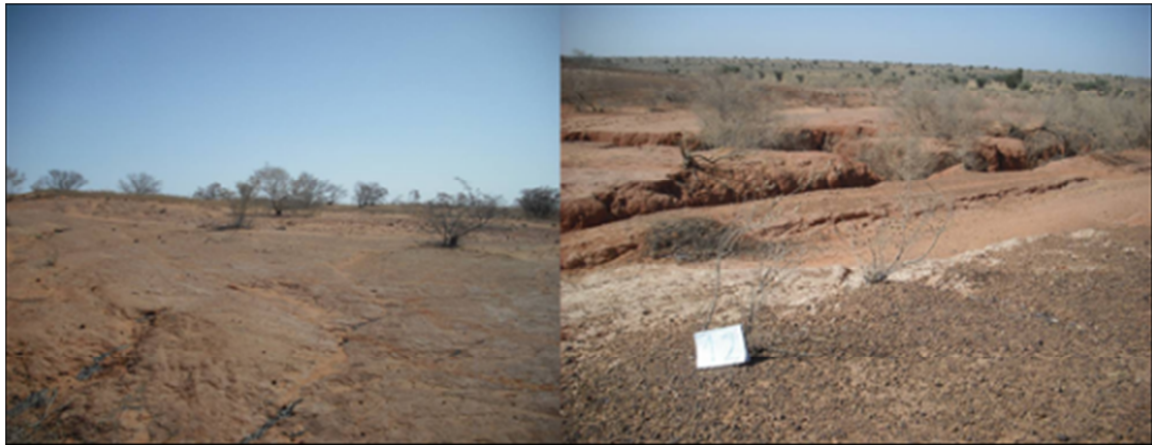
L'observation des piedmonts ou glacis rocheux révèle la présence de sols nus encroûtés avec des ravines profondes et aussi un pavage de graviers (figure 23).

Au niveau des bas-fonds, les sols sont en général, argilo-sableux, sablo-argileux, ou argileux. Quant aux ravines, le fond en est constitué de sables meubles, toutefois, le reste du sol est encroûté et dégradé. Les ravines ont souvent conservé leur végétation qui est celle des versants, mais en plus touffu comme on peut le



Photos : (Descroix & Yero)

Figure 22. Placages sableux



Photos : (Descroix & Yero)

Figure 23. Sols nus encroûtés hors plateaux



Photos : (Descroix & Yero)

Figure 24. Ravines

voir sur la figure 24. La végétation est composée de ligneux bas et de ligneux hauts. La végétation de ligneux bas est dominée essentiellement par des *Combretum glutinosum*, des *Guiera senegalensis* et quelques *Combretum micranthum*.

Les ligneux hauts sont constitués essentiellement de *Faidherbia albida*, d'*Acacia nilotica*, de *Combretum nigricans* et de *Balanites aegyptiaca*. Le taux de couverture herbacée est très faible. Sauf au niveau de la mare permanente de Boula Kouara Tegui qui est caractérisée par la remontée de la nappe phréatique, et où la couverture herbacée est relativement abondante (figure 25).



Photos : (Descroix & Yero)

Figure 25. Bas-fonds

En conséquence on peut définir une série d'indicateurs de dégradation/résilience de l'écosystème, définis sur les processus hydrologiques que l'on vient de décrire;

- la proportion de sol nu ; elle est visible sur des photos PIXY, éventuellement sur photos aériennes et images Corona, voire même des scènes SPOT en 5 m car malheureusement ces plages de sol nu sont de plus en plus étendues ;
- la proportion de sol encroûté : difficile à distinguer des sols nus simples sur photos aériennes noir et blanc, on peut par contre facilement les ségréger sur les photos PIXY (couleur) ainsi que, pour les plages les plus étendues, sur les compositions colorées de scènes satellitaires à haute résolution (SPOT 5 m) ;

- les dépressions hydro-éoliennes (DHE, voir figures 81 et 82 plus bas) qui sont le plus souvent à l'origine des grandes plages de sols encroûtés: les conditions de leur cartographie sont les mêmes, parfois facilitées par leur disposition et leur aspect quasi-circulaire puis coalescent ;
- les rigoles et ravines : si les premières sont à peu près impossibles à repérer à part sur les photos PIXY, les deuxièmes sont hélas de plus en plus visibles dans le paysage et donc sur les photos aériennes et scènes satellites à haute résolution ; elles expliquent l'augmentation du coefficient de drainage ;
- les plages de dépôts sableux : qui dit érosion dit sédimentation; on observe de fait, à toutes les échelles (donc visibles par des outils différents) des dépôts sableux de plus en plus nombreux, dans les bas-fonds comme sur les replats du relief ;
- le coefficient de drainage (longueur totale des drains par unité de surface) est très lié au coefficient de ruissellement, et il a augmenté très sensiblement ces dernières années avec l'accroissement des zones ruisselantes ;
- les sapements de berge sont plus localisés, mais de plus en plus répandus dans les milieux sableux du Sahel ; ils se repèrent aussi aisément sur les photos aériennes, même en noir et blanc ; par contre ils sont difficiles à repérer sur scènes satellites, sauf dans les secteurs de lits sableux larges ;
- les ruptures d'endoréisme sont une forme amplifiée de ces sapements de berge, correspondant en général à la rupture d'un cordon sableux retenant une mare ; ils se sont multipliés en particulier dans la région de Niamey ces dernières décennies, du fait de l'accroissement des écoulements.

Par ailleurs, les coefficients de ruissellement, d'écoulement, de tarissement, la durée des crues, la forme des hydrogrammes, sont autant d'indicateurs de l'évolution hydrologique due aux changements d'usage des sols; mais ils ne sont pas repérables sur iconographie et restent donc difficilement cartographiables. Par contre, dans le degré carré de Niamey, on peut repérer, par leur couleur noire et leur durée en eau (peu saisonnière) les mares, de plus en plus nombreuses, qui sont liées à la remontée de la nappe, qui affleure à des endroits de plus en plus nombreux (voir au chapitre 8, les figures 111 et 112) ; étant constituées d'eau filtrée, leur couleur est très différente de celle des mares temporaires se formant lors de la mousson.

On verra au chapitre 8 quel est le rôle de ces indicateurs dans l'évolution du bilan hydrologique observée au Sahel ces dernières décennies.

3.2 Les outils d'analyse : le paysage et la télédétection

3.2.1 Paysage : une vision horizontale intégratrice

Il ne s'agit pas pour nous de faire une étude approfondie du paysage, encore moins de rentrer dans la discussion polysémique qu'accompagne cette notion de paysage. Loin aussi pour nous de dresser une liste

complète des définitions du paysage, mais simplement de donner quelques éléments de définition tirés de nos lectures expliquant ce que c'est le paysage. Du reste, la question a été amplement développée par ailleurs (Laques, 2009). Comme l'a d'ailleurs dit Dério (2008), la question de la définition scientifique du mot "paysage" fait l'objet, dans de nombreux travaux, de développements introductifs un peu embarrassés par l'apparente polysémie du terme, qui découle principalement d'une oscillation entre deux approches du paysage, tantôt saisi comme la combinaison localisée de caractères matériels «objectifs», visibles, éventuellement mesurables, et liés entre eux par des relations multiples de type systémique, tantôt seulement considéré comme une représentation subjective de l'environnement, un «regard» singulier dont l'existence est indissociable de celle de l'observateur, individu ou groupe social. Le paysage, selon Beringuier *et al* (1999), in Laques (2009), « est une réalité changeante et dynamique, inscrite dans le temps autant que dans l'espace. A l'échelle de l'année, les caprices du temps et le cycle des saisons lui confèrent de multiples physionomies. Considéré dans la longue durée, il apparaît comme la combinaison momentanée d'héritages divers, liés à des processus physiques ou à des formes d'utilisation sociale et d'aménagement. Même lorsqu'il paraît stable, il est toujours travaillé par des dynamiques évolutives, qui n'agissent pas toutes selon les mêmes pas de temps ». Nageleisen (2004), définit la notion de paysage par un système de définitions tels que : « production du paysage », « paysage visible », « perception du paysage », « utilisation du paysage ». Pour lui, entre le système paysage visible où l'espace est plus ou moins visible et le système utilisateur, les relations sont particulièrement complexes et constituent le système « perception du paysage » composé par des filtres perceptifs. C'est ce qu'il considère comme le passage de la notion de paysage visible à la notion de paysage vu.

La notion de paysage recouvre, en effet, plusieurs sens (Laques, 2009), et il est d'un usage de plus en plus considérable. Cependant, il relate avant tout les rapports qui relient les hommes avec leur milieu. C'est surtout cette vision du paysage qui considère le milieu et ses dynamiques ainsi que les activités humaines à l'intérieur de ce milieu qui nous intéressent. Laques (2009), considère le paysage comme un ensemble de signes qu'il s'agit d'apprendre à déchiffrer, et à interpréter. Pour Nageleisen (2004), l'étude du paysage sert avant tout au découpage spatial. La démarche consiste pour lui à classer des espaces d'un territoire non plus par unités administratives mais par une véritable cohérence paysagère. Cette approche particulièrement intéressante permet d'étudier les systèmes de relations entre les éléments du paysage, en mettant en avant le paysage réellement vu et en prenant aussi en compte les pratiques (Nageleisen, 2004).

En Afrique de l'ouest en général ainsi qu'au Niger en particulier le concept de « paysage » n'est pas aussi bien développé. C'est surtout l'approche morphologique du milieu naturel qui est d'usage courant et ce à travers la caractérisation des éléments géomorphologiques du milieu, des formes topographiques, et des structures.

Les travaux effectués par J-F Richard (1989), plutôt axés sur la caractérisation géomorphologique du milieu naturel, étaient parmi les premiers à utiliser la notion du paysage comme un nouveau langage pour les études des milieux tropicaux. La morphologie du paysage selon J-F Richard (1989), est un moyen d'appréhender les

forces et les dynamiques qui se trouveraient au-delà des apparences rencontrés sur le terrain, à annoncer certaines similitudes structurelles et dynamiques entre le « paysage physique » et le « paysage humain ». Pour l'auteur, des constances et des ressemblances existent entre les facteurs topographiques et les facteurs anthropiques, des relations de similitudes qui dépendent aussi du relief et de la circulation de l'eau à l'échelle des interfluves ou bien des déplacements et des activités humaines à l'échelle des terroirs. Il pense que la problématique scientifique du paysage s'apparente à celle de la plupart des sciences d'observation et n'a guère dépassé le stade de la description.

En ce qui nous concerne nous utiliserons le paysage tout simplement en tant qu'outil qui nous sert à décrire et à analyser notre zone d'étude. Nous aborderons le paysage dans sa vision intégratrice : c'est à dire en considérant le milieu dans son ensemble, en faisant le lien entre le naturel et le social, par exemple, les rapports entre la végétation, le sol, l'homme, les pratiques agricoles, l'hydrologie. Cette position d'interface du paysage sert à mesurer les corrélations qui pourraient exister entre conditions ou situations socio-économiques et degrés de biodiversité afin de mieux comprendre leurs interactions (Laques, 2009). En ce sens, il contribue à faire converger une grande diversité de points de vue et de savoirs pour améliorer une connaissance commune et globale. De ce fait, il implique une démarche systémique et non sectorielle (Laques, 2009).

Pour Laques (2009), l'intégration de l'outil « paysage » dans les dispositifs d'observation doit pouvoir améliorer la capacité d'observation et de lecture de la surface terrestre, par la mise en synergie d'une efficacité de données relevant des sciences de la nature et des sciences sociales, afin d'ouvrir la démarche vers les acteurs et vers l'opérationnalité, pour participer à l'effort de développement durable qui anime la gouvernance de nombreuses pays du Sud.

3.2.2 La télédétection : une perception verticale exhaustive et répétée

La télédétection englobe l'ensemble de processus qui consiste à capter l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émise ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, en vue de sa mise en application. Selon Robert Desjardins (2000), la définition la plus élémentaire de la télédétection se confine aux processus nécessaires pour obtenir de l'information sur des objets et ce, sans être en contact physique avec eux.

Depuis une quinzaine d'années, les satellites fournissent aux thématiciens de la télédétection des images de plus en plus nombreuses et de plus en plus riches. Les images sont numériques et peuvent donc être traitées par des ordinateurs qui effectuent automatiquement leur interprétation ou qui modifient leur aspect en vue de leur exploitation pour des thématiques, (Hillion *et al.*, 1989 ; L'Homme *et al.*, 2004).

Toutefois, l'information contenue dans ces images varie selon que les capteurs des satellites soient passifs ou actifs. Les capteurs permettent de mesurer les objets étudiés dans une bande donnée de longueur d'onde. Les capteurs actifs envoient de l'énergie et recueillent la fraction que les objets en renvoient ; c'est le cas des

radars. Quant aux capteurs passifs, ils reçoivent l'énergie que les objets émettent ou réfléchissent (radiomètre, cameras, spectro-radiomètre,..), l'émetteur principal étant le plus souvent le soleil (Girard et Girard, 2010). Dans ce travail nous n'utiliserons que des images issues des capteurs passifs des satellites.

Les apports de la télédétection pour l'étude des changements environnementaux sont considérables. La télédétection est, en effet, un outil très pratique pour le suivi de l'état de dégradation des ressources naturelles. Elle permet de spatialiser l'information et de la localiser. De nombreuses études se servent de la télédétection pour l'analyse des changements de paysages et d'occupation des sols de l'échelle locale à l'échelle régionale et continentale. Elle permet aussi à travers ses études multi-temporelles de quantifier ces changements et ces risques d'extension et de mettre en évidence la vitesse de transformations à laquelle se produisent ces changements. Pour Dubreuil *et al.* (2008), les images satellites mettent en évidence le caractère éphémère, local, de structures qui vont se répéter et montrent également les processus de discontinuités et d'hétérogénéité de l'espace. Pour eux, cela constitue autant de raisons qui justifient le recours à la vision verticale pour l'analyse paysagère. Ce qui fait qu'on assiste de plus en plus à l'abandon des observations de terrains au profit des recherches à partir des images satellites.

Ainsi, de l'acquisition des données (images satellites) aux applications, plusieurs procédés sont utilisés dont le prétraitement des images, puis le traitement et l'analyse. Les opérations de prétraitement sont des traitements préalables destinés à la mise en forme optimale des données (corrections géométriques, radiométriques et atmosphériques), avant l'analyse et l'extraction de l'information (calcul d'indices et classification).

3.2.2.1 Les méthodes de prétraitements

Ces méthodes de prétraitements sont utilisées pour la mise en forme optimale des données

– **Correction géométrique** : la correction géométrique consiste à éliminer les déformations géométriques affectées aux images lors des enregistrements par le satellite. Ces déformations sont dues aux erreurs de positionnement du satellite sur son orbite, aux effets de rotation de la terre et aux effets de courbure. Les techniques de correction géométrique des images les rendent superposables à des cartes ou superposables entre elles, permettant des analyses multi-dates. Pour réaliser ces corrections, il faut disposer des points de contrôle (GPS) pris sur le terrain ou identifiés sur une carte topographique. Ces points de contrôle au sol sont ensuite corrélés aux coordonnées pixelisées des images. Cette procédure est appelée redressement géométrique.

– **Correction radiométrique** : elle consiste à diminuer les perturbations dues à l'atmosphère et aux capteurs (Deshayes et Maurel, 1990). En effet, la lumière solaire qui éclaire les objets est perturbée dans sa traversée de l'atmosphère par des aérosols et n'éclaire pas ainsi tous les objets sous le même angle. De même, la lumière réfléchie par les objets et est aussi perturbée par le signal lors de sa traversée de l'atmosphère

avant d'être analysée par le capteur du satellite. Il est de ce fait important de calibrer ces données (corriger les défauts) afin de pouvoir comparer des scènes issues de satellites différents ou bien issus d'un même satellite mais à des dates différentes. Pour cela il faudrait effectuer ces corrections radiométriques. En général, c'est la calibration radiométrique en réflectance hors atmosphère qui est utilisée (Bannari *et al.*, 2004). Dans ce cas, on se place dans l'hypothèse où les effets atmosphériques n'existent pas (Sheeren et Lacombe, 2009).

Concernant la correction radiométrique liée à l'atmosphère, ou correction atmosphérique, elle est basée sur des modèles qui sont certes efficaces mais dont l'application suppose qu'on connaisse les informations concernant certains paramètres du terrain (dont le type d'atmosphère : pression atmosphérique, humidité relative, température, visibilité...) lors de la prise de vue de l'image par le satellite ce qui est très difficile à fournir.

3.2.2.2 Les méthodes de traitements et d'analyse

Les méthodes de traitements et d'analyse sont des traitements qui consistent à interpréter les données, à extraire de l'information utile afin d'évaluer les résultats.

Cela a nécessité dans un premier temps le calcul d'un certain nombre d'indices. Ces indices sont réalisés à partir de la combinaison arithmétique de plusieurs bandes spectrales destinée à mettre en évidence les particularités radiométriques d'une surface donnée. Ces indices compensent aussi partiellement les effets atmosphériques.

Parmi les indices utilisés, on distingue particulièrement:

L'indice de végétation normalisé (NDVI) : $\text{PIR-R}/\text{PIR+R}$, est calculé comme le rapport normalisé de la différence entre la réflectance proche-infrarouge et la réflectance acquise dans la bande spectrale rouge du capteur. Le NDVI est l'indice de végétation le plus communément utilisé pour estimer la quantité de végétation présente sur la surface et suivre son évolution temporelle.

L'indice modifié de végétation ajusté pour le sol (MSAVI) : $\text{PIR-R}/\text{PIR+R+L} (1+L)$, c'est un indice qui prend en compte l'influence des sols sous-jacents aux couverts végétaux sur le signal mesuré au niveau du capteur satellitaire. Il est dérivé de la formulation du NDVI.

L'indice de brillance (IB) : c'est la combinaison de signatures spectrales selon la formule suivante : $\sqrt{\text{PIR}^2 + \text{R}^2}$, l'indice de brillance est utilisé en pédologie, ces fortes valeurs permettant de mettre en évidence les surfaces minérales.

L'indice normalisé d'humidité (INH) : qui est la combinaison de signatures spectrales selon la formule suivante: $\text{MIR-Vert}/\text{MIR+Vert}$, cet indice met en évidence les surfaces humides.

L'indice de coloration ou de clarté : IC= (R – V) / (R + V), il est calculé comme le rapport normalisé de la différence entre la réflectance dans les bandes rouges et vertes du capteur SPOT. Selon Escadafal (2012), cet

indice permet de distinguer les matériaux de surface d'après la saturation de leur couleur. Selon cet auteur, les sols à croûte gypseuse affleurant gris très clair, donnent une faible coloration tandis que des sols à voile éolien, composés de sable quartzueux rougeâtre, donnent une forte coloration.

Ensuite nous avons procédé à la **classification** qui est un processus de tri de mesure des pixels dans une catégorie bien déterminée. Ce processus permet d'identifier la classe à laquelle appartient chaque pixel de l'image. Il vise à créer une image thématique dont le contenu ne représente plus une mesure mais une catégorisation de la nature des objets associés aux pixels. Les classes sont définies à partir des critères établis (biophysique, socio-économique etc....).

3.2.3 Historique des classifications

L'historique des occupations des sols dans la zone étudiée remonte au moins au programme Hapex-Sahel. Pour ce programme l'objectif de la description du paysage à travers la cartographie des unités d'occupation des terres était double : il s'agissait de servir de première base de spatialisation des données localisées mais aussi de support et de système de référence à d'autres recherches éco-géographiques participant à l'étude de la dynamique du paysage (Loireau et D'Herbès 1996).

Cependant, plusieurs autres programmes ont réalisé des cartographies de l'occupation des sols dans cette zone. On note ainsi les travaux effectués par M. Loireau (1993, 1998; Loireau et d'Herbès, 1996), certes dans le cadre du programme Hapex-Sahel, mais aussi concernant la réalisation de son mémoire de DEA ainsi que de sa thèse. Le travail qui était réalisé dans le cadre du programme Hapex-Sahel, portait sur la caractérisation de l'espace et des ressources sur le super site central (degré carré) et permettait d'avoir une première appréhension du milieu (Loireau et D'Herbès, 1996). Cette carte d'occupation des terres a été faite à partir de l'image SPOT du 05/10/1992.

Pour ce qui est de son travail de thèse, Loireau (1998) a utilisé aussi bien des images SPOT de 1986 à 1994 que des séries de photos aériennes prises en 1950, 1975 et 1992, après avoir été mosaïquées, corrigées géographiquement puis géo-référencées, les zones sous l'emprise des cultures (champs cultivés et jachères) ont été contournées manuellement puis digitalisées par Leduc et Loireau, (1997).

Hiernaux *et al.* (2004) dans le cadre de son travail avec ILRI-ICRISAT, a réalisé des travaux sur la zone du Fakara, (zone couvrant une partie de la commune de Dantiandou et appartenant également au degré carré de Niamey). Une base de données géographique a été constituée. Ces travaux ont été menés dans une dizaine de villages de la commune de Dantiandou. Les ressources naturelles de ces terroirs et leur gestion ont fait l'objet d'un inventaire et d'un suivi détaillé, en particulier pour évaluer l'efficacité de l'utilisation des ressources par l'élevage, et son rôle dans le recyclage des éléments minéraux qui limitent la productivité de l'agro-écosystème, l'azote et le phosphore. Parmi les cartes réalisées, on note, la carte des unités géographiques, selon Djaby (2010), elle constitue la base de référence à laquelle toutes les données de l'étude du programme de transfert de fertilité se réfèrent notamment celles relatives aux données écologiques, aux activités de

l'élevage et au suivi des troupeaux. D'après cet auteur les tracés des limites de cette carte tiennent compte de la géomorphologie du territoire. Des cartes d'occupation des sols existent aussi pour les années 1950, 1975, 1992, 1994, 1995, 1996 et 2004. Elles couvrent les trois sites de Banizoumbou, Tchigo Tegui et Kodey, et proviennent d'une interprétation des photographies aériennes à l'exception de la carte de 2004, qui a été établie à l'aide d'images de télédétection. Notons aussi que les classifications issues de ces cartes se superposent, mais ne couvrent pas toujours la même surface. Concernant la carte des sols, elle a été établie sur la base de photographies aériennes (Hiernaux et Ayantunde, 2004).

Dans le cadre du programme AMMA, des cartes de NDVI ont été réalisées par Saux Picard *et al.* (2009), dans la zone du degré carré de Niamey ainsi que de cartes d'occupation des sols par Catherine Ottlé (2007), entre 1986 et 2005 sur une superficie de 500km² dans cette même zone.

Tout récemment Leblanc *et al.* (2008), ont quantifié les occupations des sols sur une surface de 500 km² dans le degré carré de Niamey. En utilisant des séries de photographies aériennes de 1950, 1960, 1975 et 1992 géo-référencées et mosaïquées, ils ont pu mettre en évidence l'ampleur des changements.

3.3 Données disponibles pour l'étude

3.3.1 Données satellitaires et aériennes

Les données utilisées pour cette étude sont composées des images SPOT issus du capteur HRV2 et HRG1, des images Corona de 1965, des images PIXY, des photos aériennes (MNT SRTM).

Trois images SPOT multi spectrales ont été utilisées pour le suivi des changements d'occupation des sols intervenus dans la commune de Dantiandou en 1986, 2007 et 2010. Ces images datent de Septembre, ce qui coïncide généralement avec le début de la fin de la saison pluvieuse. Leurs caractéristiques sont indiquées dans le tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques des images SPOT utilisées pour la réalisation des cartes d'occupations des sols

Année	Nombre d'images utilisées	Date	Résolution spatiale	Bandes spectrales
1986	1	15/09/1986	20 m	Visible, Proche Infrarouge
2007	1	27/09/2007	20 m	Visible, Proche Infrarouge, Moyen infrarouge
2010	1	21/09/2010	10 m	Visible, Proche Infrarouge, Moyen infrarouge

3.3.2 Données exogènes

- données démographiques régionales

Les données démographiques dont nous disposons sur la zone d'étude sont celles récupérées auprès de l'institut national de la statistique du Niger. Ces données nous ont permis de faire l'analyse de l'évolution de la population (chapitre 1), en plus elles nous serviront à vérifier s'il y a une augmentation de la population afin d'analyser les liens qu'il y a entre cette croissance démographique et les changements d'usage des sols.

- données hydro-climatiques des stations

Pour ce qui est des données hydro-climatiques, nous disposons des données provenant des travaux Hapex Sahel 1991-1994 et celles du programme AMMA 2004-2011. Il s'agit des mesures hydrologiques effectuées sur des petits bassins versants se trouvant dans la zone d'étude. Ces données seront analysées afin d'évaluer les liens entre l'occupation des sols et les processus hydrologiques. Par ailleurs, nous disposons des données de débits du fleuve Niger et de ses principaux affluents sahéliens fournis par l'ABN (Autorité du Bassin du Niger). Le jeu de données disponibles comprend donc :

- des données de conductivité hydraulique des sols mesurées sur les principaux états de surface grâce à des infiltromètres à disque et à succion contrôlée;
- des données de ruissellement sur parcelles de 10 et 100 m² du site de Tondi Kiboro de 2004 à 2011 (fig. 27) ; celles-ci ont été installées sur les principaux états de surface;
- des données de débit des trois bassins expérimentaux de Tondi Kiboro (fig 27) de 2004 à 2011 ; amont (4,6 ha) ; aval (11,2 ha) ; bodo (12.3 ha) ;
- des données de débit des trois affluents sahéliens du fleuve Niger, le Gorouol (BV 45000 km²), le Dargol (BV 7000 km²) et la Sirba (BV 38750 km²), ainsi que par soustraction, celui des affluents intermédiaires se jetant directement dans le fleuve Niger (figures 26 et 106) ;
- des données de débit du fleuve Niger à Niamey (BV 700000 km² dont 400000 km² « contributifs », le reste étant endoréique ou aréique).

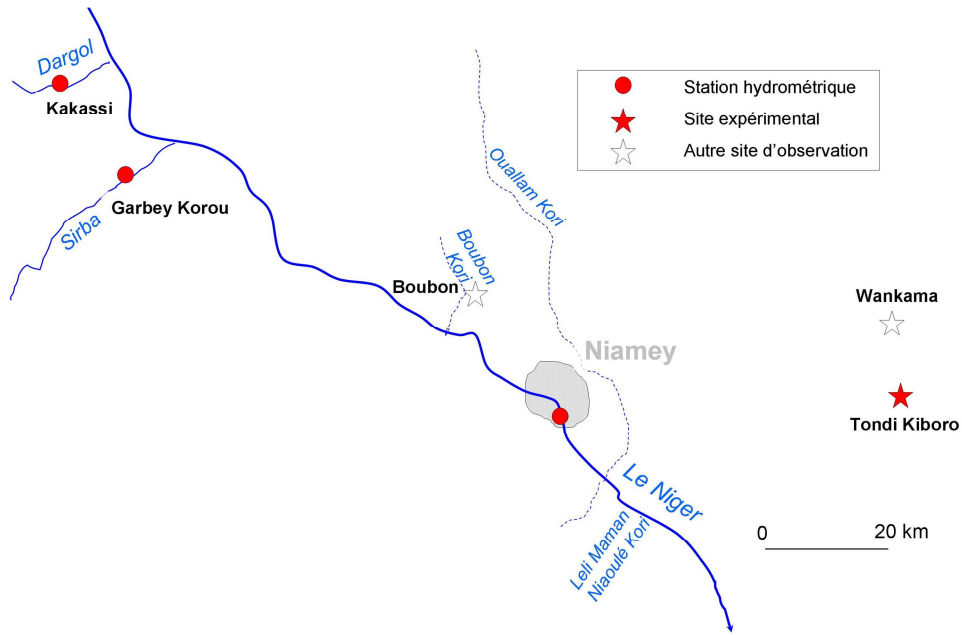


Figure 26. Localisation des sites et bassins hydrométriques

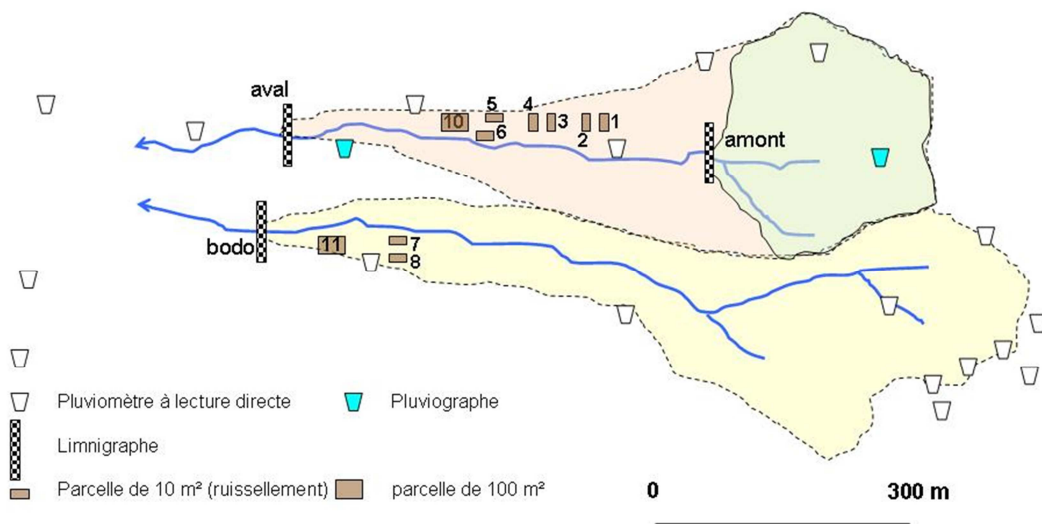


Figure 27. Dispositif expérimental des bassins de Tondi Kiboro

3.4 Les données acquises sur le terrain

Des visites de reconnaissance ont été effectuées sur la zone d'étude. Elles ont consisté à repérer des points GPS pour recaler les images mais aussi pour la localisation des parcelles pour le contrôle de la qualité de la classification. Des photos des parcelles ont également été prises. Ainsi, plusieurs observations ont été effectuées au cours de ces sorties de terrain. Ces observations nous ont permis de bien analyser les

occupations de sols présentes dans la zone d'étude. Elles nous ont surtout servi à apprendre à lire et à comprendre le paysage, afin de percevoir la façon dont les populations l'utilisent et y vivent.

Les sorties de terrain servent aussi à apprendre à lire les images de satellite, à interpréter les signaux radiométriques, les textures, les formes et à reconnaître et qualifier les objets détectés. C'est dans cette dialectique terrain-image que se construisent les indicateurs paysagers à l'origine de diagnostics sur l'état et les dynamiques des occupations des sols (Laques, 2009).

3.5 Recherche d'un compromis d'échelle spatiale

3.5.1 Agrégation – Désagrégation

Dans le cadre d'une étude diachronique, la comparaison des occupations des sols à des dates différentes impose l'acquisition des images ayant la même résolution spatiale. Or nous savons que les images satellitales acquises par les capteurs à haute résolution spatiale ont des résolutions spatiales différentes. C'est le cas des images SPOT XS que nous avons utilisées. Il s'agit des images avec des échelles de 10 m et 20 m. Il se pose, alors, le choix d'une échelle appropriée. Quelle échelle privilégier? La basse ou la haute résolution? C'est ainsi que nous avons procédé à l'évaluation de la barre d'erreur lorsqu'on change de capteur. Premièrement, nous avons pris l'exemple d'un pixel de 10 m de résolution. En considérant que dans un pixel de 10 m on peut avoir soit du sol ou de la végétation, on cherche à calculer le pourcentage des classes à l'intérieur du pixel, si on trouve:

- Un maximum de pourcentage de végétation, le pixel tombera certainement sur la classe végétation.
- Dans le cas contraire, où on aura une proportion importante de sol nu, le pixel tombera alors sur la classe de sol nu.

On suppose dans ce cas que tous les pixels qui ont des valeurs radiométriques supérieures à 0,3 sont de la végétation et ceux inférieurs à 0,3 sont de sols nus. Après estimation des pourcentages des classes on trouve des valeurs comprises entre 0,1 et 0,8. Donc on en conclut que les valeurs qui sont comprises entre 0,8 et 0,31, sont de la végétation et celles qui se situent entre 0,1 et 0,3 sont des sols nus. On peut après faire la moyenne des valeurs végétation – sol nu, en faisant le rapport $X - X_{\max}/X_{\max} - X_{\min}$, on aura des valeurs comprises entre 0 - 1, qui seront comme des pourcentages entre sol et végétation, ce qui nous permet de comparer ces pourcentages ainsi que leurs évolutions. Après avoir réalisé les comparaisons nous avons choisi la basse résolution. Les raisons qui nous amené à choisir cette résolution sont les suivantes: En prenant par exemple l'image de 20 m, on considère le pixel d'une zone donnée de l'image, on estime que la valeur seuil du pixel est de 0,5. De l'autre côté, on prend une autre image, mais cette fois-ci de haute résolution à 10 m, et on considère la même zone, on estime qu'au niveau de ces pixels deux des quatre ont des valeurs seuils de 0,7 et les deux autres des seuils de 0,3 (fig. 28).

Donc en désagrégant le pixel au seuil 0,5 on peut se tromper de 50% sur le signal spectral, du moment où on aura dans chacun des quatre pixels la valeur seuil de 0,5 ce qui en réalité n'est pas le cas (fig. 28).

Alors que si on agrège les valeurs seuils des quatre pixels de l'image de 10 m on aura en sortie la même valeur seuil que pour le pixel à 20 m (fig. 28).

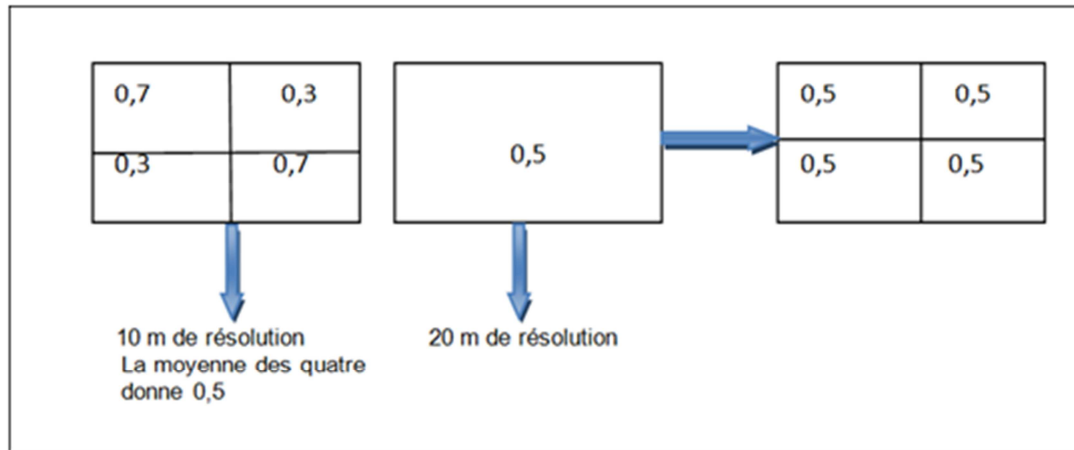


Figure 28. Exemple de changement de la radiométrie des pixels des images satellites quand on passe d'une échelle à l'autre

3.5.2 Critique des résultats

L'utilisation des images à différentes échelles impose un choix en fonction de l'information que l'on veut extraire. Cette information à sortir de l'image dépend en général de l'échelle, et selon le besoin réel de l'application, on utilisera soit la haute soit la basse résolution. Par exemple, pour réaliser une cartographie par zonage, la haute résolution est bien adaptée à ce type d'étude contrairement à la basse résolution qui n'est pas adaptée à cela.

Toutefois, notons que l'agrégation tout comme la désagrégation entraînent une dégradation des images, et donc une perte de l'information au niveau de la radiométrie.

Le capteur SPOT5 bien qu'ayant une meilleure résolution (10 m) par rapport au SPOT1 (20 m) n'a pas été retenu puisqu' en désagrégant le 20 m on induira plus d'erreurs qu'en agrégeant le 10 m. De ce fait, pour un suivi multi-dates de l'occupation des sols, on est confronté à une limitation des données quant à la disponibilité des images de même résolution.

Ces différences d'échelles entre les images créent ainsi des problèmes qui rendent difficiles leur interprétation ainsi que la comparaison des résultats issus de leurs traitements (classification). D'où l'intérêt de les ramener à une même échelle de représentation.

3.5.3 Compatibilité d'échelles requise pour la modélisation hydrologique et ceux fournis par la télédétection

Étant donné que nos résultats cartographiques seront amenés à être utilisés par les modélisateurs, il a été question pour nous dès le départ de faire l'inventaire des objets « utiles » au sens hydrologique, et de leur lisibilité aussi bien sur le terrain que sur les images. Sachant que sur le terrain certains éléments importants par rapport au fonctionnement hydrologique tels que les dépressions hydro-éoliennes, les ravines... ne sont pas décelables sur les images satellites à basse résolution, nous les avons intégrés dans la nomenclature. Mais vue l'échelle à laquelle ces objets sont observés (terrain) et l'échelle fournie par l'image nous n'avons pas pu extraire ces informations.

En effet, au niveau de chaque composant paysager (tableau 4, chapitre 4) identifié sur le terrain, nous avons décrit et relié les principaux types fonctionnement hydrologique présents.

Deuxième partie :
Etude des disparités spatio temporelles à
l'échelle locale et à la celle du degré carré

CHAPITRE 4 : Visions paysagère et satellitale

Le sud-ouest du Niger est caractérisé depuis quelques décennies par une pression accrue des activités agro-sylvo-pastorales sur les ressources naturelles et aussi par un accroissement de la population entraînant de profondes mutations socio-économiques. A cela s'ajoute la variabilité climatique qui s'est traduite par une baisse considérable des précipitations à partir de la fin des années 1960 avec des sécheresses sans précédent au milieu des années 1980. Ce qui a provoqué des changements profonds dans l'occupation des sols. Ces changements d'usage des sols sont responsables de la dégradation de l'environnement, et surtout de l'agressivité des processus d'érosion notamment, d'une part, l'augmentation du nombre de ravines et de surfaces encroûtées causant l'accélération des coefficients de ruissellement et d'autre part, la formation des cônes de déjection et des zones de dépôts sableux qui constituent des zones d'infiltration profonde de l'eau.

Dans ce contexte, cette étude a pour but d'évaluer quantitativement ces changements en cartographiant l'occupation des sols dans la commune de Dantiandou en utilisant les données du capteur SPOT (HRV2 et HRG1).

4.1 Lecture paysagère du terrain

4.1.1 Typologie des types paysagers

En préalable à toute analyse paysagère, il est nécessaire d'identifier des entités spatiales, en l'occurrence les objets d'études sur lesquels s'appuieront l'ensemble des traitements et analyses à venir : à savoir les objets paysagers (Laques, 2009). L'approche paysagère permet à cet effet d'appréhender les parties visibles des dynamiques anthropiques autour de la signification de leur forme, ce qui la rendra compatible entre les observations de terrain et le sens qu'on lui accorde avec le traitement des images satellitaires (Dubreuil *et al.*, 2008).

Dans cette partie, nous présenterons la typologie des paysages réalisée à partir des observations faites sur le terrain. Cette analyse paysagère a servi à la caractérisation des classes d'occupation des sols mais aussi à la mise en relation entre processus d'érosion par composant paysager et densité humaine. Cette typologie des types paysagers doit commencer par une analyse de la diversité spatiale des composants paysagers par type paysager, en calculant le degré d'artificialisation au niveau de chaque type en vue de mettre en relation chaque configuration paysagère à un risque d'érosion. Cela est réalisé en associant à chaque composant des critères visuels des signes d'érosion déjà identifiés sur le terrain. Ainsi, par type paysager on aura un pourcentage de composants paysagers. Et à chaque type, on élabore une grille ou échelle de valeur d'érosion par composant. L'exercice consiste donc pour nous à faire l'inventaire des principaux types paysagers de la zone d'étude lors de nos observations de terrain. A l'issue de ces observations 11 principaux «types paysagers» ont été identifiés. Et à l'intérieur de ces

types paysagers sont inventoriés des composants paysagers. La caractérisation des dynamiques et l'identification des processus (hydriques / éoliens) et formes géomorphologique par composant paysager ont été effectués et sont décrits dans le Tableau 4.

4.1.2 Délimitation manuelle à partir des observations de terrain

Après avoir identifié les types paysagers sur le terrain, nous avons procédé à la délimitation manuelle sur photo-interprétation de la zone d'étude restreinte uniquement à la zone parcourue sur le terrain : en utilisant des supports cartographiques (images Google Earth, composition colorée 2010, délimitation géomorphologique). Ces limites ont été ensuite reportées sur les cartes d'occupations des sols finales, en vue de caractériser et d'estimer les composants paysagers par l'utilisation de la métrique paysagère (composition / configuration) pour leur analyse spatio-temporelle. Le tableau 3 rassemble les principales classes d'occupation des sols.

Cette identification des paysages sur le terrain et sur les images, par le suivi dans le temps et dans l'espace de leurs localisations apprend beaucoup sur les processus de fonctionnement et d'évolution de ses composants (Dubreuil et al, 2008).

4.1.3 Tableau de synthèse paysagère

Le tableau 4 présente les principaux types paysagers de la commune de Dantiandou. Il s'agit pour nous de mettre en évidence les évolutions des occupations des sols, et cela en utilisant une nomenclature représentative qui permet de décrire le milieu physique.

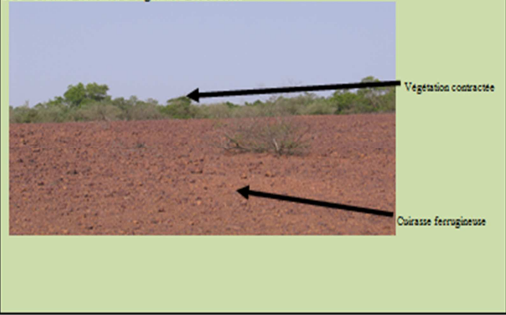
Tableau 3. Description des unités d'occupation des sols dans la commune de Dantiandou



Types d'occupation des sols	Définitions
1	Culture fumée et non fumée sur sable blanc et rouge: en général sur sable meuble
2	Jachère ancienne sur sol sableux meuble, elle date en générale de plus de 5ans
3	Jachère récente sur sol sableux meuble, elle date de moins de 5 ans
4	Sols nus sableux meubles
5	Sol nu induré et encrouté issu de la dégradation des sols sableux meubles, couverts aussi des débris de cuirasse ferrugineuse
6	Végétation se trouvant dans les bas-fonds, le long des <i>koris</i> et des ravines et quelques arbustes isolés
7	Végétation contractée régulière de la brousse tigrée
8	Végétation contractée en dégénérescence de la brousse tigrée
9	Cuirasse ferrugineuse qui constitue le sol nu des plateaux
10	Etendu des plans d'eau naturelles ou artificielles (on note la présence de deux mares artificielles dans la zone d'étude)
11	Habitats de la population de <i>Dantiandou</i> .

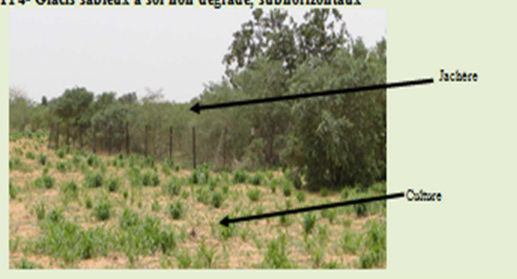

1= Culture, 2= Jachère ancienne, 3= Jachère récente, 4= Sol nu, 5= Sol dégradé, 6=Fourré, arbre isolé, ripisylve, 7=Végétation contracté régulière, 8= Végétation contracté régulière dégradée, 9=Cuirasse ferrugineuse, 10=Mare, 11=Village


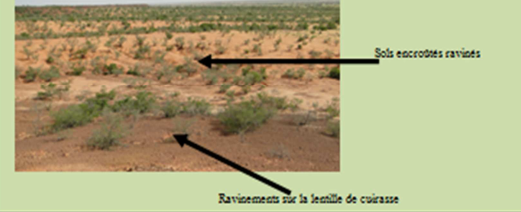
On retiendra à cet effet onze thèmes pour la classification. Le choix de cette nomenclature a été effectué lors de nos travaux de terrain en 2010 et aussi avec l'appui des zones d'entraînement issues de l'interprétation visuelle de Mr Pierre Hiernaux qui a également une parfaite connaissance du terrain.



Tableau 4. Description des types et composants paysagers


Type Paysager : Famille des paysages de plateau cuirassé	Usages	Structure / organisation	Composants paysager / éléments caractéristique	Processus & formes géomorphologiques (hydro / éolien)
<p>TP1- Plateau cuirassé à végétation contractée</p> 	<p>Sylvo-pastoraux : Prélèvement de bois aux dépens de la brousse tigrée Parcours pastoral Pas de culture</p>	<p>Surface du plateau plane, horizontale ou faiblement inclinée, cloisonné par les bandes de végétation contractée de largeur variable Présence de placages sableux enherbés à certains endroits Bordures : effets de dissymétrie possible, entre contact graduel (en glacis) ou corniche rocheuse de latérite, chaotique sur quelques mètres puis prolongée par des éboulis de latérite noire (dénivelé 12-15 mètres) et grande ouverture de la vue</p>	<p>1-Cuirasse ferrugineuse: dominée par la cuirasse latéritique caillouteuse nue à gros blocs ou à graviers : deux formes assez différentes de revêtement 2- végétation contractée: brousse dense à bande de végétation régulière (BT) 3- Talus : constitué par les éboulis de cuirasses et de colluvions fixé à certains endroits par la végétation : c'est la zone d'interconnexion entre la surface du plateau et le glacis 4-Mares : présence de mare à certains endroits 5-Placages sableux enherbés à certains endroits</p>	<p>Ruisselle plus sur les surfaces nues et à pente forte et accélère aussi le ravinement La surface cuirassée génère ainsi un fort ruissellement qui s'infiltré dans la bande de végétation contractée Formation des mares à certains endroits Déflation éolienne au niveau des placages sableux Ruissellement concentré et linéaire sur le talus</p>

<p>TP2- Plateau cuirassé à végétation contractée dégradée</p> 	<p>Sylvo-pastoraux dominants</p>	<p>Même structure et organisation que le TP1, seule différence on est en présence d'une diminution du couvert végétal avec une surexploitation forestière (défrichement pour la mise en culture, coupe de bois de chauffe)</p>	<p>1-Cuirasse ferrugineuse: dominée par la cuirasse latéritique caillouteuse nue à gros blocs ou à graviers : deux formes assez différentes de revêtement</p> <p>2- végétation contractée dégradée: végétation dégradée de type tachetée en dégénérescence</p> <p>3-Talus (plus ou moins raide): constitué par les éboulis de cuirasses et de colluvions fixé à certains endroits par la végétation : c'est la zone d'interconnexion entre la surface du plateau et le glaciais</p> <p>4-Mares : présence de mare à certains endroits</p>	<p>Même processus hydrologique que le TP1</p>
<p>TP3- Plateau cuirassé à larges placages sableux cultivés</p> 	<p>Agrosylvo pastoraux</p>	<p>Plateau très plat, horizontal ou faiblement incliné. Contacts par glaciais en périphérie, corniche et talus meurent tranquillement dans les placages sableux</p>	<p>1-Cultures : présence de culture de mil sur placages sableux recouvrant la cuirasse</p> <p>2-Jachères : composé de guiera senegalensis</p> <p>3-Cuirasse ferrugineuse : affleurements de latérite (graviers)</p>	<p>Peu de pente et de cuirasses donc peu de traces de ruissellement : infiltration dans les sables ou formation de mares temporaires correspondants à des dépressions très locales sur la latérite. Dominante de processus éoliens (tendances à la réduction des secteurs</p>

			nue, sans végétation 4-Mares : présence de mare à certains endroits 5-Village : entourés des zones cultivées	de latérite par avancée du sable, fixé par culture et végétation spontanée)
Type Paysager : Famille des paysages des glacis	Usages	Structure / organisation	Composants paysager / éléments caractéristique	Processus & formes géomorphologiques (hydro / éolien)
<p>TP4- Glacis sableux à sol non dégradé, subhorizontaux</p> 	Agro pastoraux	Mosaïque assez équilibrée entre cultures et jachères d'âges variables	<p>1-Cultures : la culture de mil est dominante</p> <p>2-Jachères : anciennes non dégradés</p> <p>2-Arbres isolés sur glacis</p>	Infiltration et déflation éolienne au niveau des champs de cultures caractérisés par l'absence de paillage qui protège le sol et réduit l'action du vent en piégeant le sable
<p>TP5-Glacis sableux à dominante de cultures, peu pentu, peu ou pas dégradé</p> 	Agro pastoraux	Ce sont des glacis les moins pentus, avec de longs versants d'exposition diverse, plus ou moins réguliers ou bosselé (contre-pentes locales déterminant des niveaux bas locaux à mares temporaires) Présence des surfaces indurées nues mais limité, présence de	<p>1-Cultures : la culture de mil est dominante</p> <p>2-Jachères : elles sont d'âge divers, plus nombreuses et plus âgées quand on s'éloigne des villages</p> <p>3- Lentilles de cuirasses :</p> <p>4- Village : avec concentration cultures permanentes autour, zone</p>	Infiltration, déflation éolienne, et présence des dépressions hydro éoliens ainsi que des rigoles

		petites rigoles et de dépressions hydro éoliens isolés)	du puits, chemins, pistes... 5- Mares : elles sont isolées	
<p>TP6- Glacis sableux à dominante de cultures à sol profond, pentus et ravinés</p> 	Agrosylvo pastoraux	Présence de surfaces encroûtées et ravinées, des dépressions hydro éoliens qui entrent en coalescence très vite	1-Cultures : la culture de mil est dominante 2-Jachères : elles sont d'âges divers, (jeunes et anciens) 3- Lentilles de cuirasses : 4- Village : avec concentration cultures permanentes autour, zone du puits, chemins, pistes... 5- Mares 6- Ravines	Ravinements, Infiltration, déflation éolienne, et présence des dépressions hydro éoliens
<p>TP7- Glacis sableux à dominante de jachère et sols dégradés et ravinés</p> 	Sylvo-pastoraux	Des surfaces encroûtées sans végétation, et là où subsiste la végétation on note la présence de prélèvement de bois, toutes les parties encroûtés et ravinées se trouvent sur des fortes pentes et sont surplombés par les talus	1-Jachères : dégradée caractérisée par une présence des zones de sols nus encroûtés et ravinés 2- Lentilles de cuirasses 3- Ravines	Présence de plage nue favorisant l'encroûtement des sols ainsi que la diminution de la capacité d'infiltration, et par conséquent l'accroissement du ruissellement

Type Paysager : Famille des paysages des bas-fonds	Usages	Structure / organisation	Composants paysager / éléments caractéristique	Processus & formes géomorphologiques (hydro / éolien)
<p>TP8- Bas-fonds peu pentu avec mares en cluster durables</p> 	Agro-sylvo pastoraux	Les mares jalonnent la plupart du temps le talweg d'un kori (Secteur de bas-fond centré sur un village : dans le type « auréole villageoise » ; en général le village est à l'articulation glacis/bas-fond)	<p>1-Cultures 2-Mares 3- Village</p>	Présence des eaux de surfaces dans les kori principaux qui sont bien alimentés les mares de bas-fond infiltrent à 75% et évaporent à 25% (thèse JCD)
<p>TP9- Bas-fonds pentus à mares très temporaires</p> 	Agro-sylvo-pastoraux	Charnière entre versants assez étroite, dont la pente ne favorise pas la formation de mares qui durent plusieurs semaines	<p>1-Cultures 2-Mares 3- Village</p>	Présence de zone d'épandage, moins d'écoulement concentré mais plus d'infiltration uniquement en saison de pluie + déflation éolienne

<p>TP10-Cuvette de Sama Dey entre éléments de plateau (photo non disponible) : glacis pentus convergeant vers le bas-fond local intégrant le village</p>	<p>Agro-sylvo-pastoraux</p>	<p>Secteurs localisés de cuvettes enserrés entre plusieurs éléments de plateaux proches les uns des autres (Sama Dey) : Convergence des pentes vers le bas fond (endoréique de la cuvette) Pentes assez soutenues depuis le rebord des éléments de plateau et leur talus bordier surfaces sableuses encroûtées et ravinées</p>	<p>1-Cultures : cultures de mil, avec la présence de nombreux arbres 2-Jachères : d'âge divers en remontant le glacis 3-Mares 4- Village</p>	<p>Mare présente dans la cuvette de Sama Dey</p>
<p>TP11-Aureole d'ensemencement cultivée autour des villages principaux</p> 	<p>Agro-pastoraux</p>	<p>Les villages se trouvent au cœur des zones cultivées</p>	<p>1-Cultures : cultures de mil, sous parc à Gao NB : ce type 11 peut se rencontrer au niveau des TP4, 5, 6, 8 et 9</p>	<p>Présence de petite rigole et déflation éolienne</p>

4.2 Morpho structure + hydro vu par satellite

Un problème de base de notre travail de classification de pixels d'images satellitaires réside dans le fait qu'une confusion de signature spectrale se produit entre les sols nus des plateaux (bandes dénudées de la brousse tigrée) et les sols dégradés des scènes récentes, dans les secteurs ayant été érodés par le ruissellement. De même que le mil peut à certaines périodes de la mousson avoir une signature très proche de celle de la bande végétalisée de la brousse tigrée. On a donc cherché un moyen de séparer les plateaux latéritiques du reste de la topographie. Un seuillage altitudinal n'étant pas suffisant (les plateaux ne sont pas tous à la même altitude dans le degré carré de Niamey, nous avons fait appel à l'hydrogéomorphométrie (Depraetere, 2013).

Les hydrologues et les problématiques qui leur sont familières ont été l'élément moteur de l'évolution de l'hydrogéomorphométrie dont on peut situer la naissance à la charnière des années 70 et 80 : Beven et Kirkby (1979) pour l'estimation des aires contributives dans les bassins versants, Rodriguez-Iturbe et Valdes (1979) pour le concept d'hydrogramme géomorphologique (1979). En hydrogéomorphologie, rivières et talwegs apparaissent indissociables. Il serait vain de rechercher la cause première de leur localisation : est-ce la vallée qui détermine le chemin de la rivière ou l'inverse ?

Les bassins versants, les talwegs et rivières sont les empreintes hydrologiques du paysage et dépendent de l'évolution des niveaux de base globale, régionale et locale. L'ensemble constitue un système emboîté et hiérarchisé qui est au cœur de la pratique hydrogéomorphométrique notamment dans la modélisation hydrologique distribuée. Ainsi, les attendus de l'hydrogéomorphométrie sont de fournir les méthodes permettant de spatialiser les objets hydrologiques (versants, bassins, réseau hydrographique ...) mais aussi les paramètres morphologiques et hydrodynamiques contrôlant les fonctions de production (quantité) et de transfert (vitesse de déplacement) des écoulements au sein de ces arborescences de sous-bassins et de chenaux. L'hydrogéomorphométrie procède du calcul des lignes de plus grande pente (ou lignes de gradient) à partir du champ d'altitude. Dans la pratique, cela revient à établir un graphe de drainage de la surface à partir d'un MNT suffisamment dense et précis pour refléter les systèmes de pente.

La compréhension du lien entre occupation du sol et évolution du cycle hydrologique passe par une compréhension de la distribution des unités morpho hydrologiques. Préalablement à la classification de l'occupation de sol deux méthodes ont été testées pour définir les entités du paysage de la zone d'étude :

- la lecture et photo-interprétation du paysage à partir du terrain et de l'image (4-1 ci-dessus);
- la segmentation automatique du paysage par approche hydrogéomorphométrique.

Cette approche permet d'isoler des unités fonctionnelles qui sont des entités objectives du paysage. Une exploration de la distribution des pentes et des altitudes est effectuée. Les bassins versants et sous

bassins versants ont été déterminés ainsi que les massifs. Ce dernier correspond à l'ensemble des lignes de montée maximales qui convergent vers un maximal local (figure 56 du mémoire HDR de Christian Depraetere, 2013). Dans la figure 29 on a superposé les limites des unités hydro morphologiques. Le trait noir le plus fin délimite le massif élémentaire.

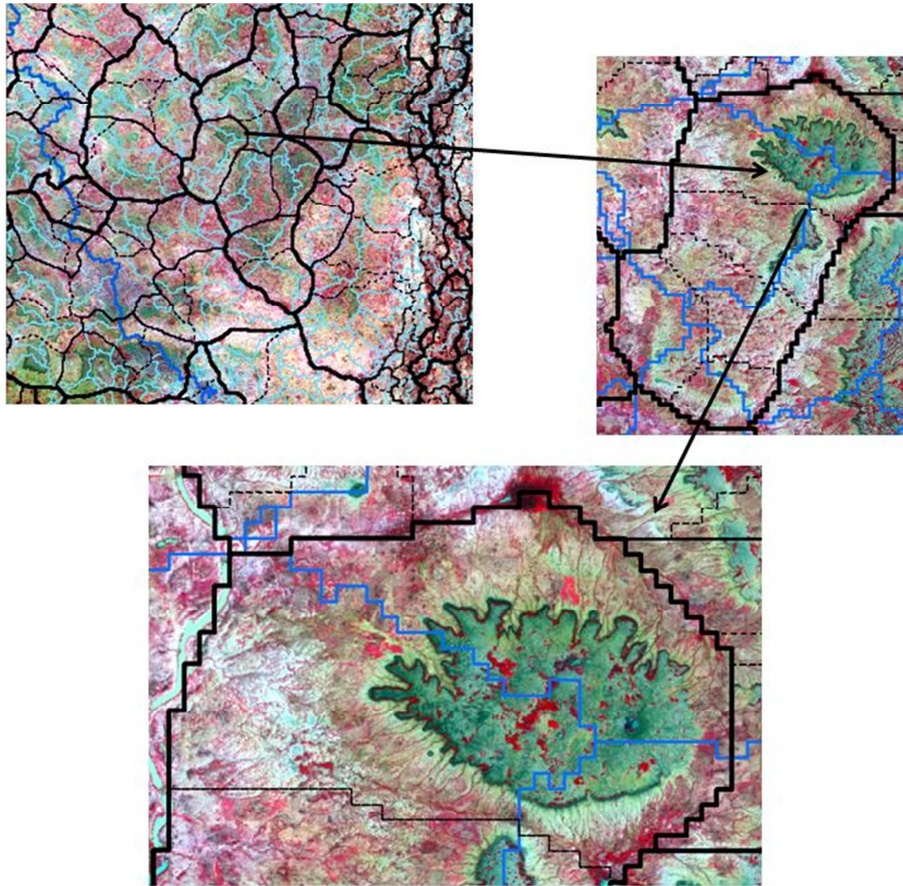


Figure 29. Différents niveaux de massifs, ségrévés par hydro géo morphométrie (Depraetere, 2013)

Chaque unité ne comporte qu'un seul sommet. Le trait le plus épais délimite un massif de niveau 3 qui correspond à l'agrégation successive des massifs appartenant aux niveaux inférieurs. Le trait bleu correspond à la délimitation des sous bassins versants. On note que le massif correspond à une unité morphologique plus homogène que le bassin versant. Le massif est composé d'un plateau et des glacis qui l'entourent. Le massif de la figure 29 est segmenté en trois versants avec des glacis de longueurs différentes. Le talus est très disséqué et à certains endroits il disparaît. C'est en lien avec la différence entre la hauteur du plateau et le niveau de base.

Sur la figure 30 sont présentées en jaune les types paysagers tels que définis dans la section 4.1 et en noir les massifs. On note que les types plateaux cuirassés à végétation contractée (TP1 et TP2) lorsqu'ils sont minoritaires deviennent un composant du massif. Le glacis sableux à sol non dégradé (TP5) correspond à un massif bien individualisé. Le type paysager TP8 correspondant à des bas-fonds avec la présence de mares en cluster, il ne coïncide pas avec une unité hydro morpho mais suit la ligne de talweg.

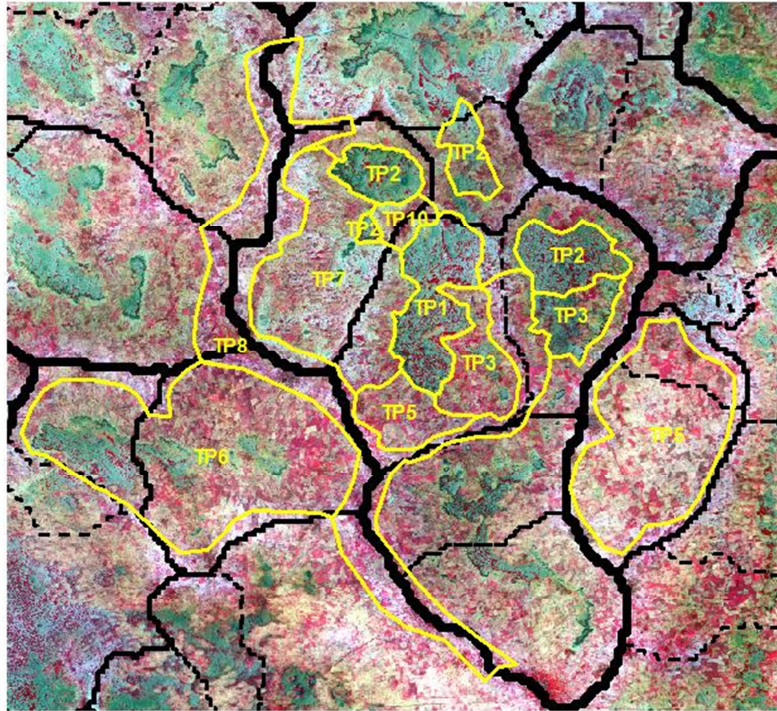


Figure 30. Types paysagers (voir 4-1, tableau 4) et massifs individualisés par hydrogéomorphométrie (Depraetere, 2013)

La classification de l'occupation du sol par la méthode pixel présente un inconvénient. Des objets différents peuvent être très proches radiométriquement et donc impossible à différencier. C'est le cas par exemple de la végétation contractée des plateaux et des cultures sur glacis. La zone d'étude étant très étendue il est nécessaire de recourir à une segmentation automatique qui permettra de séparer les plateaux des glacis. Lorsque l'on étudie les propriétés de pentes et des altitudes on note que 3 éléments sont parfaitement identifiables :

- Les plateaux en rose sur la figure 31 présentent les altitudes les plus hautes et des pentes faibles ;
- les talus et rebord de plateau ont des altitudes moyennes et les pentes les plus élevées;
- les glacis ont des pentes supérieures aux plateaux et des altitudes plus faibles.

Altitude relative	Indice de pentes			
	<=1%	<=1.5%	<=2%	>2%
< 10	0			
[10; 15[
[15; 20[
[20; 25[
[25; 30[
>30	---		---	---

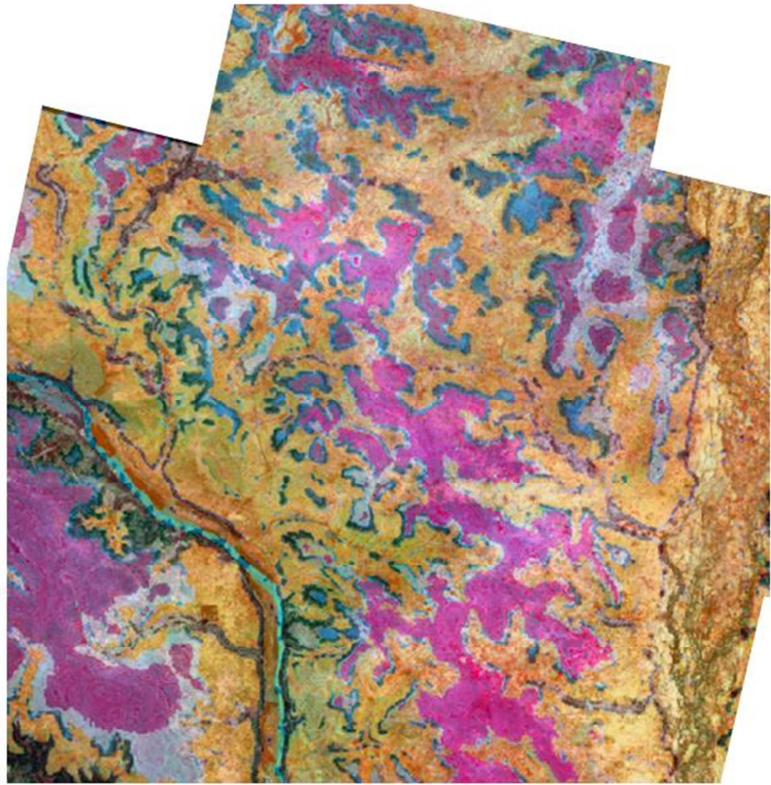


Figure 31. Segmentation hypercube réalisée pour séparer les plateaux du reste du paysage pour éviter les confusions de classes de végétation

La segmentation de la figure 31 a été réalisée en utilisant le principe de la méthode Hypercube. Deux informations binaires ont été définies : le 1 qui correspond au cas favorable et le 0 pour les cas défavorables. Pour individualiser les plateaux nous avons retenu les critères d'altitude relative (Z°) et de pentes modèles. Les pentes et les altitudes relatives ont été lissées deux fois, ce qui explique les seuils assez bas des pentes. On ne peut donc pas parler de pentes mais d'indice de pentes. Nous ne prétendons pas donner une mesure physique de la pente mais une valeur corrélée à l'importance de cette pente. Ainsi, une analyse de correspondance a été réalisée de façon empirique à partir de l'écran sur la région de Dantiandou. Les informations ont été ensuite combinées et ont permis de connaître les cas favorables pour avoir la présence d'un plateau. La couche d'information résultante a été utilisée comme masque dans la classification.

Les résultats ne sont pas totalement satisfaisant probablement du fait que la surface de tendance n'est pas suffisamment bien ajustée. Nous pourrions améliorer cela en tenant compte par exemple de la distance au talweg, en travaillant avec un MNT plus précis sur les courbures.

L'extraction des massifs revient à segmenter l'espace en fonction des points hauts en suivant les lignes de montée maximale (Figure 32 A) alors que c'est l'inverse pour les bassins versants qui sont structurés autour des points bas selon les lignes de descente maximale formant le réseau de talwegs (Figure 32 B). Les lignes de montée maximale convergent pour former un réseau hiérarchisé de crêtes.

Comme pour les bassins pour lesquels il est possible de choisir a priori la position d'un ou plusieurs exutoires, les massifs peuvent être définis en fonction d'un ou plusieurs sommets définis par l'utilisateur. A titre d'exemple, sept sommets principaux de l'île de la Martinique servent à définir autant de massifs dont les crêtes (Figure 32 B) convergent vers ces maxima locaux (figure 32 A). Cette étape définit les massifs élémentaires. Partant de ceux-ci et à l'instar de ce qui est fait pour les bassins versants avec les dépressions fermées, les lignes de montée maximale seront forcées au droit des sommets non sélectionnés pour rejoindre le col voisin le moins élevé, le processus étant itéré jusqu'à atteindre un sommet sélectionné.

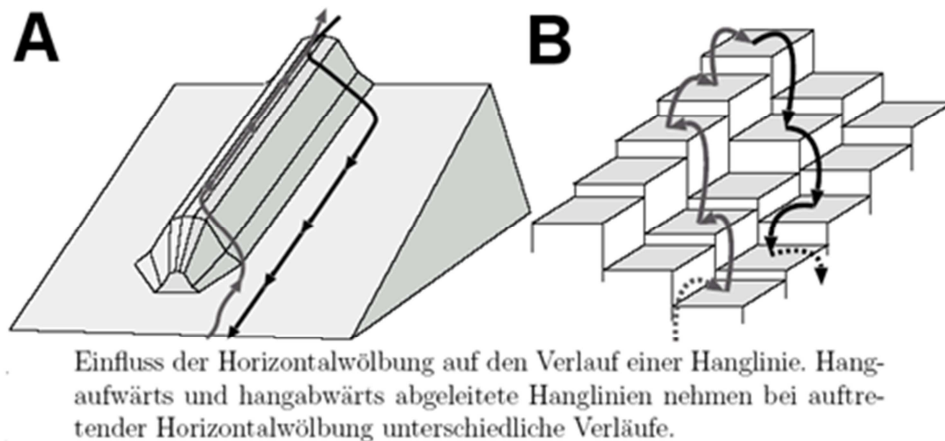


Figure 32 : Lignes de descente et de montée maximale selon Rasemann (2003) (in Depraetere, 2013). On notera que les secondes ne sont pas les inverses des premières.

L'alternative revient à proposer une méthode de hiérarchisation des massifs qui comme la précédente part des massifs élémentaires. En ce cas, les massifs vont être fusionnés pas à pas en plusieurs étapes jusqu'à ce que l'ensemble des lignes de montée maximale convergent vers le sommet le plus élevé formant ainsi un seul massif couvrant l'ensemble de la zone étudiée. Le nombre d'itération et donc d'étapes de fusionnement va dépendre du degré d'emboîtement des massifs les uns dans les autres, générant à chaque étape une partition en massifs de plus en plus grands. Le principe élémentaire de fusionnement d'un massif (M_i) dans un de ses voisins revient à considérer le col-déversoir (col le plus bas) situé sur les bords de ce massif (CD_i) et de le fusionner si et seulement si l'altitude du sommet (So_j) du massif connecté (M_j) au massif considéré par le col-déversoir est supérieure ou égale à celle du sommet du massif considéré (Depraetere, 2013).

4.3 Synthèse apport paysage + morpho structure

Cette méthode nous a permis de ségréger les plateaux et de ce fait, de pouvoir appliquer les classifications sur les deux ensembles, plateau et non plateau, condition indispensable à une bonne classification, du fait des confusions possibles entre les végétations denses de plateaux (BT) et de

vallées (mil, fourrés) et aussi des zones de sol nu (bande nue de la BT sur plateaux), et des zones dégradées hors plateau.

Les plateaux latéritiques sont donc traités complètement indépendamment et constituent un masque quand on s'intéresse à l'ensemble des zones agricoles, à l'exception de certains placages sableux restant sur les plateaux et qui ont tous été mis en valeur ces dernières années, devant le manque de terres à cultiver (hausse de la demande alimentaire non accompagnée d'une hausse des rendements agricoles).

Ceci sera appliqué dans le chapitre 5. Il est en effet indispensable de ségréger ces deux ensembles très indépendants l'un de l'autre et d'y appliquer deux classifications différentes, qui sont superposées à la fin.

CHAPITRE 5 : Dynamique de l'occupation des sols dans la commune de Dantiandou et dans le degré carré de Niamey

5.1 Méthodes

5.1.1 Zone d'étude

Cette étude a été effectuée dans la commune de Dantiandou, elle est localisée à l'est de Niamey et couvre une superficie de 789 Km². Mais l'étude a été réalisée sur une zone de 773 km², ce choix est dû à l'absence de la scène couvrant le bout nord-ouest des images de 1986 et 2010 au moment du traitement des données (figure 33). Cependant, par la suite nous avons pu trouver la scène complétant la commune de Dantiandou pour 2010 mais pas pour 1986. Ainsi, nous avons préféré faire la comparaison des images sur les mêmes superficies communes au trois images, en mettant toutefois en annexe les cartes de 2007 et 2010 couvrant la commune entière.

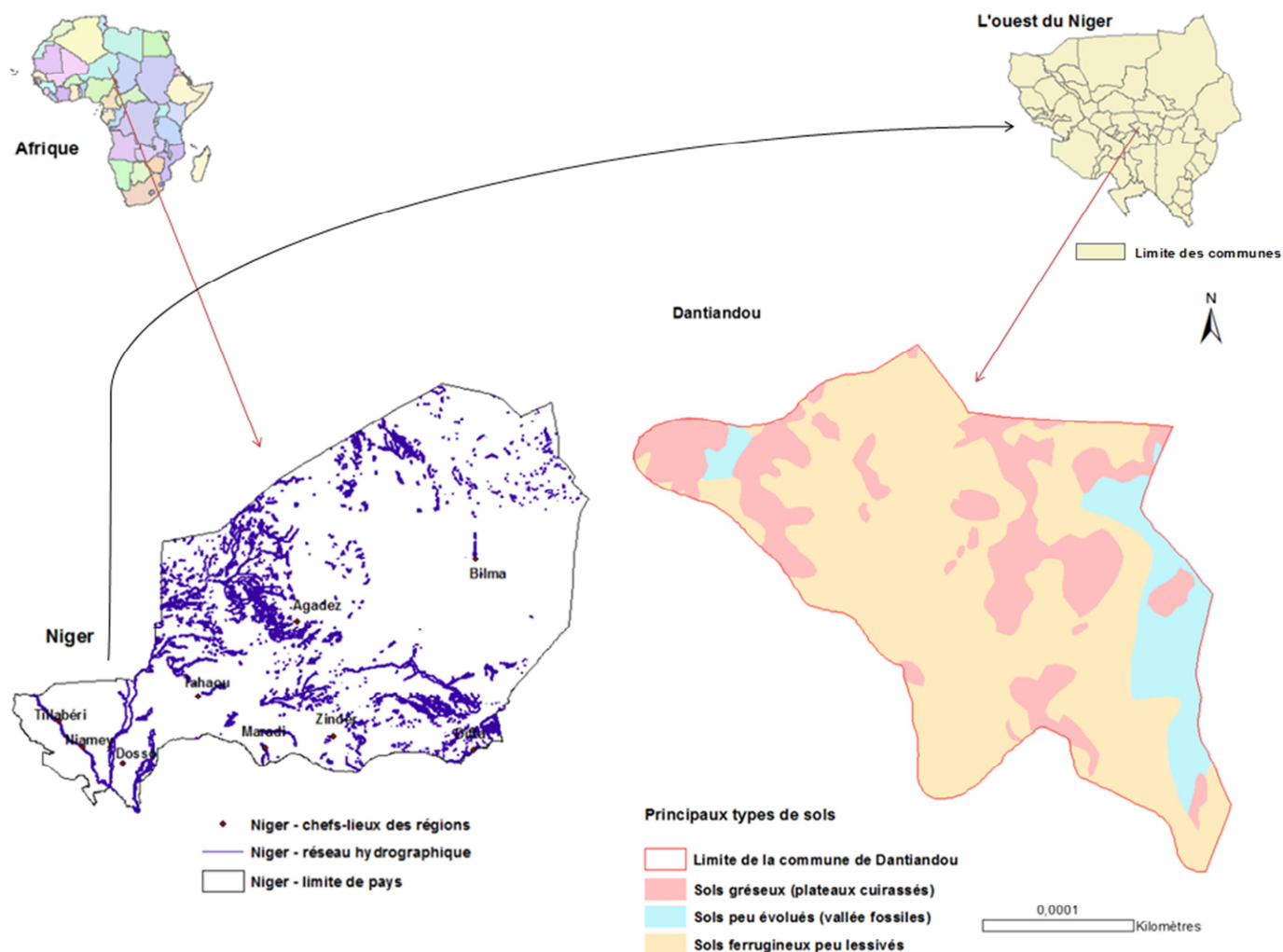


Figure 33. Localisation de la commune de Dantiandou

5.1.2 Critique des données

Le traitement des images multi-sources est complexe en général. Leur analyse implique des procédures techniques et des choix spécifiques adaptés. En effet, les corrections géométriques et radiométriques font partie de ces opérations de traitements d'images qui permettent la mise en forme des données ainsi que la diminution des perturbations radiométriques liées aux conditions environnementales. On dispose ainsi de nombreux procédés pour la réalisation de ces opérations, d'où le choix d'une méthode appropriée afin d'obtenir des résultats de qualité.

Concernant les corrections radiométriques, elles sont nécessaires pour la rectification spectrale des images satellitaires et aussi indispensables dans le cadre d'une analyse multi-temporelle. Ces corrections consistent, à partir d'une image de télédétection, à convertir les comptes numériques en luminance puis en réflectance exo-atmosphérique et en réflectance atmosphérique. En ce qui nous concerne, nous avons seulement effectué les deux premiers traitements. L'idéal serait de supprimer totalement les effets liés à l'atmosphère mais compte tenu de la non-disponibilité de l'information sur les paramètres atmosphériques au moment des prises de vue, cela n'a pas été réalisé.

5.2 Techniques de prétraitement

Les trois images SPOT utilisées dans cette étude sont de niveau 1A. Pour ce niveau, les corrections radiométriques des distorsions dues aux écarts de sensibilité entre les détecteurs élémentaires de l'instrument de prise de vue sont déjà effectuées. Les images sont constituées de pixels dont les valeurs exprimées en compte numérique (CN) varient entre 0 et 255 pour un codage en huit bits. Pour comparer ces images de dates différentes, elles ont été calibrées. Il s'agit de la transformation des comptes numériques en radiance, puis en réflectance. Elles ont ensuite été ortho rectifiées en 2A.

Etant donné que les trois images sont de résolutions différentes 1986 (20m), 2007 (20m), 2010 (10m), nous avons donc, ré-échantillonné l'image de 2010 par rapport à celles qui ont la plus basse résolution spatiale (20m). Le traitement des images satellites a consisté ensuite, à géo-référencer l'image SPOT de 2010 à partir des points GPS pris sur le terrain. Et c'est à partir de cette image que les deux autres ont été rectifiées. Il s'agit donc d'une rectification de type image à image. La méthode de rectification utilisée est le polynôme de second degré avec comme ré-échantillonnage l'interpolation bilinéaire. L'objectif du ré-échantillonnage des images à une résolution commune est de générer une unité structurale de pixels de taille uniforme afin de placer toutes les images satellites à la même échelle de représentation (Ruelland *et al.* 2011). Après les corrections géométriques et radiométriques, nous avons procédé aux calculs des indices. Il s'agit de l'Indice Normalisé de la Végétation (NDVI), de l'Indice de brillance (IB), l'Indice Normalisé d'Humidité (INH), du MSAVI et de l'indice de coloration (IC).

5.3 Signatures spectrales des éléments et des composants du paysage visible par télédétection

5.3.1 Méthodologie générale d'extraction de l'information

La figure 34 résume la méthodologie décrite dans les sous chapitres 3 (§3.2.2.1 & 3.2.2.2) et 5.1 concernant le traitement et l'extraction de l'information des images satellites.

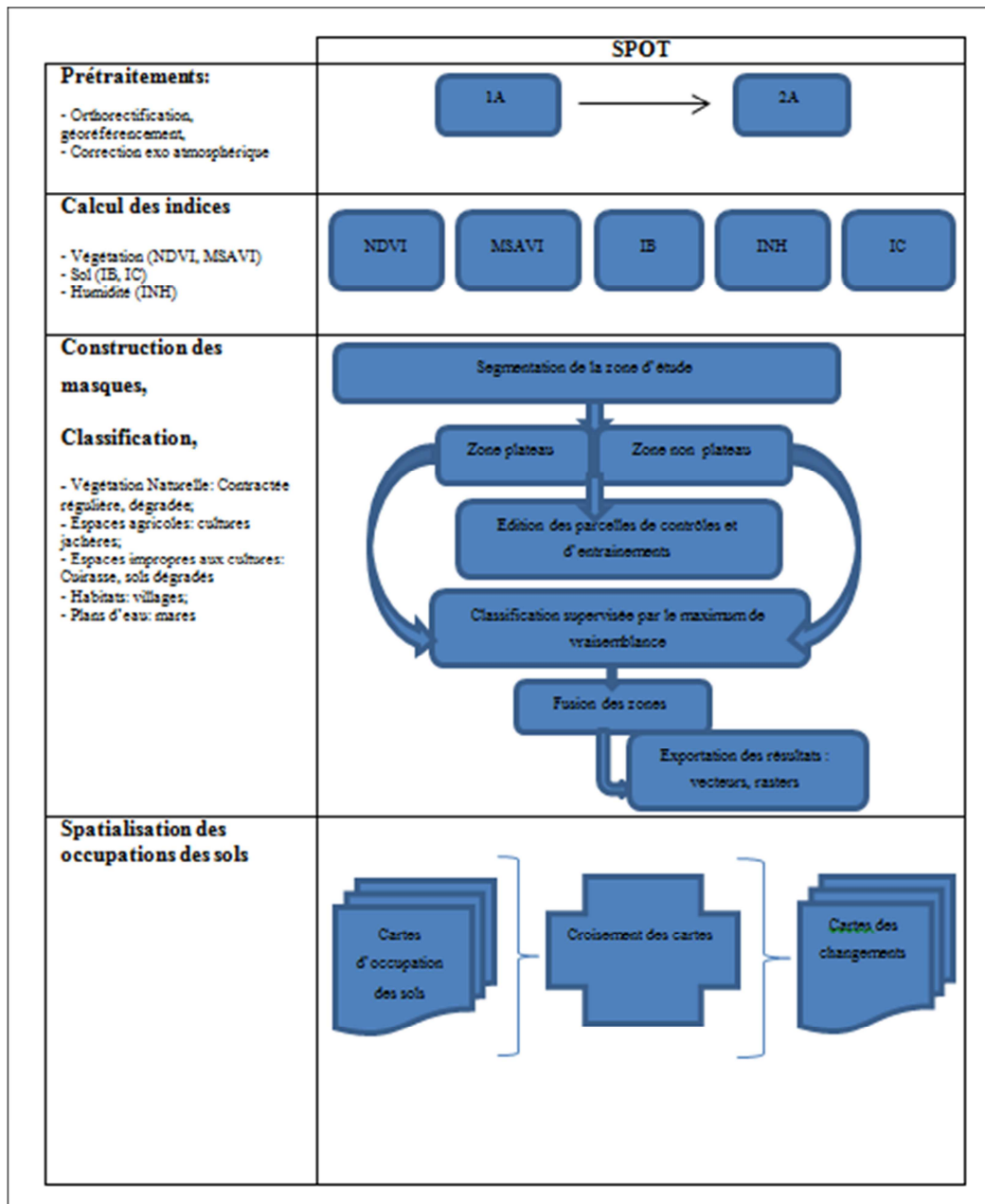


Figure 34. Schéma montrant la méthode adoptée pour extraire l'information

Cette méthodologie est basée sur la classification des unités d'occupation des sols à travers le calcul et l'utilisation des indices spectraux issus des images satellites.

5.3.2 Analyse

La figure 35 présente les signatures spectrales des bandes originales des images et de leurs indices. Ces signatures spectrales permettent d'analyser les comportements spectraux des zones d'entraînement.



Figure 35. Signatures spectrales des zones d'entraînement

L'analyse de la moyenne des réponses spectrales des zones d'entraînement pour 1986 (fig. 35) révèle dans les différents canaux une bonne séparabilité des classes aussi bien sur la zone plateau que sur la zone non plateau. On constate que les classes des sols (nus & dégradés), ont les valeurs les plus faibles dans le canal NDVI. Et la classe fourré est celle qui présente les valeurs les plus élevées au niveau de

ce canal. Les classes de sols nus ont les plus fortes valeurs dans les canaux du visible (vert, rouge), toutefois dans le proche infrarouge les sols dégradés révèlent des valeurs faibles par rapport aux classes de cultures, de jachères récentes et de fourrés. Au niveau de l'indice de brillance et de l'indice de coloration, elles présentent aussi des valeurs élevées. Leurs plus faibles valeurs sont observées surtout au niveau des indices NDVI, INH, et MSAVI. Toutefois, on constate que les classes de fourrés, jachères et cultures ont des valeurs relativement élevées au niveau de l'indice de brillance, en général dues à la présence d'une quantité de réflectance élevée des sols dans ces zones (pixels de végétation non homogène).

Pour la végétation contractée (régulière et dégradée) de la zone plateau, on constate que la végétation contractée régulière réfléchit moins dans le canal rouge que celle qui est en dégénérescence (dégradée), qui certes a des valeurs relativement plus élevées que la régulière. Cette dernière (BTD) réfléchit aussi plus dans le proche infrarouge. Ses valeurs élevées dans ces canaux par rapport à la végétation contractée régulière s'explique par la présence en son sein d'une quantité de sols relativement plus réfléchissante que la végétation et aussi parce que la structure de ses feuilles est moins dense.

Pour ce qui est de l'examen de la moyenne des signatures spectrales des parcelles d'entraînement ayant servi à la classification de 2007, (fig.35), on constate qu'au niveau de la zone non plateau la séparabilité des classes est relativement bonne à tous les niveaux, sauf pour les classes jachères (anciennes et récentes) où la séparabilité est moins bonne au niveau du NDVI et de l'INH et au niveau du MSAVI entre les classes de cultures, jachères récentes et sols nus. On constate une meilleure discrimination des classes au niveau des canaux du visible. Au niveau du canal MSAVI, la classe sol dégradé est nettement distinguée des autres classes. On constate une faible discrimination des classes au niveau de l'indice IC. Dans le visible, la réflectance de la végétation est en général faible, elle réfléchit faiblement dans le vert, absorbe dans le rouge et réfléchit fortement dans le proche infrarouge, on observe certes que la classe fourré réfléchit bien dans le proche infrarouge mais moins par rapport aux classes cultures, jachères et sols qui ont des valeurs plus élevées. Toutefois en fonction de la structure générale des feuilles et de l'importance de la biomasse on a des valeurs plus ou moins fortes des végétaux dans ce canal, ce qui explique la faible réflectance des fourrés. Sur la zone plateau en 2007, on note une bonne discrimination des classes. On constate que les signatures spectrales des classes sont clairement distinguables les unes par rapport aux autres, par contre, on note que la distinction des classes végétation contractée régulière et cuirasse ferrugineuse au niveau de l'indice IB est moins bonne.

Pour 2010, l'analyse des réponses spectrales des canaux et des indices montre aussi une bonne discrimination entre les classes d'occupation, particulièrement au niveau du canal vert, du canal rouge, de l'indice NDVI, du MSAVI, et de l'IC. Cette discrimination est par contre mauvaise au niveau du PIR et de l'INH. On constate surtout une mauvaise distinction entre les classes sols nus et jachères

récentes au niveau des canaux PIR et MIR. Concernant les jachères anciennes et récentes, elles sont distinctes seulement au niveau des canaux vert et rouge.

Pour la zone plateau, en 2010, on observe également une bonne distinction entre les classes. Toutefois, la discrimination entre la végétation contractée régulière et dégradée est mauvaise au niveau des indices INH et IB.

5.3.3 Classification

L'approche utilisée dans cette étude est la classification supervisée. L'algorithme utilisé pour le traitement de ces images a été le maximum de vraisemblance. Il s'agit d'un algorithme qui est recommandé par plusieurs auteurs, parce qu'il semble produire les meilleurs résultats. Cet algorithme exige aussi de l'interprète une connaissance du terrain, afin de mieux repérer les zones d'entraînement (les échantillons qui servent à la classification). La méthode consiste donc à sélectionner des zones d'entraînement correspondant à des régions homogènes sur l'image et dont on connaît l'occupation. Cette méthode de classification par le maximum de vraisemblance calcule la probabilité d'appartenance d'un pixel à une classe donnée. Le pixel sera ensuite affecté à la classe pour laquelle la probabilité est la plus forte.

Pour éviter un maximum de confusion entre la végétation de la brousse tigrée située sur les plateaux et celle des zones hors plateau et aussi avec les cultures, notre zone d'étude a été subdivisée en deux sous-zones, à savoir en zone plateau et non plateau. Et sur chacune de ces zones des parcelles d'entraînement ont été dessinées. Toutefois certaines classes d'occupation du sol ont été masquées, afin d'éviter également un certain nombre de confusions avec d'autres classes d'occupations spectralement proches. Sur la zone non plateau, les classes d'occupation masquées étaient les mares, les villages. Une fois les zones d'entraînement choisies, nous avons procédé à la classification.

Pour mieux interpréter les images, nous avons testé la classification sur plusieurs types de compositions colorées et en faisant aussi varier les seuils des parcelles d'entraînement afin de voir celles qui donnent un bon résultat. Et au final, les bandes spectrales choisies pour lancer la classification ont été la composition colorée des indices NDVI, de l'indice IB et du canal vert remplacé des fois par l'indice INH

5.4 Résultats

5.4.1 Analyse de la matrice de confusion, et de l'exactitude de la classification pour 1986

L'analyse de la matrice de confusion et l'exactitude de la classification de la zone non plateau pour 1986 (tableaux 5 et 6) montre une classification de bonne qualité, vue la précision générale qui est de

92.57%, (on a (13720/14822) pixels qui ont été bien classifiés) et le coefficient kappa qui est de 0.8961. En règle générale, dans la littérature le niveau de précision générale est considéré comme étant acceptable à partir de 85%. Les nombres situés sur la diagonale (tableau 5) correspondent aux proportions de pixels bien classifiés. On constate que les pourcentages des pixels bien classés varient entre 50% et 100%. La classe 3 « jachère récente » semble être la moins bien classée. L'analyse des résultats classe par classe, montre en effet, que la plus forte imprécision a lieu au niveau de cette classe « jachère récente », où 50,46% des pixels de cette classe ont été affectés aux autres classes des données de référence dont 25,61% à la classe « Culture », et 24,85% à la classe « jachère ancienne ». Quand on prend l'exemple de la classe « sol dégradé », on constate que 4,96 % des pixels de cette classe sont attribués aussi à la classe « jachère ancienne » et 2,69% à la classe « sol nu meuble ». De ce fait, pour le producteur 92,36% des pixels affectés à la classe «sol dégradé» appartiennent bien à la classe de référence «sol dégradé» (données référence) et 49,54% pixels affectés à la classe «jachère récente» appartiennent aussi à cette classe de référence. Les classes dont les pixels ont été les moins affectés à d'autres et n'ayant pas reçu de pixels issus de données de référence sont les classes « Culture », « Sol nu».

Tableau 5 : Matrice de confusion de la zone non plateau en 1986

Parcelle de contrôle (%)

Classe	1	2	3	4	5	6	Total
1	100,00	3,97	25,61	0,00	0,00	7,87	43,78
2	0,00	85,51	24,85	0,00	4,96	0,74	23,96
3	0,00	10,49	49,54	0,00	0,00	8,94	5,54
4	0,00	0,00	0,00	100	2,69	0,00	18,47
5	0,00	0,00	0,00	0,00	92,36	0,00	3,02
6	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	82,45	5,24
Total	100	100	100	100	100	100	100

1= Culture, 2= Jachère ancienne, 3= Jachère récente, 4= Sol nu, 5= Sol dégradé, 6=Fourré, arbre isolé, ripisylve

Tableau 6. Erreur de commission et d'omission pour la classification de 1986 en zone non plateau

Classe	Erreurs Commission (%)	Erreurs Omission (%)	Précision pour le producteur (%)	Précision pour l'utilisateur (%)
1	6.13	0.00	100.00	93.87
2	5.46	14.49	85.51	94.54
3	60.41	50.46	49.54	39.59
4	0.47	0.00	100.00	99.53
5	0.00	7.64	92.36	100.00
6	0.13	17.55	82.45	99.87

Les résultats de l'analyse de la matrice de confusion et de l'exactitude de la classification de la zone plateau montrent une qualité meilleure que ceux obtenus pour la zone non plateau. Avec une précision générale de 99,4466%, et un coefficient kappa à 0,9916. Ainsi, on constate que les pixels des classes issues des autres données de référence affectés aux classes « Végétation contractée régulière », « Végétation contractée régulière dégradée », et « Cuirasse ferrugineuse » sont moindre, ils sont respectivement de 0,09%, 0,14% et 1,54% (Tableau 7). Concernant le déficit (omission), pour ces classes, respectivement 0,98%, 0,39% et 0,31% des pixels issus de ces classes ont été affectés à d'autres classes. Concernant la précision pour le réalisateur et l'utilisateur elle est à plus de 98% (Tableau 8).

Tableau 7. Matrice de confusion de la zone plateau en 1986

Classification	Parcelle de contrôle (%)			Total
	1	2	3	
7	99.02	0.00	0.10	30.81
8	0.00	99.61	0.21	40.70
9	0.9	0.39	99.69	28.45
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

7=Végétation contractée régulière, 8= Végétation contracté régulière dégradée, 9=Cuirasse ferrugineuse

Tableau 8. Erreur de commission et d'omission pour la classification de 1986 plateau

Classification	Erreur d'excédents (commission)	Erreur de déficits (omission)	Précision pour le réalisateur	Précision pour l'utilisateur
7	0.09	0.98	99.02	99.91
8	0.14	0.39	99.61	99.86
9	1.54	0.31	99.69	98.46

5.4.2 Analyse de la matrice de confusion, et de l'exactitude de la classification pour 2007

L'analyse de la matrice de confusion de la classification de 2007 (Tableau 18 en annexe) pour la zone non plateau donne une précision générale relativement bonne, elle est de 92,78%. Et un coefficient kappa de 0,913. On observe que les proportions des pixels bien classés sont toutes supérieures à 84 %. Concernant les erreurs d'excédent (tableau 19 en annexe), on constate que 20,75 % des pixels issus des autres classes ont été affectés à la classe culture à l'exception de la classe « sol dégradé ». Et c'est seulement 0,95 % des pixels appartenant à l'échantillon de référence « culture » qui a été affecté à la classe « Fourré, arbre isolé, ripisylve ». Pour ce qui est des erreurs déficits, le tableau 18 révèle que les proportions des pixels les plus élevés appartenant aux échantillons de référence qui ont été affectés à d'autres classes sont celles de la « Jachère ancienne » et de la « Jachère récente » avec respectivement

15,25 % et 11,62 %. L'examen des résultats sous l'angle du producteur et de l'utilisateur donne quand on prend l'exemple de la « culture » une précision de 99,05 % pour le réalisateur, alors qu'elle est de 79,25 % pour l'utilisateur, par contre concernant la classe « Sol nu meuble », la précision pour le réalisateur est de 93,01% et pour l'utilisateur, il est de 100 %.

La précision globale de la classification de la zone plateau 2007 est de 97.6%, avec un coefficient kappa de 0,9635 % (Tableaux 20 et 21 en annexe). A ce niveau, toutes les classes ont une proportion de pixels bien classés supérieure à 92%. La classe ayant le plus d'erreur d'excédent est la « végétation contractée régulière dégradée » avec 4,55 % des pixels reçus et celle qui a le plus de déficits est la « cuirasse ferrugineuse» avec 5,90 % des pixels. On constate également que la précision aussi bien pour l'utilisateur que pour le réalisateur dépasse 94 %.

5.4.3 Analyse de la matrice de confusion, et de l'exactitude de la classification pour 2010

L'évaluation de la matrice de confusion de 2010 pour la zone non plateau donne une précision générale de 91,23%, et un coefficient kappa de 0,8794 (Tableau 22 en annexe). Quand on la compare à celle de 1986, elle est relativement moins bonne. L'analyse montre que la plus forte imprécision a lieu au niveau de la classe « *Sol nu meuble* », où on constate que l'erreur de déficits révèle que 58,49% des pixels appartenant à cette classe sont affectés à la classe « *Jachère ancienne* ». On note toutefois que cette classe n'a pas reçu de pixels excédents, c'est-à-dire issus des autres classes de référence. Ce déficit au niveau de la classe « *Sol nu meuble* », n'est pas le cas puisqu'en réalité la majorité des jachères anciennes en 2010 sont constituées d'une proportion importante de sol nu parsemé de quelques *guiera* clairsemés (arbuste le plus fréquent la jachère). Ce qui explique sur le tableau de la matrice de confusion un faible pourcentage de pixels bien classifiés concernant la classe « *Sol nu meuble* ». Aussi l'interprétation visuelle du résultat de la classification révèle moins de confusion pour ces deux classes.

La seconde classe qui a le plus de pourcentage de déficits après la classe « *Sol nu meuble* » est la classe « *Fourré, arbre isolé, ripisylve* », avec un taux de déficits de 17,43%. On remarque que toutes les classes à l'exception de la classe « *Sol nu meuble* » et « *Fourré, arbre isolé, ripisylve* » ont reçu des pixels appartenant à d'autres groupes de classes. Et celle qui a une proportion relativement importante d'erreur d'excédent est la classe « *Jachère ancienne* ».

Concernant la zone plateau pour la même année (2010) (Tableau 23 en annexe), l'évaluation de la matrice donne une précision générale de 98,18%, et un coefficient kappa de 0,9706. On remarque à ce niveau un taux d'excédent relativement élevé au niveau de la classe « *Cuirasse ferrugineuse* » soit 3,70% des pixels affectés à cette classe, par rapport aux deux autres classes où il est nul (Tableau 24 en annexe). Et aussi un taux d'omission élevé pour les deux premières classes « *Végétation contractée régulière* » et « *Végétation contractée irrégulière* » avec respectivement 3,88% et 3,23% des pixels de ces classes affectées à d'autres.

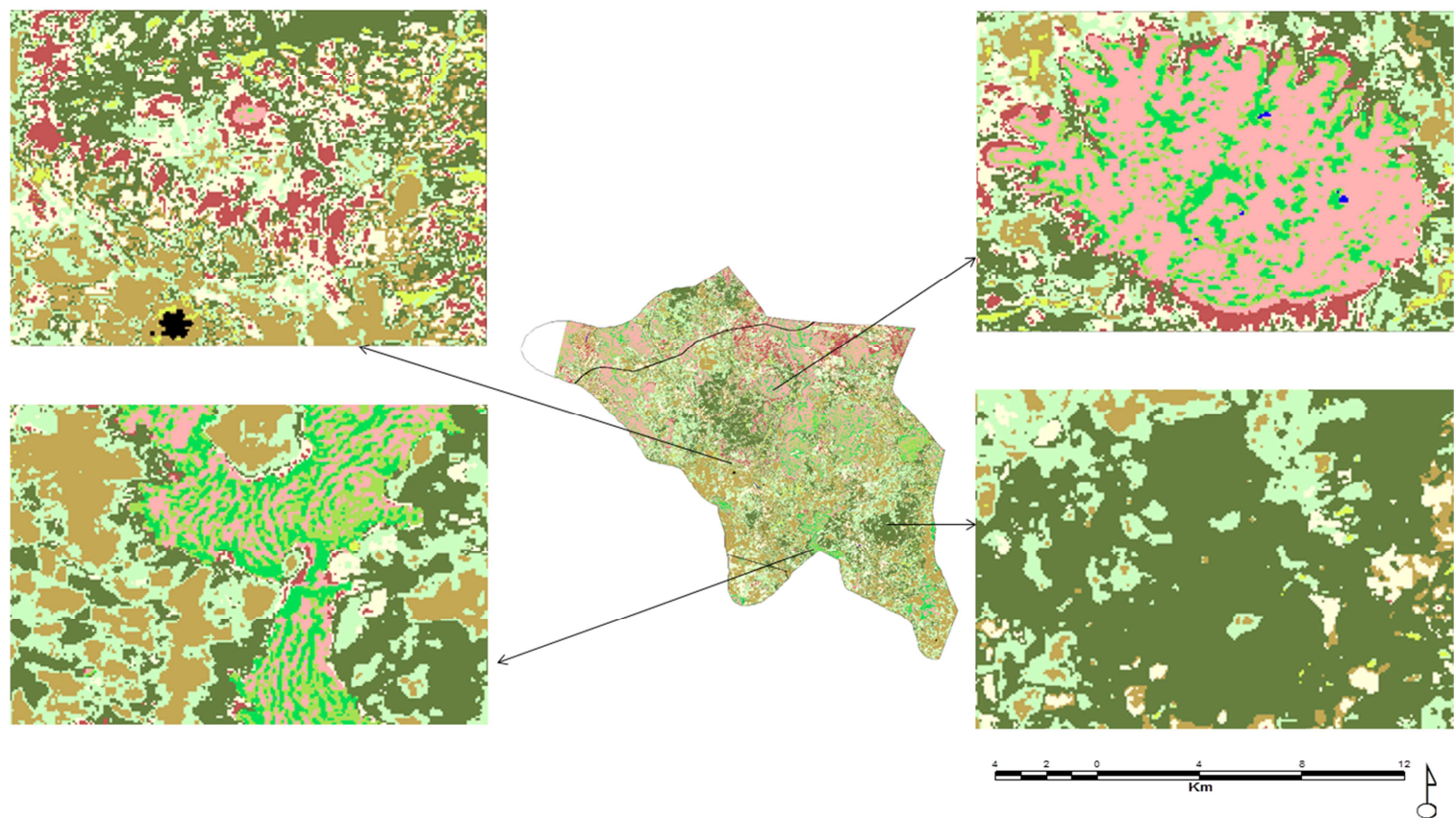
5.5 Analyse de l'évolution de l'occupation des sols

5.5.1 Cartographie de l'occupation des sols en 1986, 2007 et 2010

La commune de Dantiandou fait partie d'une région qui a été très étudiée ces dernières décennies, tant en matière de sciences de l'environnement (expériences HAPEX Sahel et AMMA) qu'en termes de sciences sociales (entre autres de nombreuses et minutieuses enquêtes menées par une équipe ICRISAT-ILRI sur les activités pastorales, primordiales dans cette région semi-aride).

Cette commune fait partie de l'aurole touchée par les activités et ressources nécessaires à la ville de Niamey, avant tout les prélèvements de bois énergie et de fourrage. Elle est donc touchée par la forte croissance de sa population et plus encore par la très forte croissance de la population urbaine, dans la capitale toute proche.

Nous proposons ici une classification pour 1986, 2007 et 2010 (figures 36, 37 et 38) ce qui nous permettra de faire une analyse de l'évolution de l'occupation des sols. Celle-ci, et son extension au degré carré pour 2010 (voir ci-dessous chapitre 5-6) sera comparée au chapitre 7 avec des travaux réalisés dans la sous-région.



Occupation des sols 1986

Végétation naturelle

- Contractée régulière
- Contractée dégradée
- Fourré, arbre isolé, ripisylve

Espaces agricoles

- Culture
- Jachère ancienne

Espaces impropres aux cultures

- Jachère récente
- Sol nu meuble
- Cuirasse ferrugineuse
- Sol dégradé

Réseau, Habitats, Plans d'eau

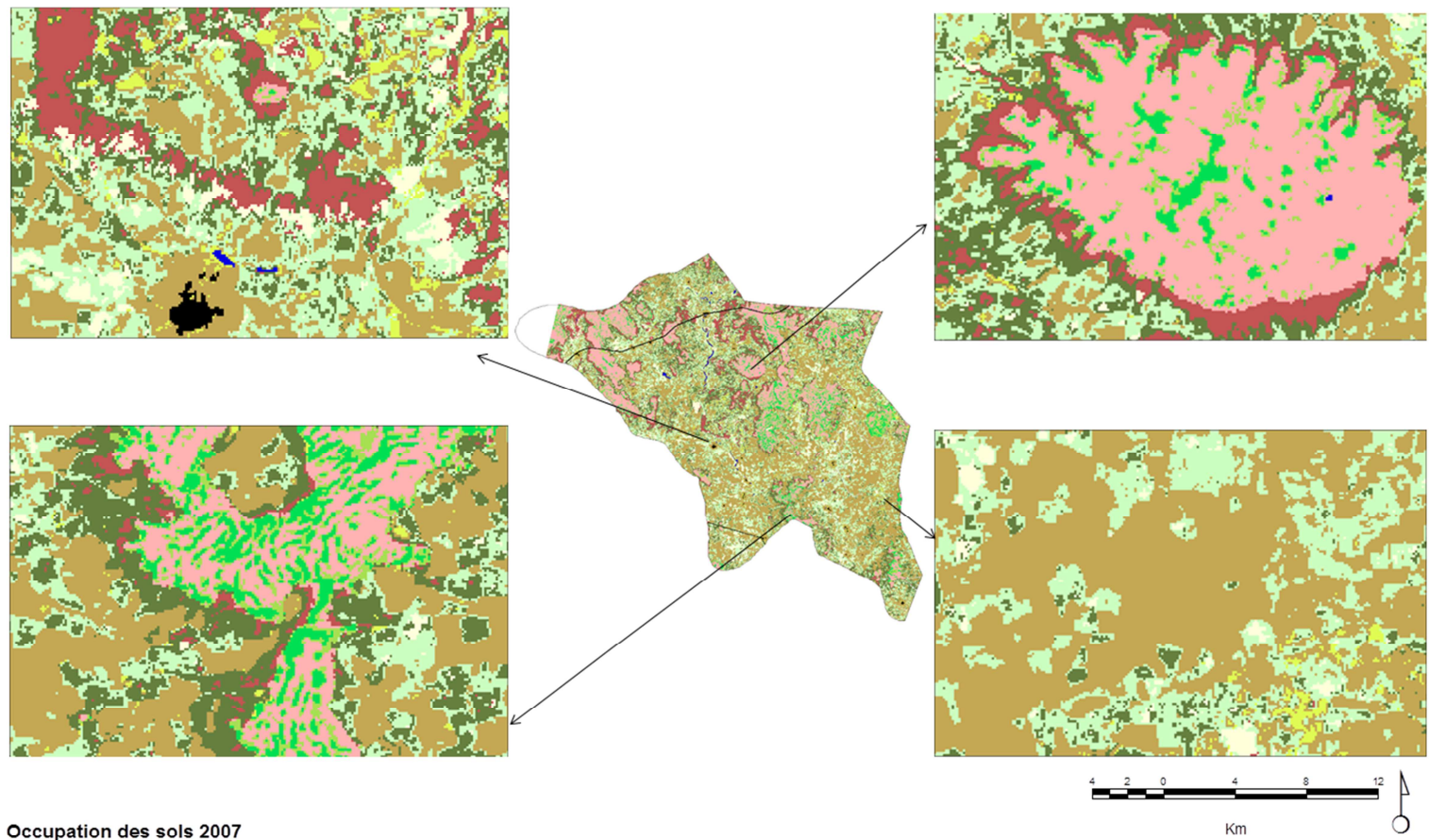
- Limite de la commune
- Village
- Mare
- Couloir de passage
- Piste
- Route

Source: Spot, 1986
© SOULEY YERO K.

Figure 36. Carte de l'occupation des sols de la commune de Dantiandou en 1986

Outre les secteurs concernés par les réseaux, l'habitat et les plans d'eau (essentiellement des mares temporaires dans cette zone endoréique), on a distingué trois types d'espaces principaux (figures 36, 37 et 38) :

- 1- La végétation naturelle, constituée surtout de brousse tigrée (végétation contractée) en bon état (régulière) ou dégradée, ainsi que des fourrés et végétation des bas-fonds ;
- 2- Les espaces agricoles, comprenant les cultures, les jachères anciennes et les jachères récentes, ainsi que certaines zones de sol nu qui, en particulier sur les plateaux latéritiques, correspondent à des placages sableux cultivables et ne sont pas des espaces dégradés ;
- 3- Enfin les « espaces impropres aux cultures », comprennent ceux qui l'ont toujours été, à savoir les plateaux latéritiques lorsqu'ils ne sont pas recouverts de placages sableux, et ceux qui le sont devenus sous la pression des activités socio-économiques et de la sécheresse, c'est-à-dire les zones où la mise en culture et le raccourcissement des jachères ont entraîné une dégradation de la structure superficielle des sols et leur encroûtement.



Occupation des sols 2007

Végétation Naturelle

- Contracté régulière
- Contracté dégradée
- Fourré, arbre isolé, rtipisylve

Espaces agricoles

- Culture
- Jachère ancienne

Espaces impropres aux cultures

- Jachère récente
- Sol nu meuble
- Cuirasse ferrugineuse
- Sol dégradé

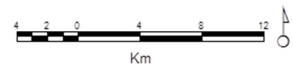
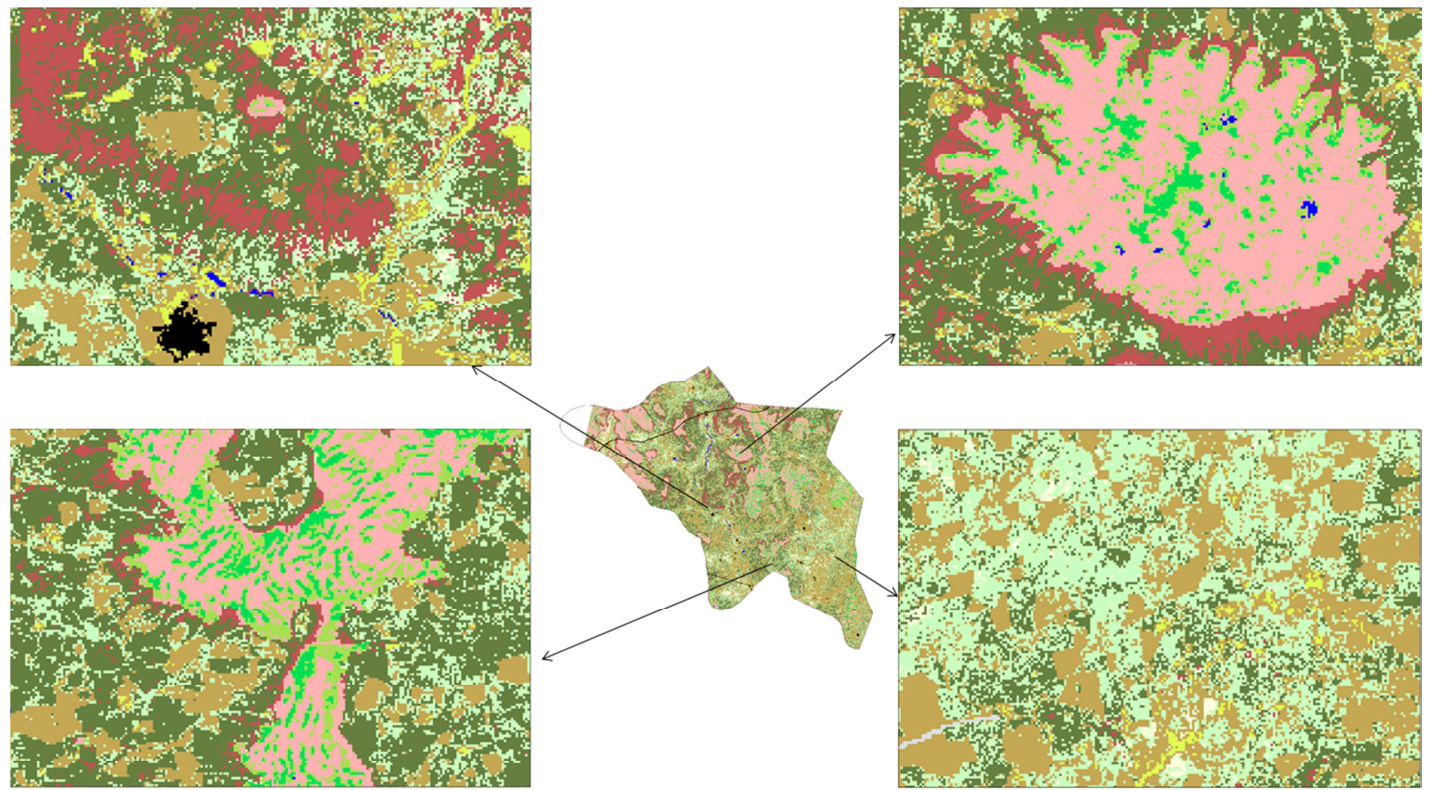
Réseau, Habitats, plans d'eau

- Limite de la commune
- Village
- Mare
- Couloir de Passage
- Piste
- Route

Source: Spot, 2007

© SOULEY YERO K.

Figure 37. Carte de l'occupation des sols de la commune de Dantiandou en 2007



Occupation des sols 2010

Végétation Naturelle

- Contractée régulière
- Contractée dégradée
- Fourré, arbre isolé, ripisylve

Espaces agricoles

- Culture
- Jachère ancienne

Espaces impropres aux cultures

- Jachère récente
- Sol nu meuble
- Cuirasse ferrugineuse
- Sol dégradé

Réseau, Habitats, plans d'eau

- Limite de la commune
- Village
- Mare
- Couloir de Passage
- Piste
- Route

Source: Spot, 2010
© SOULEY YERO K.

Figure 38. Carte de l'occupation des sols de la commune de Dantiandou en 2010

5.5.2 Analyse de l'occupation des sols en 1986, 2007 et 2010

Les figures 36, 37 et 38 présentent les cartes d'occupation des sols issues des classifications supervisées des images SPOT de 1986, 2007 et 2010. L'analyse de l'évolution de l'occupation des sols à travers le graphique (fig. 39) et de leurs statistiques respectives (tableau 9), nous renseignent sur l'état des occupations des sols et de leur évolution. L'état de l'occupation des sols en 1986 révèle une forte proportion des sols nus (en bon état) non cultivés, et une faible présence des mares. On note que les superficies occupées par les cultures et les jachères anciennes (JA) et récentes (JR) varient respectivement entre 20 %, 21,03 % et 20,56 % (Tableau 9). Les sols dégradés occupent en 1986 4,67 % de la superficie de la zone d'étude.

En 2007, on constate une baisse importante des surfaces des sols nus, une augmentation des superficies cultivées et de la jachère récente (JR), mais on note une diminution de la jachère ancienne (JA). On remarque aussi que les superficies occupées par les mares ont augmenté. Une diminution relative de la végétation contractée de la brousse tigrée (BT) en 2007, ainsi que celle de la végétation contractée de la brousse tigrée en dégénérescence (BTD).

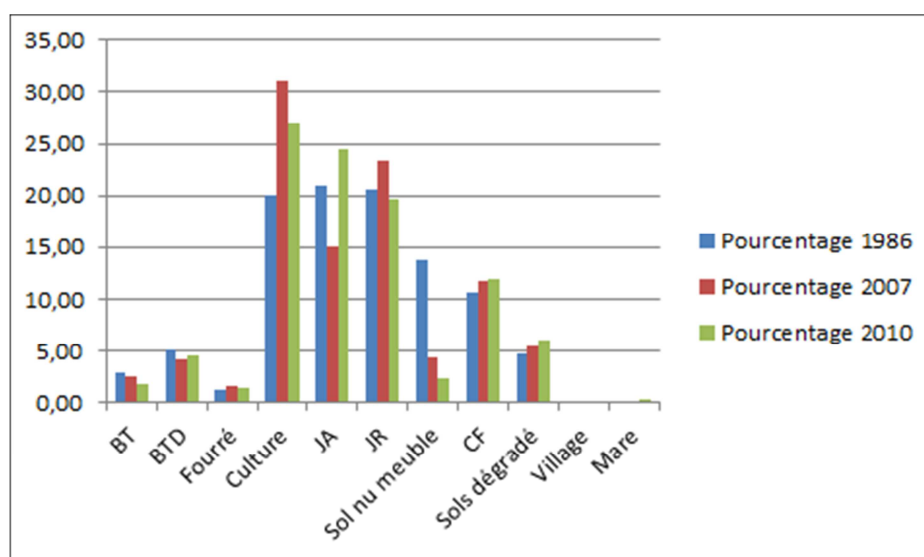


Figure 39. Evolution de l'occupation des sols en 1986, 2007 et 2010

L'occupation des sols en 2010 révèle une augmentation des surfaces des sols dégradés, une baisse considérable de la végétation contractée de la brousse tigrée (BT) et une augmentation relative de celle de la végétation contractée de la brousse tigrée en dégénérescence (BTD). Les mares ont progressé de manière substantielle entre 1986 et 2010. De même pour les surfaces nues des plateaux (CF), elles ont connu une progression entre 1986 et 2010. Par contre, en 2007, les fourrés ont connu une amélioration

par rapport à 1986, toutefois, ils ont subi une diminution en 2010. La superficie des villages a aussi progressé passant de 0,05 % en 1986 à 0,13 % en 2007 pour atteindre 0,21 % en 2010.

Tableau 9. Superficie des occupations des sols

Superficie et taux des unités d'occupation du sol						
Classe d'occupation du sol	Occupation du sol en 1986 (a)		Occupation du sol en 2007 (b)		Occupation du sol en 2010 (c)	
	Superficie en ha	Pourcentage	Superficie en ha	Pourcentage	Superficie en ha	Pourcentage
BT	2258,8	2,92	2011,4	2,60	1417,36	1,83
BTD	3922,92	5,07	3274,12	4,23	3484,56	4,51
Fourré	945,4	1,22	1281,8	1,66	1092,84	1,41
C1	15467,72	20,00	24070,8	31,13	20905,36	27,03
JA	16263,32	21,03	11694,28	15,12	18887,92	24,42
JR	15896,36	20,56	18000,32	23,28	15222,16	19,68
Sol nu meuble	10632,2	13,75	3451,04	4,46	1881,08	2,43
Cuirasse ferrugineuse	8185,6	10,58	9036,52	11,69	9229,04	11,93
Sols dégradé	3610,28	4,67	4200,84	5,43	4669,72	6,04
Village	39,68	0,05	101,96	0,13	159,48	0,21
Mare	21,76	0,03	128,36	0,17	302,28	0,39
Route	72,24	0,09	65,76	0,09	65,44	0,08
Piste	17,08	0,02	16,16	0,02	16,12	0,02
Total	77333,36	100,00	77333,36	100	77333,36	100,00

BT=Végétation contractée régulière, BTD= Végétation contractée régulière dégradée, C1= Culture, JA= Jachère ancienne, JR= Jachère récente,

5.5.3 Détection des changements intervenus entre 1986-2007, 1986-2010 et 2007-2010

Les cartes de changements entre 1986 - 2007, 1986 - 2010 et 2007 - 2010 présentées en figure 40, (et 117 et 118 en annexe) sont réalisées à partir du croisement des couches issues de ces différentes classifications. En effet, le croisement entre deux thèmes consiste à combiner de manière arithmétique les valeurs des thèmes cellule à cellule. Ceci nous permet de quantifier les changements de l'occupation des sols intervenus entre ces différentes dates. Les trois cartes thématiques générées par le croisement des couches issues des classifications 1986-2007, 1986-2010 et 2007-2010 sont codées en sortie. Il faudrait ensuite regrouper les différents types de changements selon leur pertinence. Ce qui nous a conduit à reclasser nos trois cartes thématiques en onze classes. L'étude de la dynamique des occupations des sols est basée sur trois cas. Il s'agit du terme « **pas de changement** » qui regroupe toutes les occupations qui n'ont pas changées entre deux dates. Ensuite nous avons le terme « **changement** » qui sont des unités d'occupations des sols ayant subi des transformations entre deux dates et enfin nous avons le terme « **progression** » qui englobe les classes ayant augmenté en terme de superficie d'occupation.

5.5.3.1 Changements intervenus entre 1986-2007

Pour ce qui est des résultats issus du croisement des cartes d'occupation des sols pour la période 1986 et 2007 (fig. 117 et tableau 25 en annexe), on constate que les les espaces agricoles soit la moitié de la zone d'étude, ont été beaucoup plus affectés durant cette période. On note que les superficies occupées par les unités d'occupation qui n'ont pas subi de modifications pour la période 1986-2007 sont supérieures à celles de la période 1986-2010 soit 36% contre 35%. Le pourcentage des changements opérés dans la classe des surfaces nues des plateaux est moindre, il est de 0,03%. Les sols dégradés ont augmenté de 3,11% et la végétation naturelle de 3,08%.

5.5.3.2 Changements intervenus entre 1986-2010

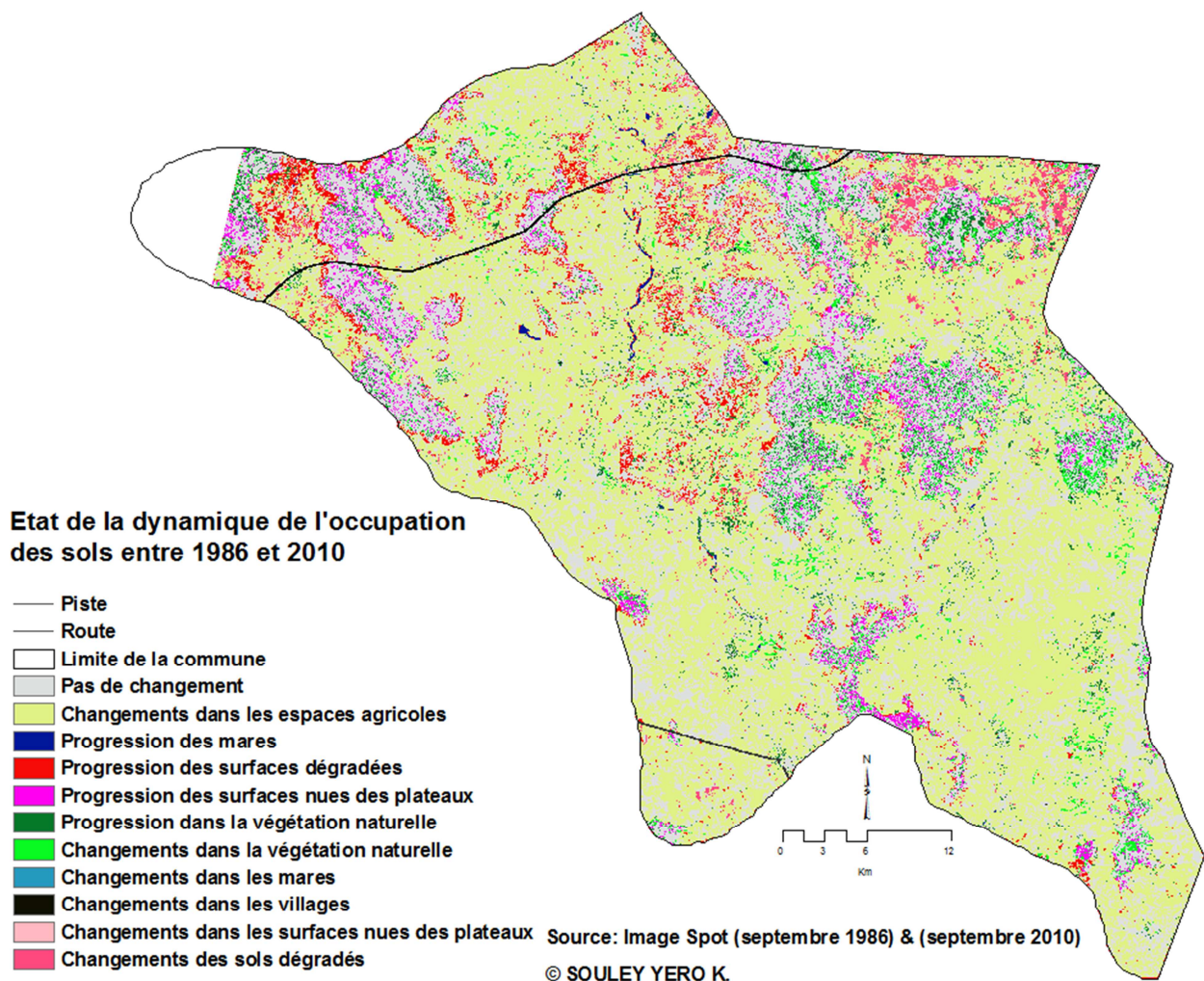


Figure 40. Carte des changements entre 1986 et 2010

Tableau 10. Evolution des occupations des sols 1986 et 2010

Classe thématique	Etat de la dynamique entre 1986 et 2010	
	(ha)	(%)
Pas de changement	26718,04	34,60
Changements dans les espaces agricoles	37990,4	49,20
Augmentation des mares	287,44	0,37
Augmentation des surfaces dégradées	2986,24	3,87
Augmentation des surfaces nues des plateaux	2553,8	3,31
Progression dans la végétation naturelle	2379,8	3,08
Modification dans la végétation naturelle	2271,8	2,94
Changements dans les mares	2,52	0,00
Changements dans les villages	5,32	0,01
Changements dans les surfaces nues des plateaux	101,28	0,13
Conversion des sols dégradés	1919	2,49

L'analyse de la carte (fig. 40) (voir aussi le tableau 10) générés par le croisement des cartes d'occupation de 1986 et 2010 montre une dynamique au niveau des différentes classes thématiques. On constate que 35% de la zone d'étude n'ont pas subi de changements. Parmi les unités d'occupation des sols qui ont subi des modifications, on note que les espaces agricoles sont les plus touchés avec 37990 ha soit 49% de la zone d'étude. Les surfaces dégradées ont connu une progression de 4%. Les surfaces occupées par les mares ont augmenté de 287,44 ha, occupant 0,37% de l'espace contre 0,15% pour la période précédente. La superficie occupée par la végétation naturelle a peu changé durant cette période. De 2,98% pour la période 1986-2007, elle est passée à 2,94% pour celle de 1986-2010.

5.5.3.3 Changements intervenus entre 2007-2010

Concernant la dynamique des occupations des sols pour la période 2007 – 2010 (Figure 118 et Tableau 26 en annexe), on observe que le taux de modifications dans les espaces agricoles est de 42%. Cependant, on remarque que les proportions de changements dans la classe des mares, des surfaces nus des plateaux, des sols dégradés, etc. ne dépassent guère les 4% et cela pour les trois périodes. Les classes qui n'ont pas subi de modifications sont de 48%. Entre 2007 et 2010, les surfaces dégradées ont augmenté de 2,33%.

5.6. Extension au degré carré

Nous avons utilisé la classification validée sur la commune de Dantiandou pour établir, pour 2010 uniquement, une carte de l'occupation des sols sur le degré carré de Niamey (DCN). Cette carte (figure 41), et le tableau 11, confirment :

Occupation des sols dans le degré carré de Niamey

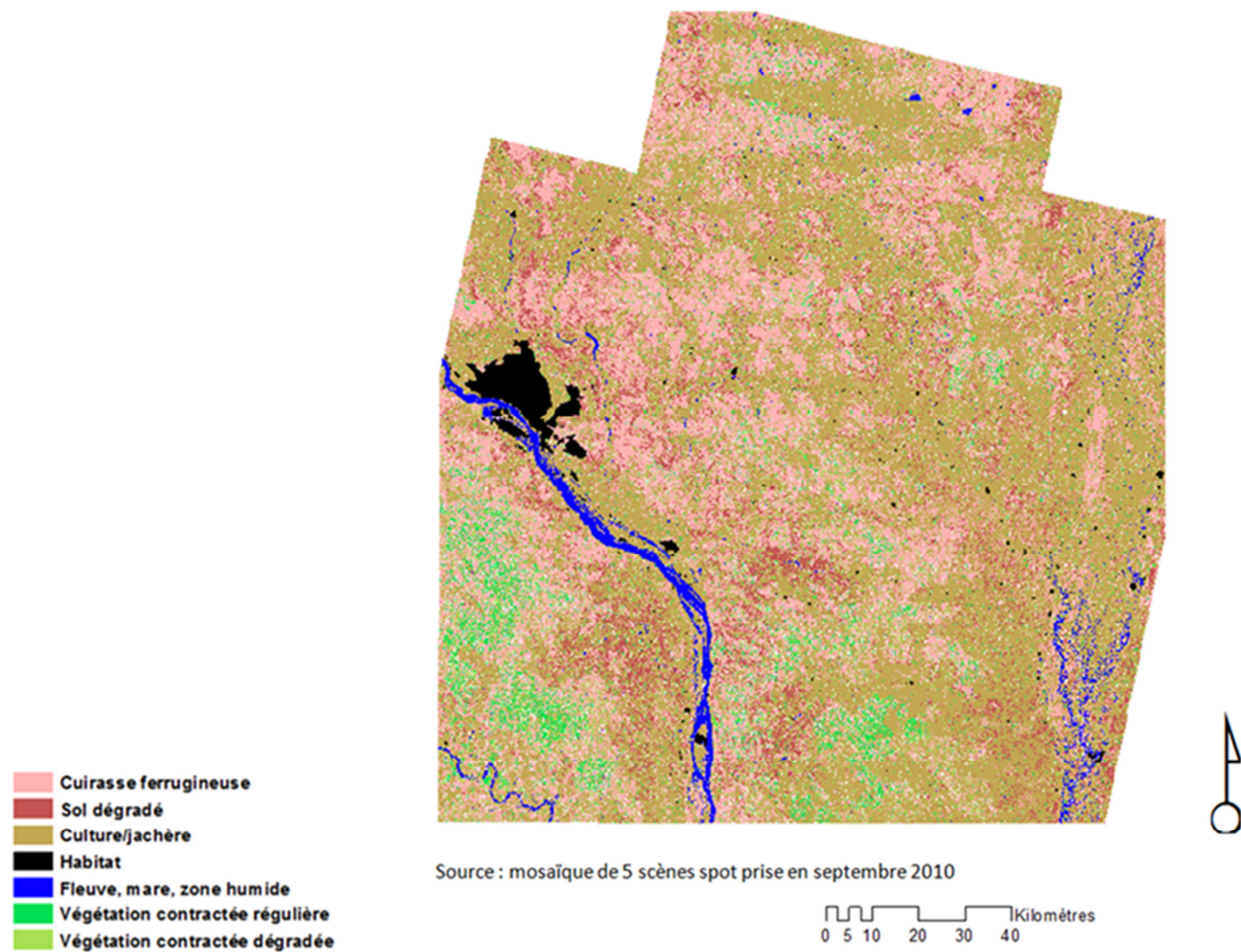


Figure 41. Carte de l'occupation des sols du degré carré de Niamey en 2010 (SOULEY YERO Kadidiatou, 2012)

- L'extension des zones de cultures (cultures + jachères)
- L'apparition de zones de sols dégradées conséquentes
- Le recul (ou le maintien ??) de la végétation naturelle (brousse tigrée en particulier)

Toutefois, faute de scènes SPOT disponibles pour 2010 sur l'ensemble du degré carré, celui-ci est tronqué dans ses coins NE et NO.

Tableau 11. Distribution des classes d'occupation des sols sur le degré carré de Niamey en 2010 d'après des images SPOT 5 du 21 et 26 septembre

classes	km ²	%
cuirasse ferrugineuse	3057,53	29,64
sol dégradé	888,51	8,61
culture jachère	5057,90	49,04
habitats	145,93	1,41
eau fleuve mare marais	202,34	1,96
brousse tigrée	320,90	3,11
brousse tigrée dégradée	641,64	6,22
TOTAL	10314,75	100,00

5.7. Discussion

A travers les résultats, il apparaît que le couvert végétal des plateaux (BT & BTD) a diminué entre les trois dates. Et ce malgré la ré augmentation de la pluviométrie de la fin des années 1990. De même pour les fourrés, arbres isolés et ripisylve, on a observé certes une progression relative de la végétation en 2007 qui a été suivie d'une baisse en 2010. A ce niveau on constate que la régression de la végétation a été beaucoup plus marquée sur la zone non plateau que sur la zone plateau. Sans nul doute à cause des déficits pluviométriques qui se sont succédé au cours des années 1980. La baisse continue de la végétation sur la zone plateau peut être attribuée à l'action anthropique. Mais aussi à la très forte irrégularité de la pluviométrie, bien qu'il ait eu une reprise de la pluviométrie à la fin des années 1990, toutes les années n'ont pas été humides, c'est le cas de 2010 qui a été une année de déficit pluviométrique surtout sur la région de la zone d'étude.

Il ressort de l'observation des cartes d'occupation des sols que l'essentiel des sols dégradés sont localisés dans le nord et le centre de la zone d'étude. Cependant la carte de 2010 sur le degré carré de Niamey montre une proportion relativement importante des sols dégradés sur toute la zone d'étude. Ces sols dégradés ont progressé entre 1986, 2007 et 2010. Cette étude a, en effet, mis en évidence la

tendance à l'augmentation des surfaces dégradées, des mares et des superficies occupées par les villages. Cette tendance est sans nul doute liée aux fortes modifications intervenues dans les espaces agricoles en 2007 et 2010 mais aussi à la diminution du couvert végétal.

5.8. Conclusion

Ce travail a permis de réaliser des cartes d'occupation des sols ainsi que des cartes de changements. Ces résultats permettent de mieux analyser les disparités spatiales des occupations des sols, en vue de comprendre les changements d'usage des sols à l'échelle de la commune de Dantiandou et leur impact sur le cycle de l'eau.

On constate surtout, de 1986 à 2010 :

- une extension des sols dégradés
- une régression de la brousse tigrée et une extension de la BT dégradée
- une extension modérée des zones de cultures/jachères (l'extension maximale aurait-elle eu lieu auparavant ?)
- une extension des mares (manifestation du paradoxe hydrologique du Sahel en zone endoréique).

Toutes ces évolutions traduisent un accroissement de la pression anthropique sur le milieu ; la dégradation de la brousse tigrée et l'extension des sols dégradés est la plus forte au nord (effet de la sécheresse ?) et à l'ouest (effet de la ville de Niamey ?). La brousse tigrée est relativement préservée sur les grands plateaux du sud du degré carré de Niamey (DCN).

Troisième partie :

**Changements des occupations des sols
et de leur fonctionnement hydrologique
: pour une application en hydrologie des
bassins versants**

CHAPITRE 6 : Analyse de la variabilité spatiale et temporelle de 1950 à 2010

Ce chapitre, de même que les chapitres 7 et 8, doit beaucoup aux livrables n°1-3b, 1-4 et 1-7b produits par l'équipe LTHE-ESPACE-DEV pour le programme ANR ESCAPE (Changements environnementaux et sociaux en Afrique: passé, présent et futur) dont j'ai assuré la rédaction, ainsi qu'aux livrables 1, 2, 2-5 et 3 produits en 2010-2011 par l'équipe LTHE-ESPACE-DEV pour le programme ANR ECLIS sur la vulnérabilité des milieux et des sociétés pastorales d'Afrique de l'Ouest, et à la rédaction desquels j'ai apporté une part significative (Souley Yéro *et al.*, 2010).

6.1. Introduction: Résumé de mes recherches antérieures

Une recherche fondée sur la télédétection est un travail scientifique en soi, du fait de la connaissance des milieux naturels d'une part, des techniques et méthodes de la télédétection d'autre part, qu'elle requiert.

Elle n'interdit pas la contradiction ni bien sûr la complémentarité avec la photo-interprétation ; les deux méthodes sont complémentaires, la deuxième permettant une interprétation plus directe de l'iconographie, mais n'autorisant pas une extension spatiale du traitement par extension d'un signal interprété en un site vers les autres sites à la signature spectrale proche. Ainsi, depuis une quinzaine d'années, se livre un débat scientifique passionnant (parfois passionné) sur le « reverdissement » du Sahel. En effet, la plupart des auteurs travaillant en télédétection démontrent que le Sahel « reverdit », du moins que la valeur des indices de végétation, en particulier le NDVI, s'accroît, surtout dans le nord du Sahel, dans les zones les plus arides ; alors que les auteurs travaillant en photo-interprétation montrent, mais seulement sur des étendues infra-régionales (du fait du caractère chronophage de la méthode), une dégradation persistante des couverts végétaux.

Ces préliminaires sont compliqués par les éléments suivants :

- des auteurs ont montré aussi par photo-interprétation la progression de la végétation par RNA (régénération naturelle assistée) dans les terroirs de l'Est du Niger, même si cela a surtout été démontré dans des rapports destinés aux bailleurs de fonds ayant financé ces opérations, et donc peut être dithyrambiques (Larwanou *et al.*, 2006 ; Reij *et al.*, 2009) ;
- les auteurs même qui ont publié les analyses les plus complètes de l'évolution de l'occupation des sols au Sahel par télédétection montrent des cartes où cette tendance n'est pas aussi nette que ne le prétend le texte (Prince *et al.*, 1998 ; Fensholt et Rasmussen, 2011) ; en particulier pour la période après 1992, on observe plutôt une dégradation de la couverture végétale dans le bassin du Niger Moyen (affluents de rive droite en territoire burkinabé et nigérien) ;

- tout cela dans une période de fort changement climatique (rappelons que le déficit pluviométrique dont souffre l'Afrique de l'Ouest est le plus fort signal du changement climatique enregistré sur le globe depuis le début des enregistrements normalisés – Hulme, 2001) ; une partie (l'essentiel ?) du « regain » végétal a été enregistré entre 1985, « pic » de la sécheresse et la fin des années 1990, date à laquelle la récupération partielle du niveau des pluies a atteint son maximum ; après on observe plutôt une moyenne supérieure à celle de la sécheresse (1969-1985), mais nettement inférieure à celle des années « humides » (1950-68) avec surtout une variabilité interannuelle jamais observée depuis le milieu du 20^{ème} siècle. Ce regain est lié à cette augmentation des pluies et la végétation marque le pas depuis que la pluie a cessé d'augmenter ; ceci montre a contrario qu'il vaut peut-être mieux utiliser le RUE (Rain Use Efficiency) ou rapport PPN/P (Productivité Primaire Nette/ Précipitation) que les indices de végétation seuls (Hountondji *et al.*, 2004 ; Hein et De Ritter, 2006).

En bref on peut supposer que, en plus de la variabilité inhérente aux méthodes utilisées, l'évolution de l'occupation des sols et sa cartographie sont soumises à une grande variabilité spatiale et temporelle de cette évolution, rendant délicate toute interprétation hâtive et toute généralisation trop rapide.

Nous avons eu la chance de mener au cours de nos études des recherches sur l'évolution des occupations des sols dans certains secteurs proches de la zone intéressée par ce travail doctoral.

Dans le cadre d'un mémoire de maîtrise, nous avons eu à réaliser une cartographie par PI (photo-interprétation) et TD (télédétection) du bassin-versant de Boubon (localisation figure 26), situé à une vingtaine de kilomètres au Nord-Ouest de Niamey. Ce bassin, qui a une superficie de 162 km², a fait récemment l'objet d'une thèse de géographie physique (Mamadou, 2012) consacrée au rôle de l'érosion et des transports solides des koris proches de Niamey dans l'ensablement du fleuve Niger, préoccupation majeure de l'ABN (Autorité du Bassin du Niger), qui a montré que les terrains dégradés sont probablement à l'origine d'un accroissement des écoulements, pouvant se traduire par une augmentation du risque de crue. Notre propre recherche, préliminaire, était bien plus géomorphologique (Souley Yéro, 2007). Il s'agissait essentiellement de déterminer la granulométrie des formations corrélatives du lit du kori et de tenter un parallèle avec la géomorphologie du bassin lui-même.

L'interprétation des photos aériennes de 1975, 1985 et 2005 nous a permis de réaliser les cartes d'occupation des sols (figure 42) montrant un fort recul de la couverture végétale naturelle, que ce soit la brousse tigrée des plateaux ou la brousse des vallées. Nous y reviendrons au chapitre 8 consacré aux conséquences hydrologiques que peuvent avoir ces changements d'usage des sols ; cela a été très bien démontré également en termes de transports solides et de sédimentation par Mamadou (2012).

Par ailleurs, dans le cadre du programme AMMA intégré au niveau du Master 2 (DEA), nous avons été sollicitée pour réaliser une cartographie fine des deux bassins expérimentaux de l'expérience AMMA au Niger, les bassins de Wankama et de Tondi Kiboro. Ces bassins sont nettement plus petits :

90 hectares pour le premier (Le Breton, 2012), 12 hectares pour chacun des deux petits bassins « jumeaux » du site de Tondi Kiboro. On peut voir ci-dessous (figure 43) la cartographie des bassins de Tondi Kiboro à deux dates différentes (1993 et 2007) ; la première a été réalisée par Rajot (1994), que nous pouvons comparer à celle réalisée dans le cadre de notre Master (Souley Yéro, 2008).

Là encore, mais sur de plus petites surfaces, on note une forte évolution des occupations du sol, avec la disparition d'une grande partie des surfaces cultivées, au profit de surfaces de sols dégradés, en général encroûtés ; cela ne manquera pas d'avoir des conséquences hydrologiques, comme nous l'évoquerons en chapitre 8.

De plus, il faut noter que les deux petites régions que nous avons eu la chance d'étudier sont toutes les deux proches de Niamey (25 km pour Boubon, 65 km pour Tondi Kiboro) et font sans conteste partie de l'auréole de déboisement liée à la présence de la ville fort demandeuse en bois et en fourrages ; de par la forte expérience acquise par les chercheurs et les étudiants d'AMMA, et leur fréquence sur le terrain comme le grand nombre d'aller-retour effectués en particulier sur l'axe Niamey-Balevara (route sur laquelle se trouve le village de Wankama, l'un des bassins expérimentaux de AMMA, tout proche de Banizoumbou et Tondo Kiboro), on a acquis la conviction que cette auréole est en train de concerner le plateau du Fakara, à l'est de Tondi Kiboro, vaste plateau encore recouvert de brousse tigrée.

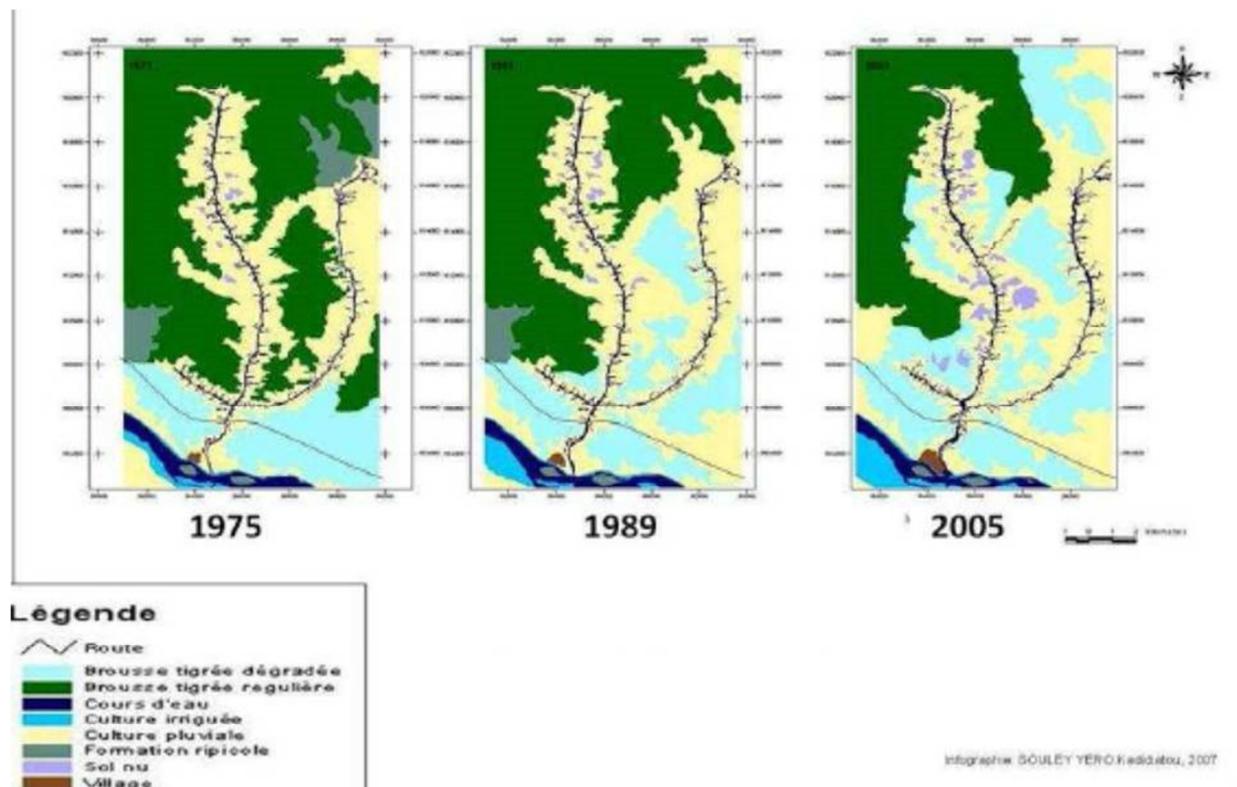


Figure 42. Cartographie diachronique du bassin de Boubon par photo-interprétation (Souley Yéro, 2007)

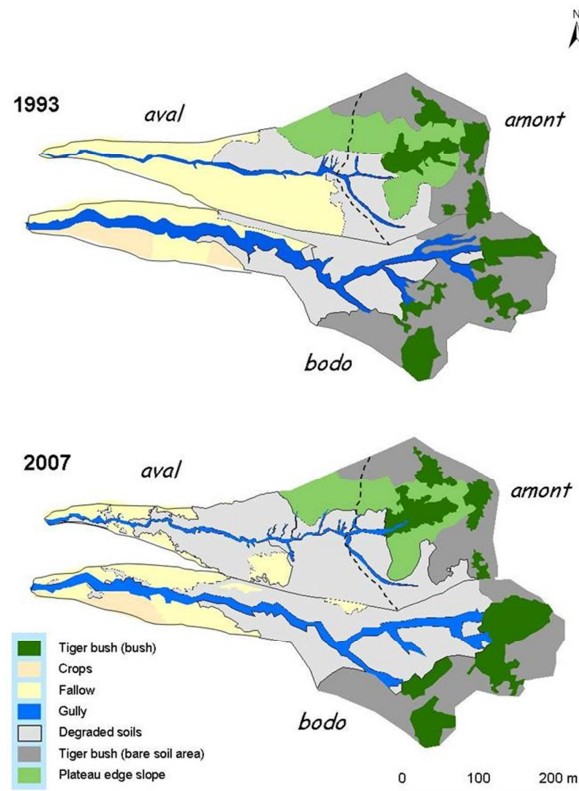


Figure 43. Cartographie diachronique des bassins de Tondi Kiboro par photo-interprétation (Souley Yéro, 2008)

De nombreux prélèvements s'y opèrent depuis le début des années 1990, entre autres pour les besoins des casernes de Niamey. Le déboisement y est très rapide, comme aussi, plus loin de Niamey, on peut l'observer sur la route de Ouagadougou entre Torodi et Makalondi. Il faut donc espérer que cette région ne soit pas représentative de l'ensemble des secteurs de même latitude, ce qui serait très inquiétant pour l'avenir de la ressource.

Dans les deux cas on a donc surtout noté un fort recul de la végétation naturelle.

On peut donc estimer que l'auréole de prélèvement autour de la capitale est aujourd'hui en train de s'étendre à une distance de 70 à 120 km de Niamey, dans toutes les directions. On peut toutefois penser que c'est surtout vers le sud que se porte la pression sur la ressource bois-énergie et fourrages, et ce pour au moins deux raisons :

- il reste de nombreux plateaux étendus encore couverts de brousse tigrée, dans le sud du degré carré de Niamey, comme, on l'a vu, sur la route de la frontière burkinabé et celle de la frontière béninoise ; la réserve de biomasse y est visiblement plus élevée qu'au nord, pour une simple raison climatique : 100 mm de plus ou de moins modifient très sensiblement l'allure et surtout la densité de la brousse tigrée ;
- malgré des politiques de « colonisation » des zones sahélo-soudaniennes promues durant la grande sécheresse (zone de Ayi Noma sous le gouvernement Kountché), les régions comprises entre Niamey et les frontières burkinabé, béninoise et nigériane sont

relativement vides d'hommes, probablement un héritage de faits historiques (régions vidées de leurs habitants par les trafiquants d'esclaves ?) et surtout pour des raisons sanitaires ; ces zones ont longtemps été infestées par la trypanosomiase, y rendant précaire toute installation permanente ; ceci a relativement préservé une grande partie des zones sahélo-soudanienne de la surexploitation, comme en témoigne la localisation des parcs nationaux et réserves, nombreux à cette latitude depuis le Lac Tchad jusqu'à l'Atlantique (ensemble parc du W- Arli-Pendjari pour la région qui nous intéresse, constituant une vaste zone restée boisée et peu peuplée).

Ce chapitre est consacré aux analyses de l'occupation des sols et de son évolution à partir de photo interprétation. Après un historique et une analyse de cette évolution dans le centre du degré carré de Niamey entre les années pré-sécheresse (1965, images Corona) et la situation actuelle (Google Earth, 2010), cet historique sera mis en parallèle avec d'autres travaux réalisés dans la sous-région, puis l'évolution sera décortiquée par éléments de paysage de façon à établir d'éventuels liens entre changements d'usage des sols et éléments des topo-séquences ; il s'agira de déterminer quelles sont les régions qui ont connu les plus fortes évolutions et de tâcher de comprendre les causes de la répartition des dégradations éventuelles.

6.2. Analyse de la variabilité spatiale de l'occupation du sol entre 1950 et 2010

- Ce que nous montrent les photos aériennes

Des études se basant sur l'interprétation des photographies aériennes ont été effectuées sur la zone d'étude. L'analyse de l'évolution des occupations des sols issue de la photo-interprétation révèle dans certains secteurs une quasi disparition de la couverture végétale naturelle depuis 1950, entraînant ainsi une augmentation des sols nus et dégradés.

Nos études antérieures sur l'analyse de l'évolution de l'occupation des sols - au niveau de deux petits bassins versants de Tondi kiboro (TK) et de Wankama (WK) se trouvant dans la commune de Dantiandou - à partir des photographies aériennes de 1950, 1975, 1992, d'une image Corona de 1965 et de deux images PIXY de 1993 et 2007 ont révélé des exemples remarquables de dégradation dans le sud-ouest du Niger.

6.2.1 Bilan de l'évolution pour le bassin de Wankama

Quand on prend le cas du bassin versant de Wankama, l'analyse de l'état de l'occupation des sols en 1950 montre la présence d'une couverture végétale relativement dense sur l'ensemble du bassin versant. La « savane » occupait 31,91 ha soit 26,03% de la superficie totale, tandis que la brousse tigrée occupait 3,4ha soit 2,77%. Les superficies cultivées occupaient 37,8 ha. Les sols nus cuirassés et dégradés constituent ensemble 5,15% de la superficie globale. Quant à la jachère, elle couvrait 30,62 % de la superficie du bassin en 1950. Le reste de la surface est occupée par le talus 2,99 ha et par les ravines 2,63 ha (Figure 44).

L'analyse de l'évolution en 1975 révèle les constats suivants : la jachère constituait la principale occupation du sol, elle occupait 41,73% de la superficie du bassin versant. Il a été constaté aussi la disparition quasi-totale de la savane et une nette progression des surfaces cultivées, de 39,04 ha en 1975 contre 37,8 ha en 1950. On assistait aussi à une augmentation des surfaces dénudées et dégradées. Les sols dégradés étaient présents essentiellement au niveau des versants sableux (glacis, jupes sableuses et bas-fonds). Ils sont passés de 5,15% en 1950 à 17,25% en 1975. On note une augmentation progressive de la ravine de 5,3 ha soit 4,32%, on assiste aussi à l'apparition d'une zone d'épandage dans la vallée d'une superficie de 1,28 ha. On remarque aussi la diminution des fourrés de la brousse tigrée sur les plateaux latéritiques au profit des sols nus.

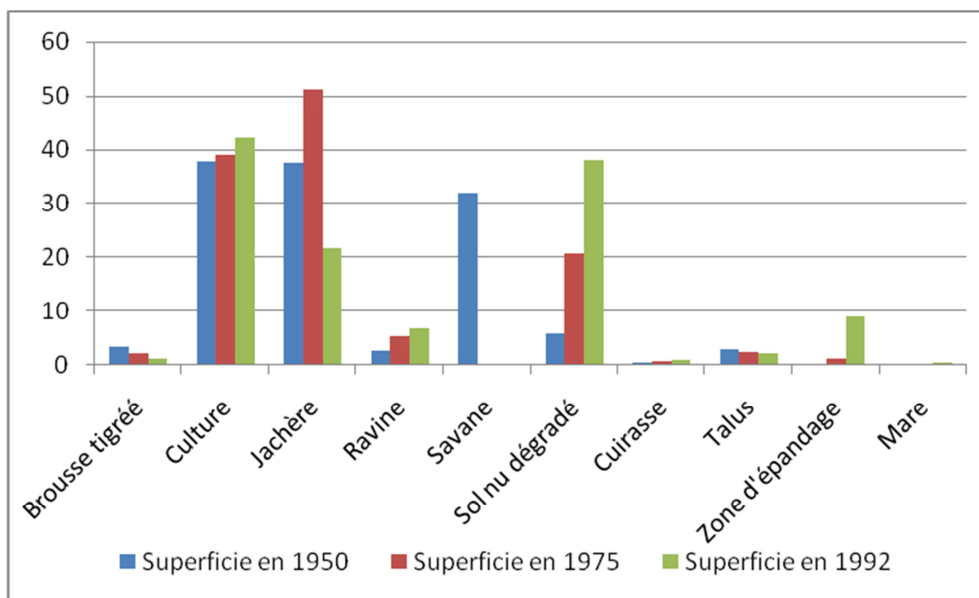


Figure 44. Evolution des superficies des classes d'occupation des sols de 1950 à 1975

Et en 1992, l'examen de la photographie aérienne de 1992 met en évidence une modification importante des cultures et des jachères par une extension des zones dégradées. On a constaté qu'une

partie de la jachère a été défrichée et mise en culture et certains domaines cultivés sont laissés en jachère ou devenus impropres à la culture (dégradés). Ces sols dégradés sont ainsi multipliés par 6 entre les trois missions 1950 à 1992. D'après le tableau des superficies des classes d'occupation des sols (Tableau 12) on assiste à un recul important de la jachère aux profits des champs cultivés et le recul des surfaces cultivées au profit des sols dégradés. L'extension des cultures s'est aussi faite au détriment de la savane. On note une évolution progressive de la zone d'épandage qui est passée de 1,04 % en 1975 à 7,41 % en 1992. La ravine occupe de sa part 6,84 ha, soit 5,58 %.

On assiste en 1992 à l'apparition d'une mare avec une superficie de 0,5 ha. Le talus (avec végétation) et la brousse tigrée connaissent aussi une évolution régressive.

Tableau 12. Modifications survenues sur les différentes classes d'occupation des sols de 1950 à 1992 au niveau du bassin versant de Wankama

Occupation des sols	Superficie en 1950		Superficie en 1975		Superficie en 1992	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Brousse tigrée	3,4	2,77	2,19	1,79	1,18	0,96
Culture	37,8	30,84	39,04	31,85	42,19	34,42
Jachère	37,53	30,62	51,15	41,73	21,76	17,75
Ravine	2,63	2,15	5,3	4,32	6,84	5,58
Savane	31,91	26,03	0	0	0	0
Sol nu dégradé	5,93	4,84	20,62	16,82	37,93	30,95
Cuirasse	0,38	0,31	0,65	0,53	0,94	0,77
Talus	2,99	2,44	2,34	1,91	2,15	1,75
Zone d'épandage	0	0	1,28	1,04	9,08	7,41
Mare	0	0	0	0	0,5	0,41
Total	122,57	100	122,57	100	122,57	100

6.2.2 Bilan de l'évolution pour le bassin de Tondi Kiboro

Sur le bassin de Tondi Kiboro, l'état de l'occupation des sols en 1965 (figure 45 et tableau 13) montre que le domaine des cultures occupe 3,98 ha soit 25,56 % de la superficie du bassin versant. La jachère constitue 35 % de la superficie du bassin versant. La brousse tigrée au niveau du plateau et du talus représente 4,41 ha en 1965. La ravine occupe une superficie de 0,36 ha soit 2,31 %. Le sol nu cuirassé occupe 0,43 ha. On constate qu'il n'y a pratiquement pas de sol dégradé en 1965 encore moins de zone d'épandage.

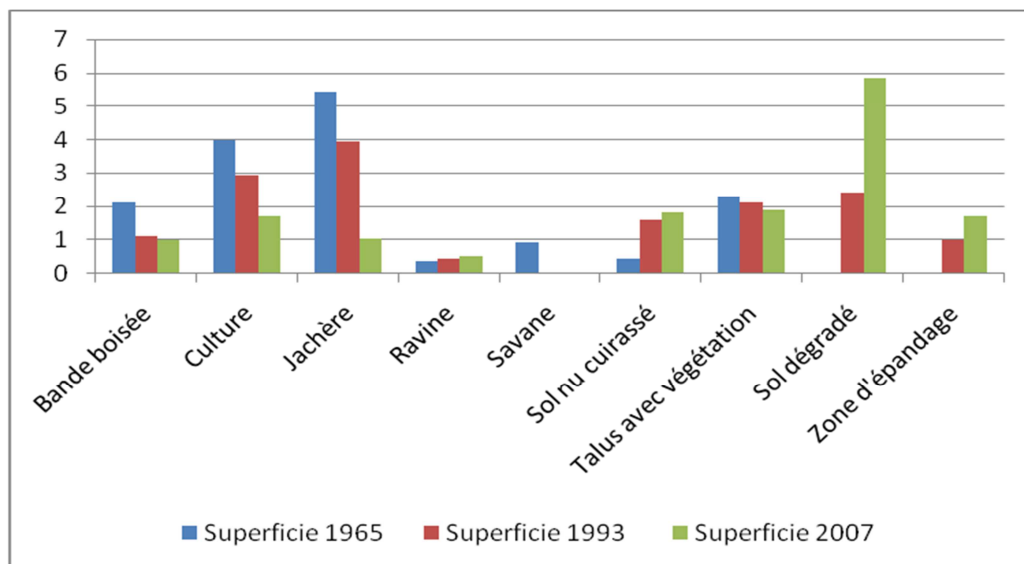


Figure 45. Evolution des superficies des classes d'occupation des sols de 1965 à 2007

L'évolution de l'occupation des sols en 1993 révèle une accentuation et extension des surfaces nues et dégradées. En 1965 la superficie occupée par la savane arborée est remplacée par des cultures en 1993. Une partie de la jachère est aussi défrichée et mise en culture entre 1965 et 1993. On constate que la superficie occupée par la zone d'épandage en 1993 était cultivée en 1965. Certaines surfaces cultivées en 1965 sont laissées en jachère et d'autres sont pratiquement dégradées. On remarque une nette augmentation des surfaces nues cuirassées et une diminution progressive de la brousse tigrée.

Tableau 13. Modifications survenues sur les différentes classes d'occupation des sols de 1965 à 2007 sur le bassin versant de Tondi Kiboro

Occupation des sols	Superficie en 1965		Superficie en 1993		Superficie en 2007	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Bande boisée	2,11	13,55	1,1	7,06	1	6,42
Culture	3,98	25,56	2,93	18,82	1,72	11,05
Jachère	5,45	35	3,95	25,37	1,06	6,81
Ravine	0,36	2,31	0,45	2,89	0,51	3,28
Savane	0,92	5,91	0	0	0	0
Sol nu cuirassé	0,45	2,89	1,59	10,21	1,82	11,69
Talus avec végétation	2,3	14,77	2,13	13,68	1,9	12,2
Sol dégradé	0	0	2,43	15,61	5,84	37,51
Zone d'épandage	0	0	0,99	6,36	1,72	11,05
Total	15,57	100	15,57	100	15,57	100

En 2007, l'examen des superficies (cf. tableau 13) montre que certaines occupations du sol ont connu une évolution régressive, telles que la culture, la brousse tigrée, la jachère, le talus. Cependant d'autres

classes ont connu une évolution progressive, il s'agit de la ravine, du sol nu cuirassé, et de la zone d'épandage. La plus forte progression a été observée au niveau des sols dégradés.

L'importance de cette dégradation témoigne de la forte empreinte des activités humaines. L'évolution des surfaces dégradées s'est faite au détriment des cultures et des jachères (baisse des surfaces cultivées, réduction ou disparition de la jachère). Ces sols nus et dégradés occupent une superficie importante au niveau du bassin versant. Il s'agit des terrains dépourvus de végétation ou peu végétalisés, avec des croûtes, des ravines et des zones sableuses.

L'évolution des superficies des classes d'occupations des sols du bassin versant de Tondi Kiboro entre 1965 et 2007 présentée sur la figure 45 et le tableau 13 révèle une progression de la ravine, des sols dégradés et de la zone d'épandage et une régression de la bande boisée, de la jachère et des cultures. La savane arborée naturelle de 1965 est coupée au profit des cultures. Une importante partie des zones de cultures est devenue une zone d'épandage en 1993 (au niveau du bas-fond) et a progressé jusqu'en 2007 en occupant 11,05 % de la superficie du bassin versant.

On observe qu'entre 1993 et 2007 une grande partie des surfaces cultivées sont devenues des surfaces dégradées.

En 1993 une partie des surfaces cultivées est laissée en jachère et certains domaines de la jachère de 1965 ont été cultivés. Entre 1993 et 2007 on suppose que les jachères cultivées sont devenues des sols dégradés en 2007.

- Ce que nous montrent les images satellitaires à haute résolution

Dans le cadre de notre mémoire de maîtrise nous avons eu à effectuer des études sur l'évolution des occupations des sols au niveau du bassin-versant de Boubon, qui est situé à une vingtaine de kilomètres au Nord-Ouest de Niamey. Cette zone est aussi proche de la zone intéressée par notre travail doctoral. A ce niveau, nous avons comparé des cartographies d'occupations des sols faites par photo-interprétation (1975) et des données satellitaires (1989, 2005). Cette étude a en effet révélé des changements dans les usages des sols, elle a aussi mis en évidence l'accroissement des zones dégradées ainsi que la croissance du cône de déjection (Figure 42).

Aussi les analyses d'occupation des sols réalisées sur la commune de Dantiandou à partir des images satellites montrent également un fort changement dans les usages des sols et surtout une augmentation des sols dégradés au cours des trois dates.

6.3. Historique des changements d'usage des sols analysés par photo-interprétation Corona 1965/ Google Earth 2010

Afin d'étayer ce travail de télédétection, nous avons voulu réaliser une étude de la même région par photo-interprétation. Le but n'est pas tant de comparer les résultats obtenus avec les classifications obtenues par télédétection (les dates ne sont pas les mêmes) que de comparer les méthodes et de profiter de toute l'iconographie disponible. On dispose bien des photos aériennes des vols IGN et IGNN de 1950, 1975 et 1992, mais le recalage de dizaines de photos aériennes est un travail long et fastidieux.

- nous avons opté pour les images Corona, du nom d'une série de satellites espions américains qui durant la deuxième moitié des années 1960, ont photographié l'ensemble de la planète plusieurs fois à haute résolution (photo argentique avec possibilités de distinguer des objets de taille métrique). Ces documents ont été déclassifiés il y a quelques années et sont une source iconographique remarquable car relativement homogène sur l'ensemble des continents ; les photos disponibles pour le Niger sont de 1965. Cinq bandes de photos (80 km X 20 km) ont été recalées et géo-référencées, ce qui représente un travail important mais beaucoup moins long et délicat que pour une même couverture en photos aériennes IGNN.
- l'autre source d'information est constituée par les images satellites récentes proposées par le site Google Earth, qui donne accès à une information de qualité à haute définition (proche du métrique) ; c'est une couverture constituée des images de 2009 et 2010 qui a été utilisée ici. Aucun recalage géométrique n'a été nécessaire, ces images sont fournies gratuitement en mode géo-référencé.

L'intérêt de cette étude diachronique de l'occupation des sols est de montrer l'évolution que celle-ci a connu depuis le début de la sécheresse, la couverture ancienne datant d'avant le début de celle-ci. Par contre, sans étape intermédiaire ni étude locale détaillée (à prévoir postérieurement) on ne peut que faire une interprétation globale, sans pouvoir distinguer quelle part de l'évolution est liée au changement climatique (arbres tués directement par la sécheresse) et quelle part est liée aux activités humaines.

Le tableau 14 montre les taux de couverture de chaque grande catégorie aux deux dates. Les classes sont à dessein très larges et peu nombreuses afin d'éviter les erreurs de classement de zones difficiles à distinguer. Seules ont été distinguées : la brousse (voir plus bas), par opposition à l'ensemble cultures + jachères et aux plateaux latéritiques ; dans cette dernière catégorie, on distingue la brousse tigrée, la brousse tigrée dégradée et les placages sableux de plateaux cultivés. Dans l'ensemble cultures + jachères, on distingue une classe « sols dégradés », constituée essentiellement de zones érodées de haut de versant (jupe sableuse), parfois de mi ou bas de versant, où les sols ont subi une érosion

hydrique et éolienne les rendant pratiquement impropres à la culture. Il s'agit le plus souvent de croûte « ERO » (Casenave et Valentin, 1992) c'est-à-dire une croûte d'érosion, constituée d'une fine couche riche en argile recouvrant une couche épaisse de 20 à 50 cm de sables dégradée par le splash, le ruissellement et la dessiccation.

La zone couverte par cette étude a une forme de losange (liée à la forme des photos argentiques Corona) ; la localisation de celui-ci est indiquée dans la figure 14 au chapitre 2.

Tableau 14. Evolution de l'occupation du sol entre 1965 et 2010 (photo interprétation de photos Corona de 1965 et des images fournies par Google Earth pour 2010)

	Surface 1965 km ²	surface 2010 km ²	% 1965	% 2010
Brousse	2810	0	42,25	0
Cultures + Jachères	1320	3394	19,8	51,4
Sols dégradés	0	735	0	11
Plateaux latéritiques sans BT	1983	707	3	10,6
Brousse Tigrée	1519	671	22,8	10,1
Brousse Tigrée Dégradée	0	340	0	5,4
Fleuve	51	51	0,8	0,8
Terrasses alluviales	53	40	0,8	0,6
Villages	9	22	0,13	0,33
Dallol Bosso	665	665	10,4	10,4
TOTAL	6633	6633	100	100

Clairement on constate de profondes évolutions entre ces deux dates (figures 46 et 47)

- la brousse : celle-ci n'existant plus, on utilise peut être ici une dénomination inappropriée ; il s'agit d'une formation qui couvre l'ensemble de la surface (zones sombres continues sur les photos), sans que l'on sache vraiment si la couverture est surtout herbacée et graminéenne (possible vu le « grain » très fin de ces surfaces) ou arbustive voire arborée ; ce n'est pas l'objet du débat ici, car ce qui nous intéresse ici est le fait qu'il s'agit d'une couverture continue du sol sans espace nu ou ouvert. Cela signifie que l'ensemble de la surface est recouvert de végétation, ce qui implique une infiltration et une évapotranspiration importante, et en conséquence, un ruissellement faible ou inexistant. En tout cas, cette formation qu'il faudrait définir dans sa forme à partir de photos obliques, a disparu en 2010, remplacée essentiellement par la catégorie suivante ;
- les cultures et jachères, que l'on a regroupées ici à dessein, du fait que cet ensemble est la zone de cultures, la jachère faisant complètement partie d'un système cultural dont elle

représente la phase de repos et de re-fertilisation ; cette classe a plus que quadruplé entre 1965 et 2010, comme cela a été constaté pour l'ensemble du Niger (Guengant et Banoin, 2003) et du reste dans l'ensemble du Sahel. Les rendements restent très faibles – ils sont même en baisse sur le long terme au Niger-, la hausse indispensable de la production pour nourrir une population doublant tous les 18-20 ans ne peut se faire que par l'extension des zones cultivées ; celle-ci progresse donc sur les secteurs réputés les moins fertiles dans la topographie, et dans les zones septentrionales, où la pluviométrie de plus en plus faible et erratique rend l'agriculture pluviale extrêmement aléatoire.

- les sols dégradés ; l'accélération du rythme des mises en jachère (raccourcissement des périodes de repos cultural) et l'extension des zones de culture vers les secteurs de sols plus pauvres et plus pentus a conduit à l'apparition de dépressions hydro-éoliennes, formées par le vent durant la saison sèche, élargies et rattachées par les filets du ruissellement, celui-ci étant facilité sur des surfaces devenues glacées et peu perméables. Sans atteindre des surfaces très importantes, ces zones dégradées n'en représentent pas moins 18 % de la surface totale de la zone de plateaux du degré carré de Niamey ; on verra plus loin que cela a une importance primordiale en terme de bilan hydrologique, car ces surfaces dégradées, subissant un coefficient de ruissellement de plus de 60%, remplacent des zones de brousse ou de cultures où celui-ci est bien plus faible (0 à 5% en général suivant la qualité et la fréquence du sarclage pour les zones cultivées).

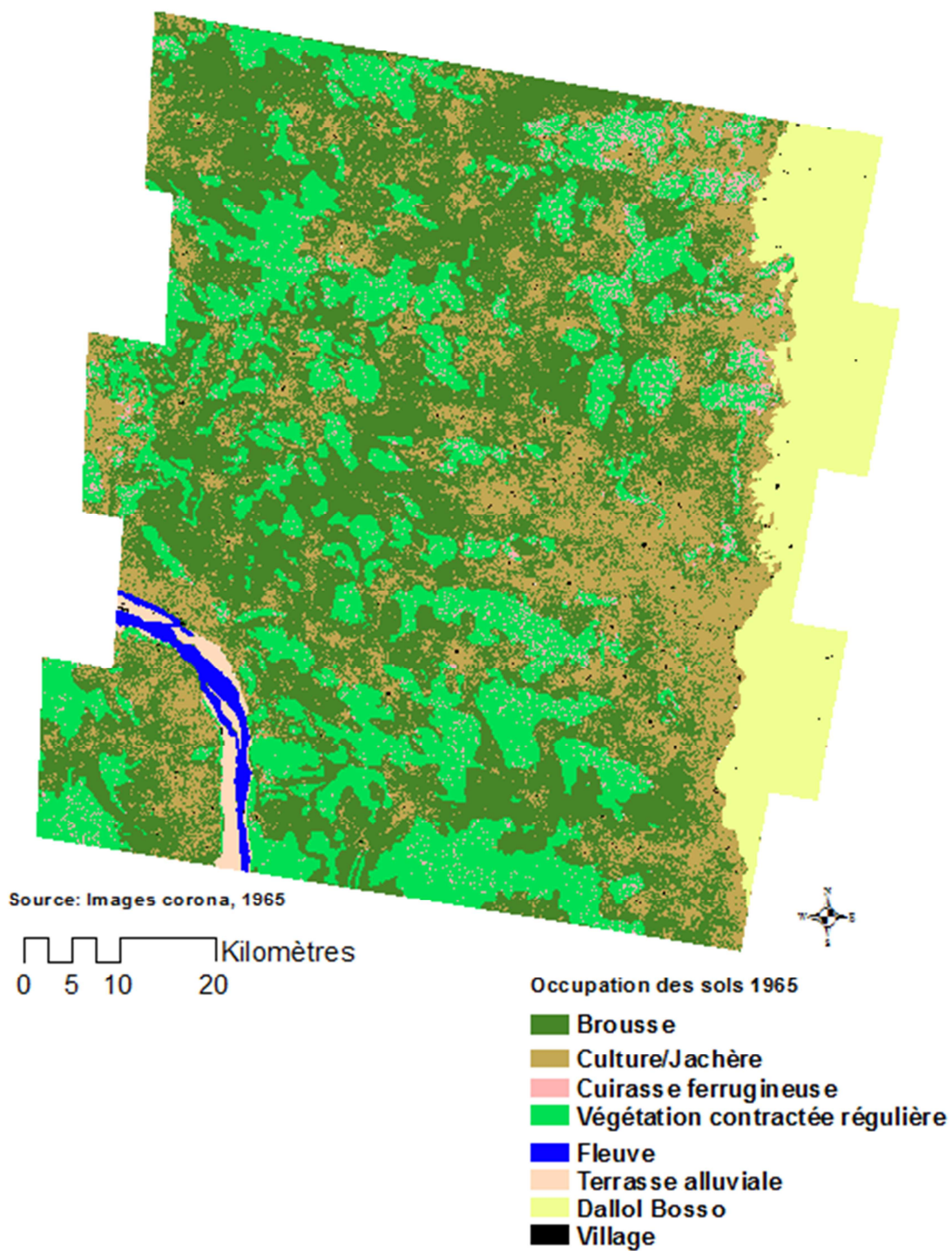


Figure 46. Cartographie de l'occupation des sols par photo-interprétation d'images CORONA prises en 1965 de la zone de plateaux du degré carré de Niamey (voir figure 14) (SOULEY YERO K. 2012)

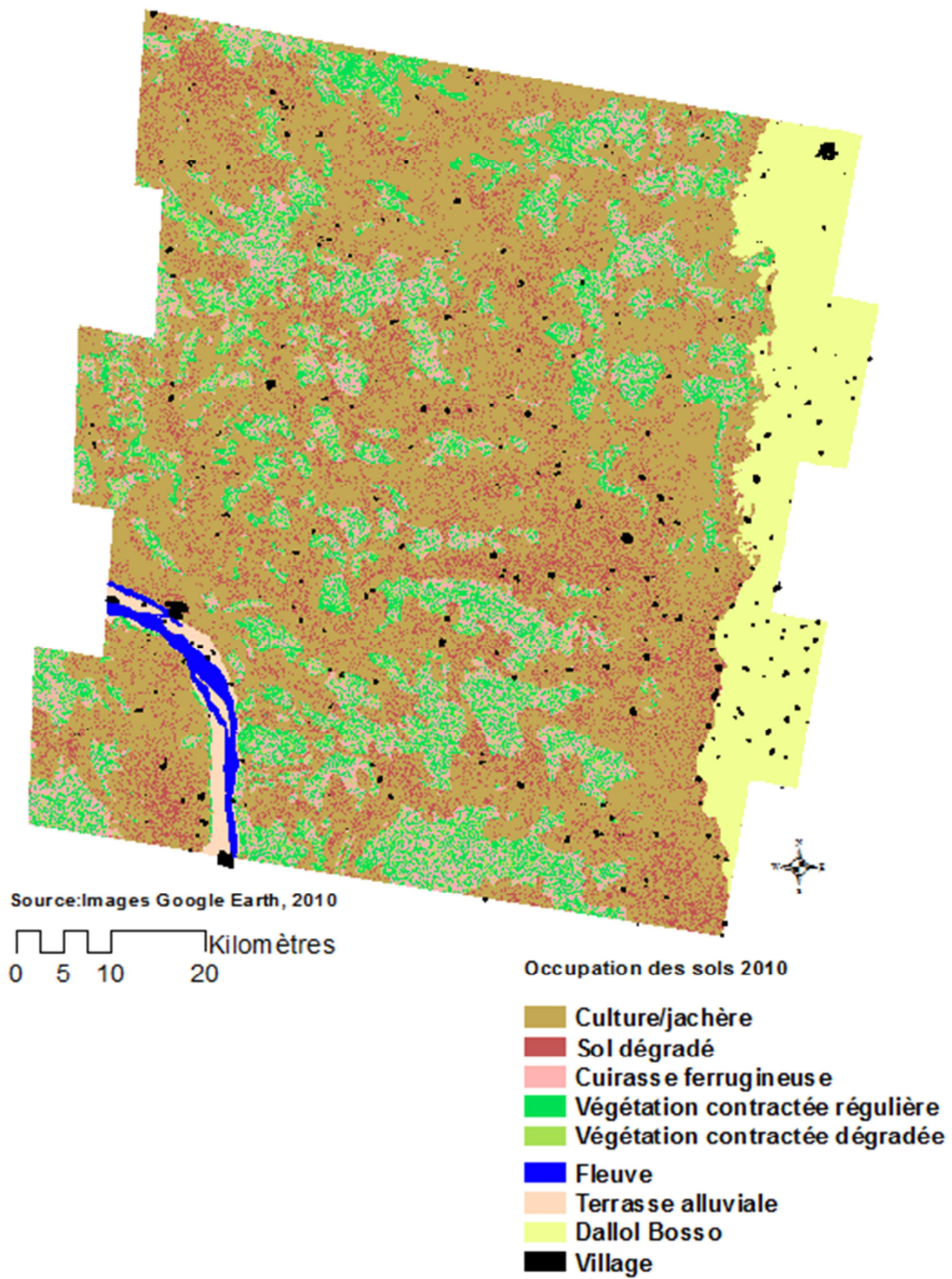


Figure 47. Cartographie de l'occupation des sols par photo-interprétation d'images satellitaires Google Earth de 2010 de la zone de plateaux du degré carré de Niamey (fig.14) (SOULEY YERO K. 2012)

- Les plateaux latéritiques constituent, contrairement aux catégories précédentes, un ensemble géomorphologique ; il ne varie donc pas d'une période à l'autre. Par contre, les formes végétales qui le caractérisent ont, elles, beaucoup évolué ces dernières décennies :
 - La brousse tigrée est comme on l'a vu la formation contractée caractéristique des plateaux cuirassés sahéliens ; elle est en forte régression, d'une part du fait d'une mortalité élevée sur les plateaux latéritiques aux sols squelettiques disposant de très faibles réserves hydriques ; d'autre part, ici dans la région proche de Niamey, du fait de la consommation de la ville (98% des ménages de Niamey font encore leur cuisine au bois) ;
 - Brousse tigrée dégradée : localement, la brousse tigrée a survécu à la sécheresse et/ou la surexploitation, et il reste des lambeaux de végétation conservant la forme en plan de la brousse tigrée (en forme de lanières) ; elle représente une extension comparable à celle du reliquat de brousse tigrée résiduelle ;
 - Placages sableux de plateau cultivés ; localement, les plateaux latéritiques sont recouverts de dépôts sableux ; de plus en plus, la pression sur les ressources augmentant, ces dépôts sableux sont mis à profit pour les cultures.

Plus précisément, on remarque que la brousse tigrée (BT) est en régression ou à présent sous sa forme dégradée surtout :

- Dans les environs de Niamey ;
- Dans les secteurs septentrionaux
- Aux alentours des axes routiers et des gros villages.

Les secteurs où la « brousse » de 1965 a le plus reculé sont à peu près ces mêmes secteurs.

Par ailleurs, on constate que des larges secteurs qui portaient de la « brousse » en 1965 sont à présent remplacés par des plages de sols dégradés.

En 1965, des zones étendues des plateaux portaient un autre type de végétation contractée, la « brousse tachetée » (non individualisée ici), typique de zones plus humides, sud-sahéliennes ou nord soudaniennes ; on les trouve encore en abondance dans les zones périphériques du parc du W et de l'Arli, au Sud-Ouest du Niger et au Sud-Est du Burkina Faso. La plus grande partie de ces brousses tachetées a fait place à de la brousse tigrée ou de la brousse tigrée dégradée.

Ce recul de la brousse tachetée, de même que la forte dégradation de la brousse tigrée au nord du degré carré de Niamey, tendent à montrer que la sécheresse qui caractérise le Sahel et une grande partie de l'Afrique de l'Ouest depuis 1968 a un impact sévère sur les végétations naturelles, lesquelles reculent et abandonnent leurs secteurs d'implantation habituels ;

Enfin, et en dépit de cette sécheresse prolongée (mais en lien avec elle, du fait du recul général des rendements agricoles qu'elle provoque), les zones de cultures (culture + jachères) sont en forte

progression partout, mais plus encore, en proportion, là où elles étaient faiblement représentées en 1965, c'est-à-dire au nord ; ce qui signifie que les cultures s'étendent dans les zones où elles sont les plus risquées, les plus aléatoires et où elles produisent les plus faibles rendements.

L'évolution décrite ici paraît bien plus drastique que celle décrite par l'analyse menée par télédétection. Ceci vient en grande partie des dates choisies. On compare ici la situation actuelle avec celle de la période relativement humide qui a précédé la grande sécheresse de l'Afrique de l'Ouest, donc avec une période très favorable au développement végétal, très lié à la pluviométrie. Alors que l'étude diachronique principale réalisée dans cette thèse, par télédétection, s'intéresse à l'évolution depuis 1986, c'est-à-dire en prenant comme point de départ la situation la plus défavorable, au contraire, à la végétation, puisqu'elle est située à la fin de la période la plus prononcée de la sécheresse, donc probablement au moment où la végétation avait le plus souffert de cette accumulation d'années déficitaires.

On verra ci devant ce qu'il en est des études régionales par télédétection s'intéressant à toute la bande sahélo-soudanienne de l'Atlantique au lac Tchad voire à l'Océan Indien.

Auparavant, et avant d'entrer dans le détail des enseignements tirés de la photo interprétation, on se propose de mener une petite synthèse rétrospective sur les principaux travaux de recherche fondés sur la photo-interprétation, qui intéressent la sous-région dans les dernières décennies.

6.4. Discussion: critique et comparaison avec les travaux antérieurs d'autres équipes

6.4.1 Sur la commune de Dantiandou

La commune de Dantiandou, en plus d'avoir accueilli les super sites des expériences HAPEx Sahel et AMMA, a été un site expérimental du programme Jachères (Orstom-CIRAD) ; elle est également depuis une vingtaine d'années l'un des sites observatoires du réseau ROSELT (Réseau d'Observatoires de Surveillance Ecologique à Long Terme). Dans ce cadre, elle a fait l'objet de cartographies diachroniques antérieures à la nôtre. Ainsi, une carte de l'occupation de sol de la commune de Dantiandou a été réalisée par Ali Mahamane (2009) (figure 48).

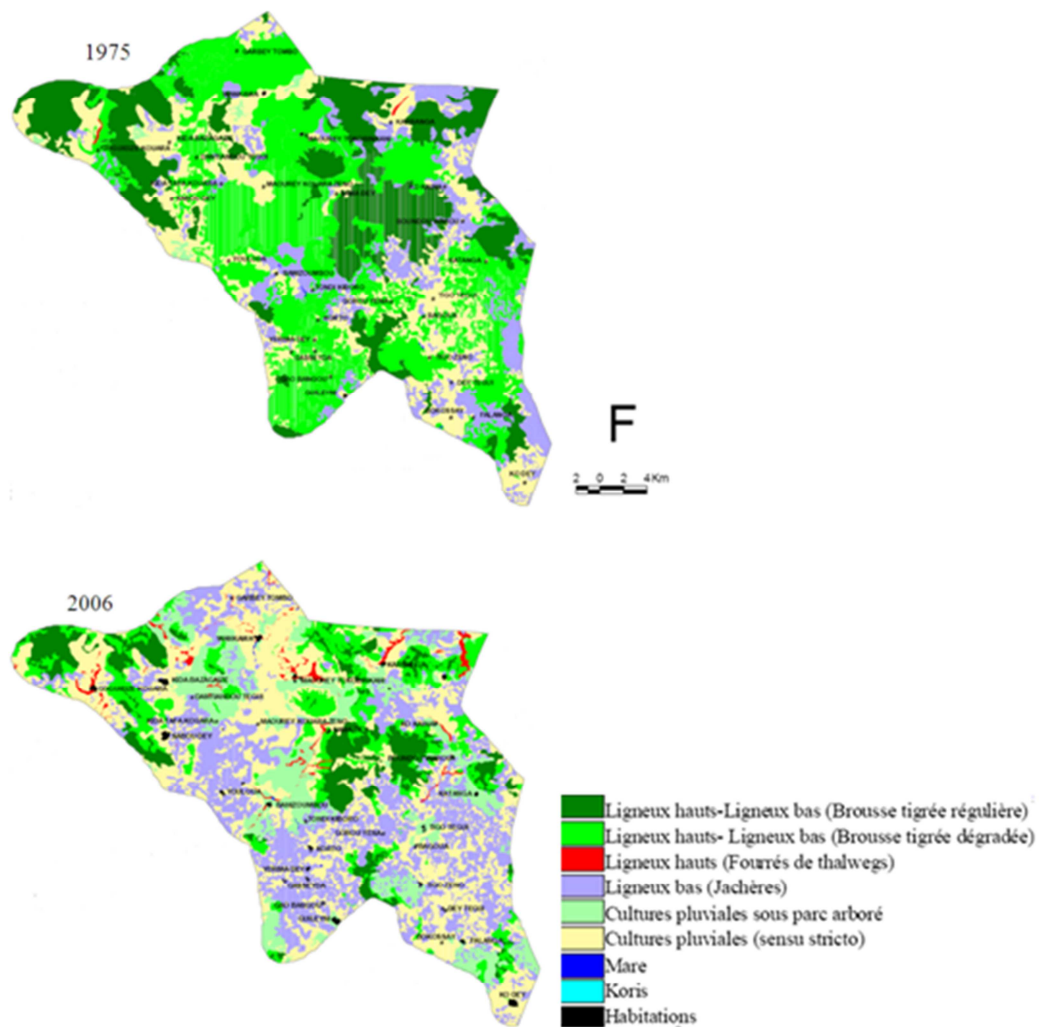


Figure (source Poster de C.Bobée réunion ECLIS)

Figure 48. L'évolution de l'occupation des sols 1975-2006 vue par Ali Mahamane (2009)

Très clairement, cette carte fait apparaître la très forte progression des jachères et des cultures pluviales au détriment de la végétation naturelle (appelée ici bizarrement brousse tigrée dégradée). Entretemps, Loireau et d'Herbès (1996) et Loireau (1998) avaient établi une cartographie des états de surface de la zone du super site central-est de HAPEX à base de télédétection qui met bien en évidence l'importance de la topographie dans la répartition des formes de couvertures pédologiques. La même zone d'étude de la thèse de Maud Loireau a été utilisée par Leduc et Loireau (1997) qui la décrivent comme un carré situé dans « le degré carré » de Niamey. Leduc et Loireau (1997) ont comparé des photos aériennes de 1950, 1975 et 1992 et ont trouvé que les surfaces cultivées (cultures ou jachères) étaient limités à 12% en 1950, atteignant 33% en 1975 et 65 % en 1992, ce qui s'est traduit par la disparition progressive de la végétation naturelle (figure 49).

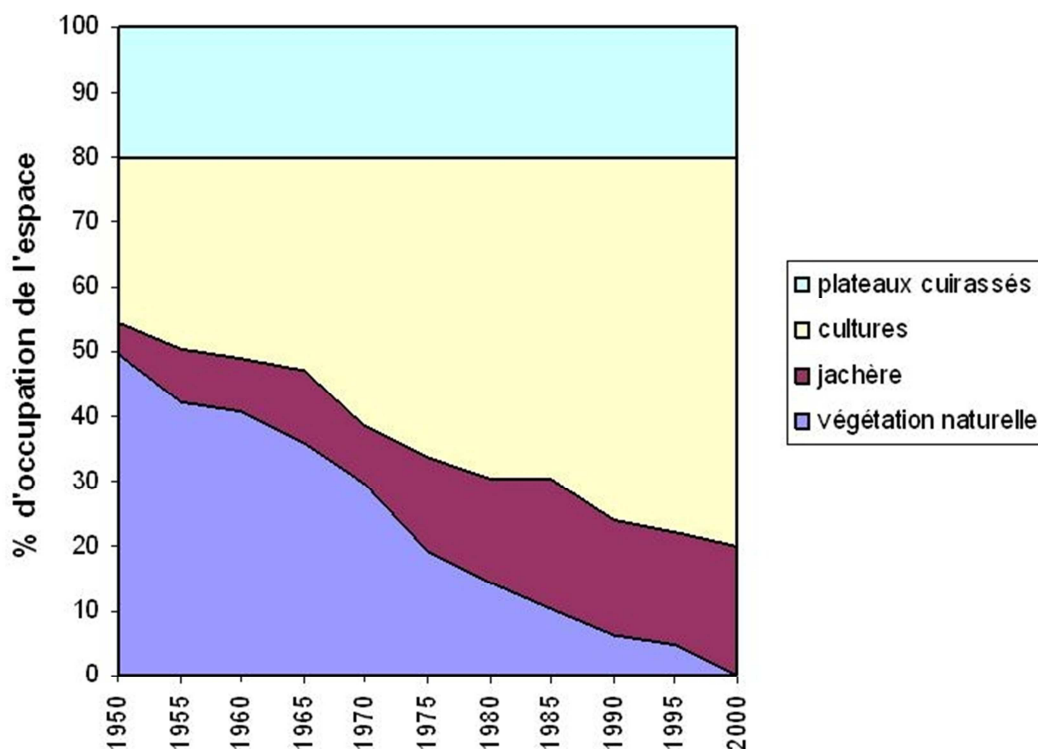
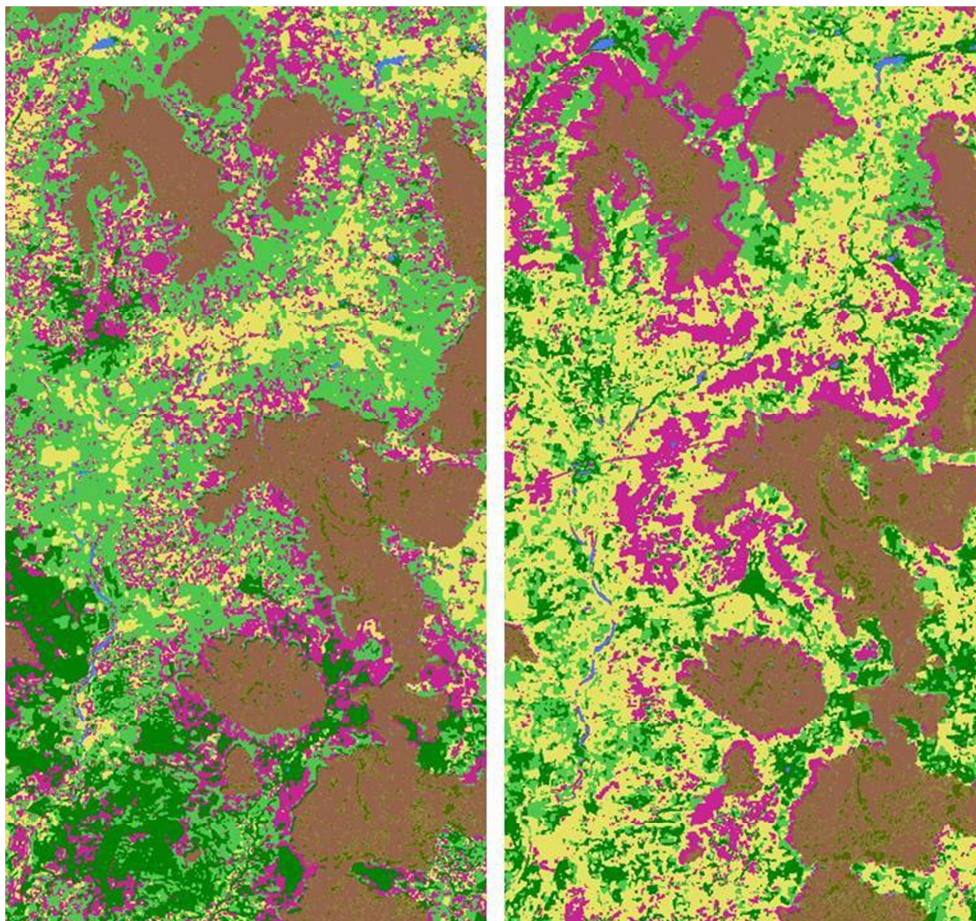
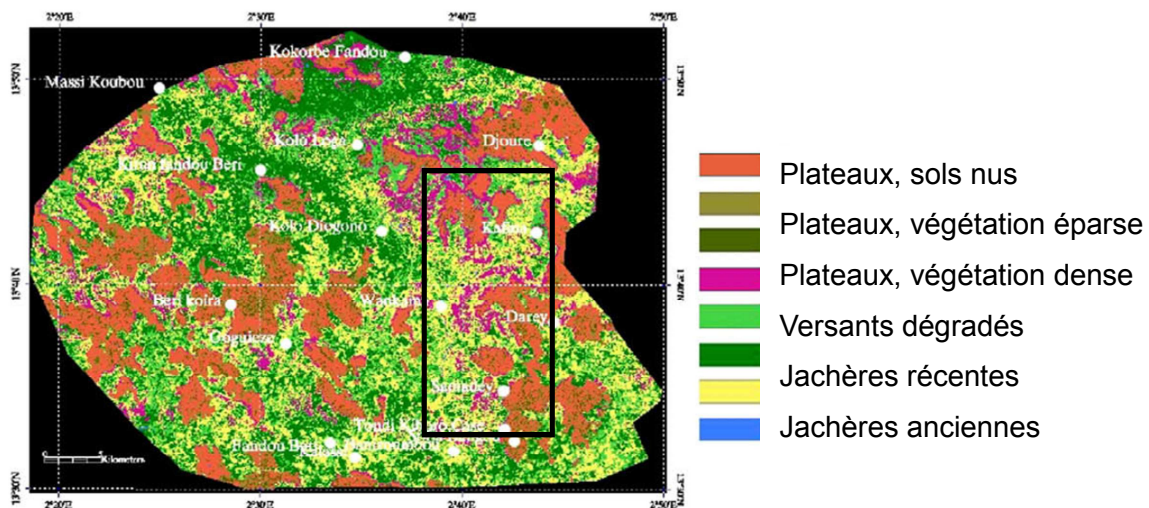


Figure 49. Evolution de l'occupation des sols du degré carré de Niamey par Leduc et Loireau 1997)

Saux-Picart *et al.* (2009) présentent une classification d'une scène SPOT du 12 octobre 2005 avec 3 classes sur plateaux (sol nu, végétation peu dense, végétation dense), et 4 classes dans les bas-fonds: jachères (jeune et ancienne), culture, sol dégradé. La classification leur permet d'évaluer les couvertures comme suit : sol nu (plateau) 17,6%, végétation dense (plateau) 3%, végétation peu dense (plateau) 4,5%, sol dégradé 10%, culture 25,9%, jachère jeune 16,3%, jachère ancienne 22,6% (figure 50). La somme des 4 dernières classes correspond à peu de choses près à l'estimation de Leduc et Loireau (figure 49).

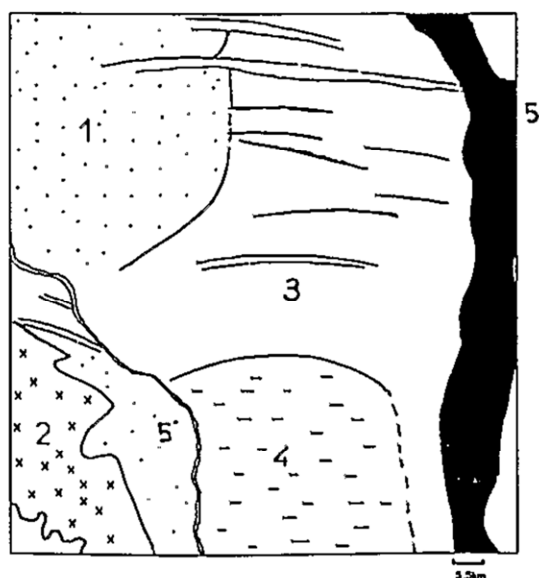
Cette dernière carte (Ottlé *et al.*, 2007) montre bien comment, en dehors des plateaux, ont progressé cultures, jachères et zones dégradées, au détriment de la végétation naturelle.

Courault *et al.*, (1991) ont travaillé dans le degré carré dans le cadre du programme HAPEX – SAHEL afin de réaliser une carte permettant de caractériser les états de surface de la zone d'étude (figure 51). Pour ce faire ils disposaient des cartes topographiques (1/200000 et 1/50000), une carte pédologique (1/500000), images NOAA, Landsat MSS, et SPOT à des saisons différentes.



Ottlé et al., 2007

Figure 50. Classification non-dirigée du super site d'après Saux-Picart *et al.* 2009 (en haut) et zoom en 1986 (à gauche) et 2007 (à droite) de la partie centrale de la vallée de Dantiandou (Ottlé *et al.*, 2007)



Zone	localisation	% du DCN	Indice de végétation	Caractéristique principale
1	Nord-ouest	17.5%	faible	densité de plateau faible
2	Sud-ouest	7.8 %	Moyen à élevé	Plateau cuirassé unique et massif sur socle, brousse tigrée ou mouchetée dense
3	Centre	41.1 %	Moyen à faible	Plateaux morcelés découpés à talus marqués, vallées plus ou moins larges cultivées en mil
4	Sud-central	13.1 %	élevé	Plateaux cuirassés sans talus marqués, vallées étroites, brousse tigrée et strate herbacée bien développées
5	Est	12.6 %	élevé	Dallol Bosso, vallée quaternaire intensément cultivée en mil, nappe en sub-surface
5'	Ouest	7.9 %	élevé	Vallée du Niger, cultivée en mil, rizières, sables alluviaux

Figure 51. Grands domaines physiographiques du degré carré (Courault *et al.* 1991) et leurs principales caractéristiques physiographiques (à partir d'une image NOAA)

Cette étude est une bonne synthèse de ce que sont les grands ensembles paysagers de la région du DCN, au sud-ouest du Niger. Elle montre par ailleurs quel en est le type de végétation principal.

6.4.2 Dans d'autres terroirs sahéliens

La thèse de De Wispelaere (1990) sur les processus de désertification au Sahel du Burkina Faso est l'un des travaux les plus ambitieux jamais réalisés en photo interprétation dans la région (Figure 52). Pour de nombreux sites du Nord du Burkina, il a interprété les photos aériennes de manière à montrer l'évolution de la végétation avant et durant la sécheresse.

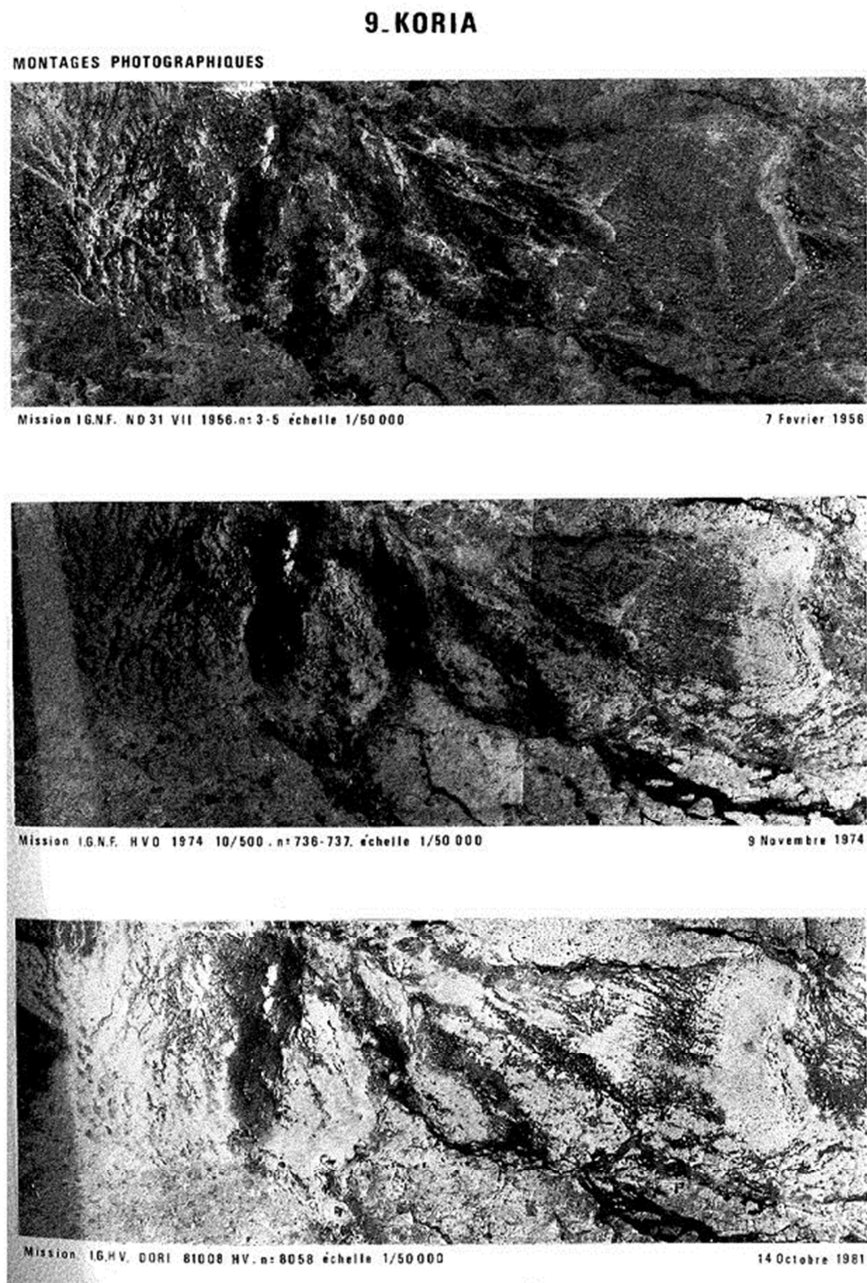


Figure 52 ; exemple de mise en évidence de la désertification par De Wispelaere (1990)

Des chercheurs japonais de l'Université de Tokyo (Chinen, 1999) ont réalisé une étude très précise et centrée sur notre point d'intérêt scientifique, les conséquences de la dégradation des sols sur le réseau hydrographique. Ils ont montré comment les bassins de certains petits korigs affluents du Niger dans les environs de Niamey ont connu une profonde mutation de leur hydrographie en lien avec l'augmentation du ruissellement, dans cette zone proche de la ville de Niamey, donc là où on peut supposer que l'extraction de matières végétales sera la plus forte.

Les extraits (figure 53) des cartes produites par Chinen montrent bien entre autres le processus de rupture d'endoréisme, décrit récemment par Mamadou (2012) et Descroix *et al* ; (2012b).

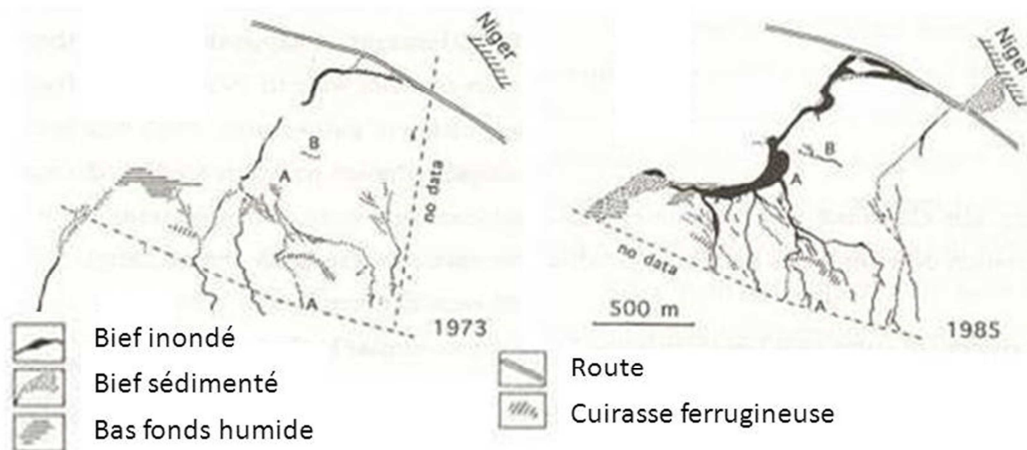


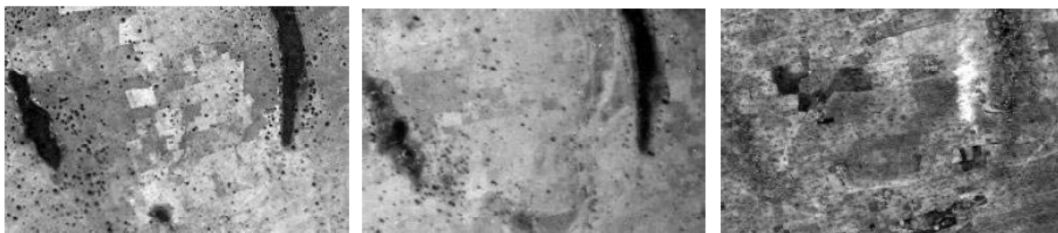
Figure 53. Schéma montrant le réseau hydrographique du bassin du kori de Kourtéré, en rive droite en face de Niamey (Chinen, 1999) en 1973 et en 1985

En effet le drain principal apparaît clairement interrompu en plusieurs sites par des mares en 1973, alors qu'il est continu en 1985 ; étant donné qu'il s'agit de la période la plus sèche dans la région, on peut supposer sans trop d'erreur que ce n'est pas l'abondance des pluies qui a causé ces ruptures d'endoréisme. Le kori de Kourtéré, qui finissait dans des mares en 1973, est devenu depuis un grand pourvoyeur de sédiments au fleuve ; la crue du 6 septembre 1998 (il a plu plus de 100 mm en quelques heures sur la rive droite du fleuve au niveau de Niamey) a en particulier formé un énorme cône de déjection, qui a coupé le pont de la route de Namaro (toujours pas reconstruit à ce jour) et est bien visible sur les images satellitaires.

Deux études de bonne qualité ont ensuite utilisé et la télédétection et la photo interprétation pour étayer des études diachroniques de l'occupation des sols.

- Celle de Larwanou *et al* (2006), et surtout les travaux de Reij *et al.*, (2009) visent à montrer comment la RNA (Régénération Naturelle Assistée) a permis de multiplier très rapidement et sur de grandes surfaces le nombre d'arbres présents dans les champs, tel qu'il est préconisé depuis quelques décennies ; on favorise bien sûr les espèces fixatrices de l'azote (*Acacias sp.*, et *Faidherbia albida* en particulier) au milieu des champs, d'autres espèces utiles en bordure de champs (fruitiers, tel le zyzophus –jubarier- ou utiles comme

clôture ou matériau comme le *Balanites aegyptiaca*) où elles voisinent avec des buissons tels le bissap (*Hibiscus sabdariffa*) ; cette technique aurait toujours été pratiquée dans certaines régions, et elle a été remise à l'honneur par des ONG au début de la sécheresse quand les signes de dégradation des sols sont devenus nombreux. Les deux publications sont des rapports remis à des ONG par des personnes, chercheurs, parties prenantes dans ces travaux ; ils ont donc tendance à voir très positivement les résultats des dynamiques de reverdissement qu'ils préconisent et encadrent. Ils montrent des couples de photos. Comme on le voit sur la figure 54, le recul des arbres est très net entre 1957 et 1975 ; à l'inverse, la reprise de la végétation arborée par RNA après 1975 est très nette sur l'image de 2005.



Note the natural wetlands (two dark areas in 1957 and 1975) that have been converted to off-season farmland, the decline in grassy fallow (medium gray areas in 1957 and 1975), six very small settlements in the 2005 image, and the large number of small trees that reconstitute the young parkland in 2005.

Figure 54. Photos montrant le déclin de l'arbre entre 1957 et 1975 dans une région de l'est du Niger, ainsi que la reprise des arbres par RNA entre 1975 et 2005 (Reij *et al.*, 2009)

- Celle de Leblanc *et al.* (2008) est centrée, elle, sur la même région que notre travail de thèse ; le degré carré de Niamey. Le but de cet article d'hydrologie est de montrer que les changements d'usage des sols sont à l'origine des modifications du cycle hydrologique ayant conduit à l'apparition du paradoxe de Niamey, à savoir la hausse du niveau phréatique durant les années de sécheresse. Dans ce cadre, les auteurs ont mis à profit les photos aériennes IGN et IGNN pour mettre en évidence les changements d'usage des sols ; l'évolution, telle qu'elle apparaît sur les figures 55 et 56, est sidérante et on comprend mieux comment le ruissellement a pu augmenter au point de rendre les mares envahissantes. Ce travail ne permet pas en revanche d'intervenir dans le débat sur le reverdissement ; ses documents sont de très bonne qualité et très bien interprétés. Mais le dernier vol IGNN date de 1992 ; or la plus grande partie du reverdissement a eu lieu ensuite, et en particulier lors de la légère reprise de la pluviométrie après 1995.

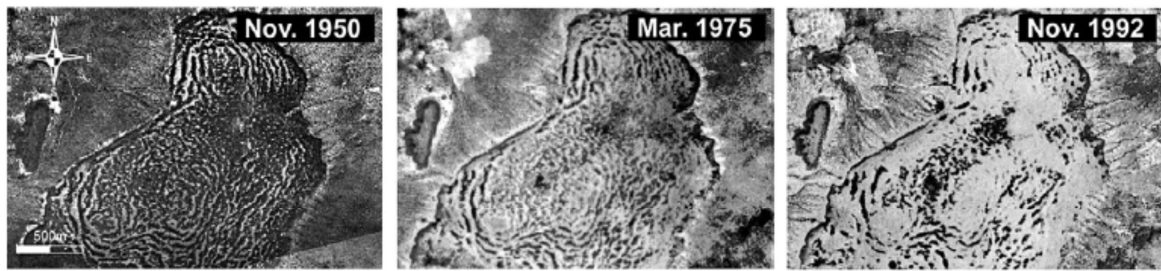


Figure 55. Photographies aériennes montrant le recul de la brousse tigrée sur un plateau du degré carré de Niamey de 1950 à 1992 (Leblanc *et al.*, 2008)

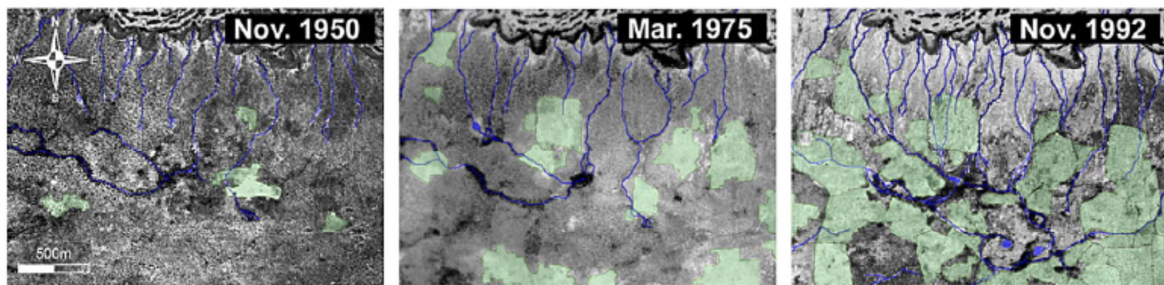


Figure 56. Photographies aériennes montrant le recul de la végétation naturelle remplacée par des cultures et jachères, ainsi que la densification du réseau de drainage, entre 1950 et 1992 sur un versant du degré carré de Niamey (Leblanc *et al.*, 2008)

Par contre, les recherches menées par l'équipe AMMA du Mali (Kergoat *et al.*, 2007 ; Hiernaux *et al.*, 2009a ; Gardelle *et al.*, 2010) montrent une toute autre évolution dans le Gourma Malien (Figure 57) avec dans un premier temps, comme au Niger, une forte baisse de la couverture végétale entre 1956 et 1996 du fait de la sécheresse ; ensuite dans la dernière décennie (ici entre 1996 et 2005), on observe une forte recrudescence de la végétation arbustive et arborée, probablement en lien avec la reprise partielle des pluies. Cependant comme on le verra au chapitre 7, les zones de sols minces avaient perdu l'essentiel de leurs sols et nutriments et la végétation n'a pas pu y reprendre racine, ce qui n'exclut pas qu'elle le ferait avec l'aide de travaux de services éco-systémiques.

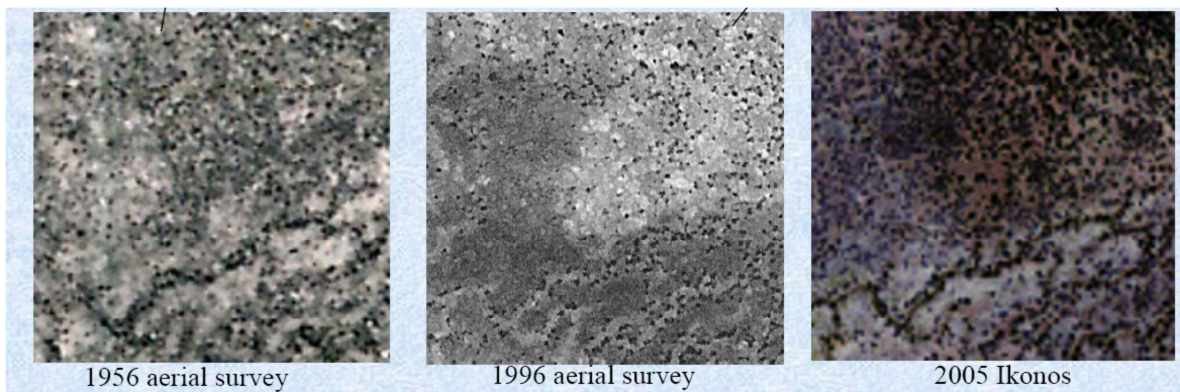


Figure 57 .Evolution de la couverture végétale sur une portion du Gourma Malien (d'après Kergoat *et al.* EGU, 2007) : utilisation de la photo-interprétation et de la télédétection

Cette dernière étude (figure 57) a utilisé des photos aériennes et des scènes satellites Ikonos, dont la définition est suffisante pour permettre une comparaison avec les photos aériennes en photo-interprétation.

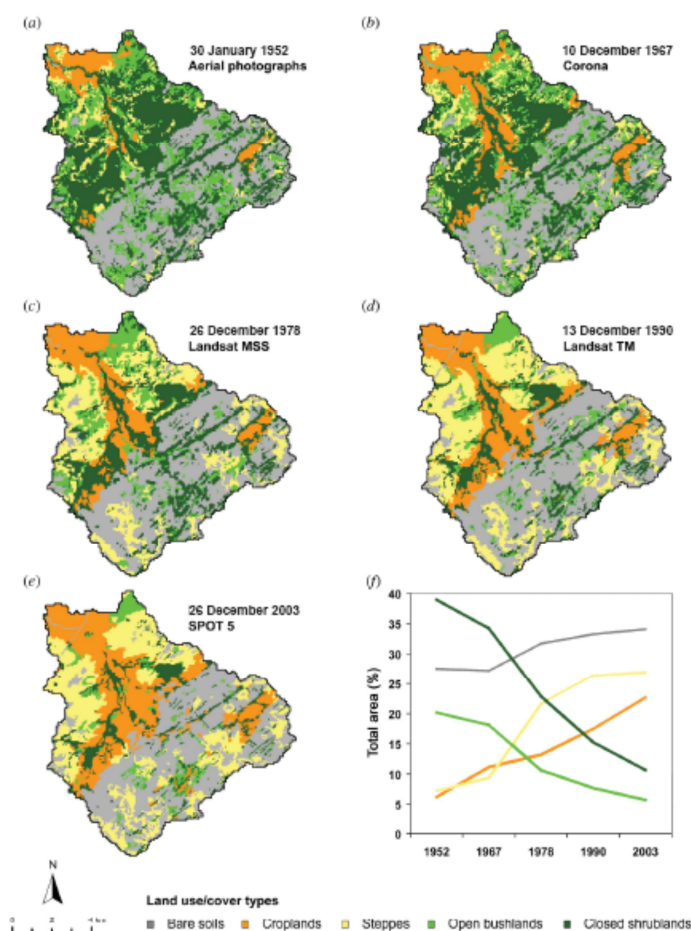


Figure 58. Evolution de l'occupation des sols du bassin de Kouonbaka (Mali) déterminée par photo-interprétation et télédétection (Ruelland *et al* 2011, figure 10)

Les travaux de Ruelland *et al.* (2011) réalisés dans une autre région du Sahel malien, le bassin de Kouonbaka, situé à 60 km au sud de Mopti, montrent une forte diminution des végétations naturelles (brousse, savanes, etc) entre 1952 (59% de la surface) et 2003 (17%). Les sols nus, liés essentiellement à des affleurements de roches dures en 1952, progressent peu et de manière diffuse, sans montrer de dégradation localisée précisément sur un type d'ancienne occupation des sols. L'essentiel de l'accroissement des zones de sols nus s'est opéré entre 1967 et 1978, période couvrant la première phase sévère de la sécheresse (1973-1974). Ensuite cette progression est lente et pourrait refléter la dégradation progressive d'une petite partie des zones mises en culture (Figure 58).

6.5. Analyse de la variabilité spatiale de l'occupation du sol entre 1950 et 2010

- quels liens avec les éléments de la toposéquence ?

La cartographie issue de la photo-interprétation permet de faire des relations entre éléments de l'évolution de l'occupation des sols et ceux de la toposéquence. La toposéquence typique de la région du Fakara et de la vallée fossile du kori de Dantiandou (mais représentative d'une grande partie du bassin sédimentaire des Iullemmeden, est constituée d'un plateau cuirassé, d'un long versant concave et d'un bas-fonds (Fig. 59) (voir description détaillée dans D'Herbès et Valentin, 1997).

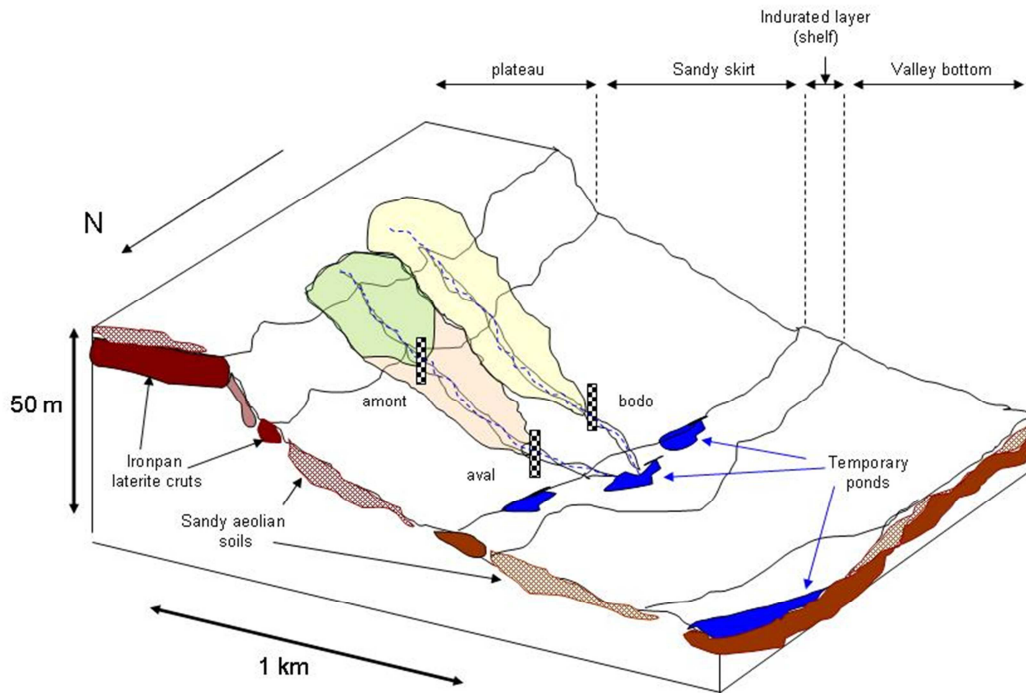


Figure 59. Principaux éléments de la toposéquence dans le Fakara et la vallée fossile du kori de Dantiandou ; localisation des bassins expérimentaux de Tondi Kiboro (Descroix *et al.*, 2012b)

Rappelons que l'élément structurant des paysages de cette région, en l'absence de cours d'eau hiérarchisés et exoréiques, ce sont les plateaux cuirassés qui dominant d'à peine quelques dizaines de mètres (50 m au maximum) des bas-fonds dont ils sont distants de plusieurs kilomètres (de 2 à 5 km en général) (voir comment ils ont été ségrégués, chapitre 4.2); d'où des profils de versants en glacis concaves réguliers ; ces versants sont fréquemment interrompus, surtout lorsqu'il sont longs et tendus, par un replat à mi pente lié à la présence de croûte latéritique (voir figure 59) ; ce replat est souvent occupé par des mares, qui peuvent être ou pas connectées avec la moitié aval du versant, par débordement saisonnier ou épisodique. Les bas-fonds sont occupés en partie (croissante du fait des modifications des conditions de ruissellement) par des mares temporaires, celles-ci étant, pour les raisons susdites, de plus en plus durables, devenant parfois permanentes. Mais la plupart des mares devenues permanentes sont en fait liées à l'affleurement de la nappe, dont le niveau monte ; cette remontée de la nappe a été démontrée comme étant liée à la multiplication des mares, celles-ci étant les principales zones de recharge de la nappe.

Les cartes de l'occupation des sols en 1965 et 2010 (Figures. 46 et 47) montrent les éléments suivants, vis-à-vis de la toposéquence :

- Les plateaux latéritiques ont avant tout connu une érosion forte des bandes de brousse tigrée ; cette régression serait en grande partie liée à la sécheresse (aux effets terribles sur ces zones aux sols squelettiques) (comm. pers de Pierre Hiernaux et d'Anne Luxereau) ; des bandes entières de BT ont disparu. Depuis la relative remontée des précipitations (début des années 1990), la disparition des bandes de BT ne semble pas freinée, car l'extraction du bois à but de commercialisation (ici vers la ville de Niamey essentiellement) a pris le relais de la sécheresse pour venir à bout de cette BT ; nul doute que les plateaux fournissent des volumes croissants d'eau de ruissellement du fait de la diminution de leur capacité de rétention (constituée par ces bandes végétalisées capturant tout le flux de ruissellement des zones nues, les transformant par infiltration et évapotranspiration) ;
- Ces bandes de BT sont souvent restées en place sous forme très dégradée (d'où la classification en BT dégradée dans la figure 46), perdant du coup une grande partie de son pouvoir évaporateur et infiltrant, et pouvant donc jouer un rôle dans la modification globale du cycle de l'eau telle qu'observée ces dernières décennies ;
- Les rares placages sableux, déjà partiellement mis en culture en 1965 (Fig. 46), sont à présent intégralement exploités (Fig. 47) ;
- L'extension de l'ensemble cultures-jachères a recouvert l'ensemble de la surface hors-plateaux ;
- Elle s'est faite aussi sur les rares placages sableux présents sur ces plateaux, qui sont tous cultivés à présent ;
- On peut donc dire que l'ensemble de la zone cultivable est d'ores et déjà cultivée, depuis plusieurs années déjà ; en fait depuis la fin des années 1990 début des années 2000, l'extension de l'agriculture ne peut plus se faire que vers le nord, dans des zones où la pluviométrie diminue et devient très irrégulière, et où elle entre en conflit d'usage de l'espace et des ressources avec l'activité traditionnelle de ces pâturages : l'élevage ;
- Sur les zones les plus pentues, sous la corniche des plateaux, qui ont souvent été défrichées tôt après l'occupation des auréoles autour des villages, car elles avaient la réputation d'être plus fertiles, l'érosion éolienne et hydrique a provoqué l'apparition et l'extension de zones de sols encroûtées ; la pente a pu, dans ce seul cas, être un élément décisif dans la formation du ruissellement et de l'érosion. L'intensité de cette dernière est attestée par le déchaussement des buissons (*Guiera senegalensis* en général) qui finissent par laisser apparaître tout leur système racinaire, témoignant d'un creusement annuel pluri-centimétrique (voire pluri-décimétrique). Le ruissellement dans ce haut des glacis peut s'être formé sur les plateaux, à la faveur du déboisement de bandes entières de la brousse tigrée (voir plus haut) ;

- Les bas-fonds sont défrichés et comportent de moins en moins de ripisylve ou d'espères typiques de sols hydromorphes, de plus en plus de cultures, souvent du mil, et de plus en plus, de cultures à haute valeur ajoutée tels les légumes, les fruits, les condiments ; du fait de l'accroissement très fort du ruissellement, ces bas-fonds, comme on l'a signalé, sont de plus en plus occupés par des mares, nettement plus nombreuses et étendues avec le temps, et de plus en plus durables ; si elles sont toujours une ressource facilement accessible, surtout utile pour le bétail revenu après la fin de la mousson, ou pour quelques (très rares pour le moment) agriculteurs faisant le pari de l'intensification par petite irrigation et cultures de haute valeur ajoutée et de contre-saison, elles peuvent constituer une gêne aux déplacements et devenir suffisamment étendues pour réduire sensiblement l'étendue de terres constituées de sols riches et facilement irrigables.

A la méso échelle, les cartes des figures 46 et 47 permettent de noter les évolutions suivantes :

La brousse tigrée est mieux préservée quand on s'éloigne de Niamey et quand on se déplace vers le sud ; la ville est très consommatrice de bois (voir plus haut) et l'auréole de déboisement atteint de nos jours 70 à 100 km autour de la ville dans toutes les directions. La brousse tigrée a par ailleurs bien plus souffert au nord, où la pluviométrie est plus faible. Elle est donc relativement plus préservée au sud (il n'y a plus que là qu'en subsistent de grandes étendues continues).

CHAPITRE 7 : Vers une extension régionale par télédétection: what about the re-greening ?

Dégradation du milieu ou pas ?

Une question récurrente, et qui est aussi à l'origine d'un grand nombre d'études, et la motivation de plusieurs travaux basés sur la télédétection, c'est de savoir si le milieu (sol-végétation-eau ?) en Afrique de l'Ouest, et en particulier dans la bande soudano-sahélienne, est en voie de dégradation ou pas. On cherche dans ce chapitre à comparer notre cartographie du degré carré aux travaux antérieurs. La revue bibliographique permet de mesurer l'intérêt porté à la question, ainsi que les deux questions majeures à régler : *i-* y-a-t-il dégradation ou progression de la végétation et des milieux en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne ? *ii-* l'évolution des NDVI, RUE, PPN/P est-elle un indicateur pertinent pour répondre à la question n°1 ?

7-1 A l'échelle du Sahel

Parmi les auteurs ayant analysé les relations entre indice de végétation et précipitation, Prince *et al* (1998) explorent les propriétés du rapport PPN/P (Productivité primaire nette/ précipitation) défini comme un indice de l'efficacité de la végétation à tirer parti de la pluie (RUE : Rain Use Efficiency), mesuré à partir des données satellitaires (NDVI) et des données pluviométriques. Une diminution de ce RUE a été définie comme un indicateur de désertification. Les auteurs utilisent des données satellites sur la période 1982-1990, incluant la très forte sécheresse de 1984. Ils montrent que la PPN est très résiliente, ce qui se traduit par de très faibles variations du RUE sur la période. De fait la PPN semble vraiment en phase avec la précipitation dans l'essentiel de la région, montrant une nette remontée après la sécheresse, démentant toute tendance à la désertification telle que mise en exergue par certains milieux. Il y aurait plutôt, pour cette période de 9 ans, une légère mais systématique augmentation du RUE au Sahel, même si certaines zones gardent de très faibles valeurs (Prince *et al.*, 1998). Une analyse détaillée des cartes fournies montre bien que dans l'ensemble du Sahel, on remarque une croissance positive du RUE ; toutefois c'est dans la région qui nous intéresse, en gros l'ouest du Niger et l'est du Burkina Faso, que l'on note une très faible RUE et surtout une tendance à la dégradation (Fig. 60).

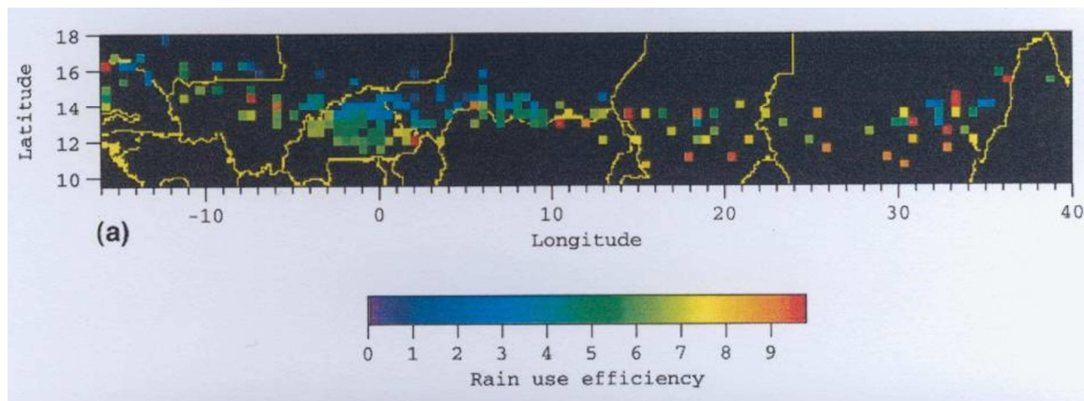


Figure 60. Evolution du rapport PPN/P (RUE) au Sahel de 1961 à 1990 (Prince *et al.*, 1998, figure 9a)

La même année, Nicholson *et al.* (1998) soulignent que « de nombreuses suppositions ont été faites au sujet de la nature et du caractère de la désertification en Afrique de l'Ouest. Nous examinons ici l'histoire de cette question, en révisant l'état de l'art des connaissances concernant les aspects météorologiques de la désertification, et en présentant des résultats d'un groupe sélectionné d'analyses liées à cette question. La notion commune de « désertification » est celle d'une avancée du désert, considérée comme irréversible. Ce processus a été bien en relation avec une augmentation de l'albédo des surfaces, de la génération de vents de poussières, et une diminution de la productivité des sols. Cette étude démontre qu'il n'y a pas eu d'évolution de la limite du Sahara ou des couverts végétaux au Sahel sur les 16 dernières années (1980-1995), ni de réduction systématique de la « productivité » telle que déterminée par le rapport PPN/P de la végétation. Par ailleurs, l'albédo n'a pas été modifié significativement durant cette période ».

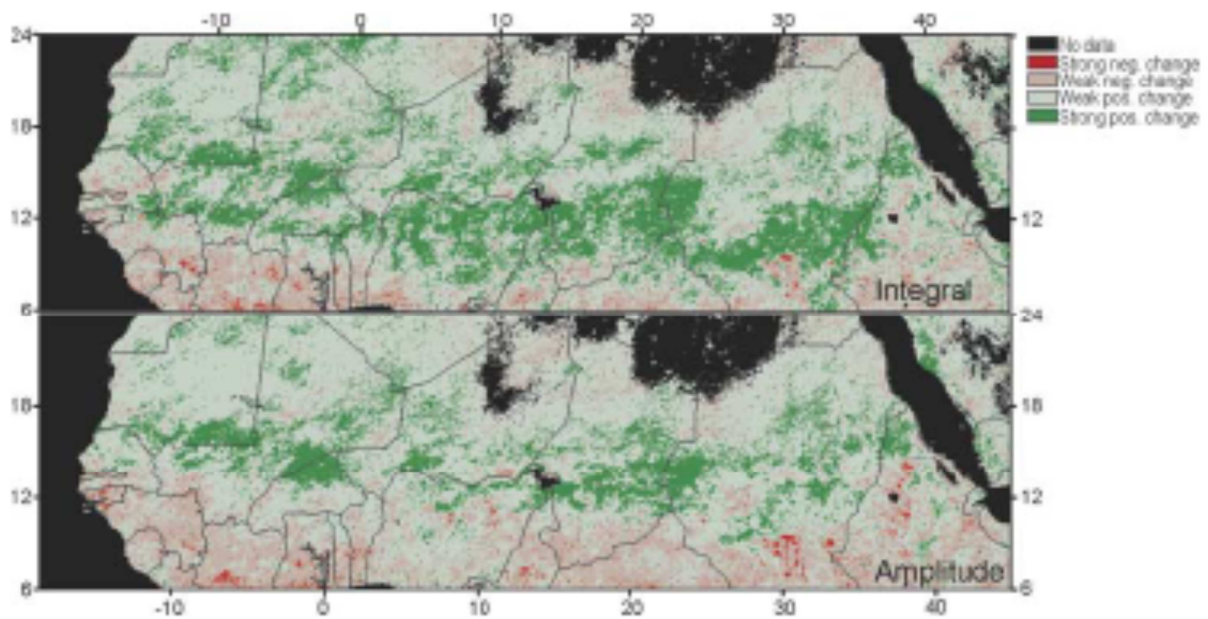


Figure 61. Tendence de l'évolution du NDVI en Afrique de l'ouest (Eklund and Olsson 2003) (en haut) ; amplitude en bas.

En analysant l'évolution du NDVI (AVHRR), Eklund et Olsonn (2003) ont tenté d'y voir clairement dans la tendance au reverdissement. Ils ont noté un fort accroissement saisonnier du NDVI dans une grande partie du Sahel pour la période 1982-1999, ce qu'ils interprètent comme une reconquête de la végétation suite à la forte sécheresse des années 1980. Ils ont aussi observé l'augmentation de la pluie durant cette période, et émettent l'hypothèse que le reverdissement a pu être accéléré par une amélioration de l'utilisation des sols et des méthodes de culture. La figure 61 issue de leur article montre une forte croissance des indices de végétation sur les bassins des affluents de rive droite du Niger (surtout côté burkinabé), contrairement à l'Ouest du Niger en général et au degré carré de Niamey en particulier où la tendance est plutôt à une lente dégradation.

En utilisant les mêmes données satellitales (NOAA AVHRR), les mêmes auteurs (Olsonn *et al.* 2005) observent une croissance significative de la végétation active dans une grande partie de la région entre 1982 et 1999 ; ils montrent que l'augmentation de la précipitation ne suffit pas à expliquer seule ce changement, et suggèrent une contribution d'autres facteurs tels que les changements d'usage des sols et les migrations. Comme dans l'étude précédente, leur cartographie semble confirmer un reverdissement des bassins de rive droite affluents du Niger Moyen, en territoire burkinabé, mais par contre ils montrent ici une situation inchangée dans l'Ouest du Niger (Figure 62).

Les mêmes données de NDVI des satellites NOAA-AVHRR ont été mises à profit par Anyamba et Tucker (2005) sur une période un peu plus longue (1981-2003) ; eux considèrent que le NDVI est suffisamment couplé à la pluie pour pouvoir être utilisé comme un proxy de la réponse de la surface continentale à la variabilité aux précipitations. Ils distinguent deux périodes différentes dans leur chronique : *a-* la période 1982-1993 marquée par des valeurs de NDVI sous la moyenne et la persistance de la sécheresse surtout visible pour la période 1982-1985 ; *b-* la période 1994-2003 caractérisée par une tendance allant vers des conditions plus humides et des valeurs de NDVI au-dessus de la moyenne et des maxima pour 1994 et 1999. Cela correspond aux tendances connues de la pluie dans la région. Mais si l'on considère une plus longue période de l'histoire climatique du Sahel, ces conditions sont encore loin des conditions humides qui prévalaient entre 1930 et 1965 ; il faut donc seulement considérer la tendance principale observée comme une récupération graduelle suite à la sécheresse extrême de la période 1983-1985.

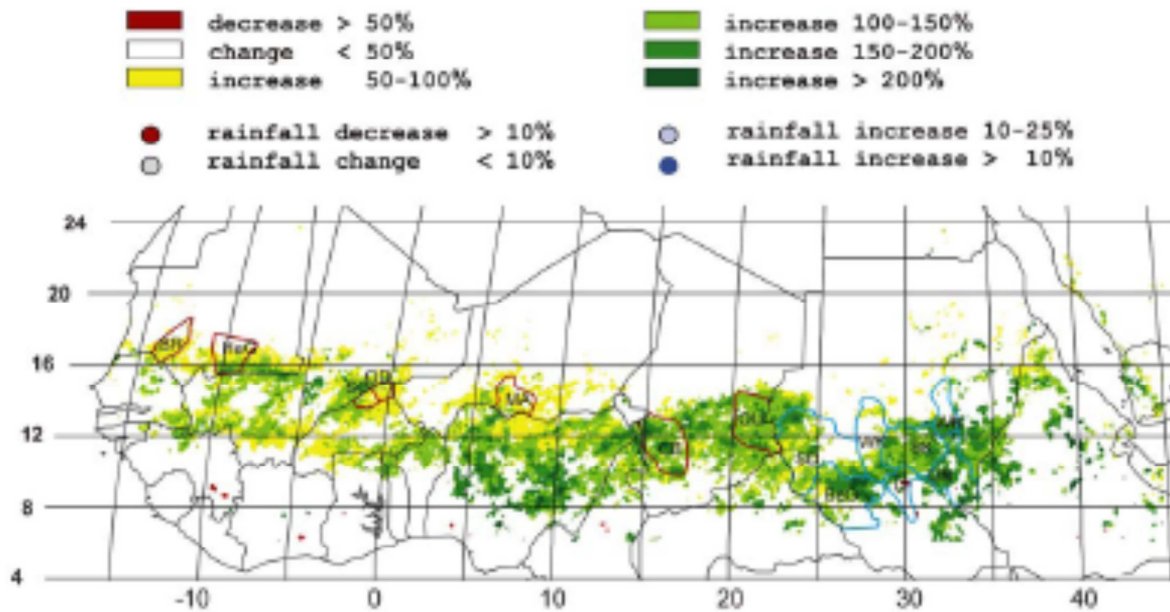


Figure 62. Tendence de l'évolution du NDVI entre 1982 et 1999 d'après Olsson *et al.*, 2005 (fig 1b)

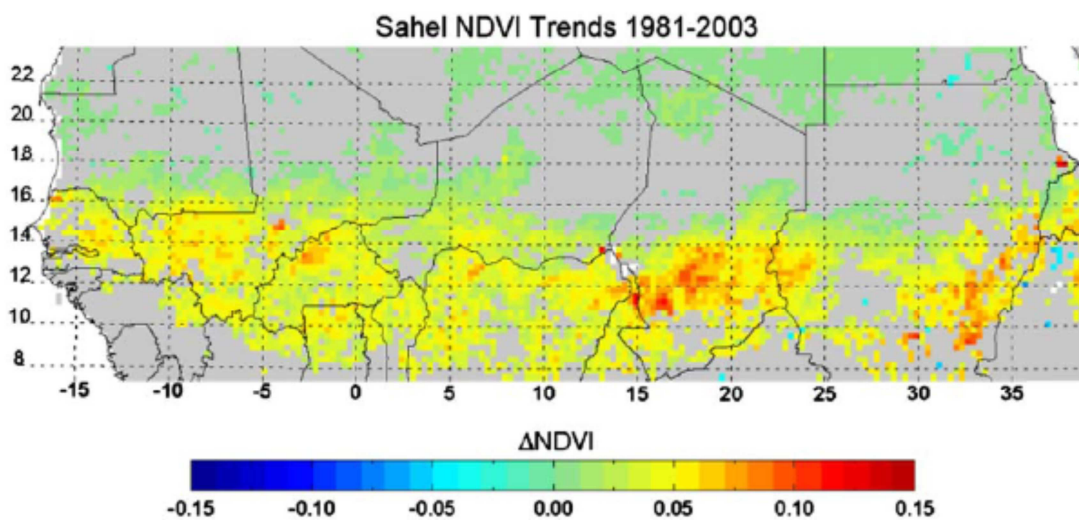


Fig. 6. Summary trend map of changes in Sahel NDVI from 1981–2003. Yellow to red colors indicate areas of significant change at 90% confidence, and gray areas show no significant trend.

Figure 63. Evolution de l'indice NDVI de 1981 à 2003 au Sahel d'après Anyamba et Tucker 2005 (fig 6)

La figure 63 tirée de Anyamba et Tucker (2005) montre une évolution également plus franche côté burkinabé que nigérien des bassins affluents de rive droite du Niger Moyen. Avec la même série d'images, Herrmann *et al.* (2005) mettent en évidence le même « re-greening » général de l'Afrique de l'Ouest. Le reverdissement observé montre un net accroissement de la biomasse sur la période 1982–2003, qui rendrait caduque l'idée de désertification irréversible souvent évoquée au sujet du Sahel. A l'échelle de ces scènes satellites, il est impossible d'après Herrmann *et al.* (2005) de savoir si le reverdissement est juste un retour à la situation pré-sécheresse ou une transition vers un nouvel état

d'équilibre avec une composition floristique différente. La pluie se détache clairement comme la cause principale de ce reverdissement du Sahel à l'échelle de pixels de 8 km. Cependant la présence d'une tendance à long terme spatialement cohérente et significative sur les résidus suggère qu'il pourrait y avoir d'autres facteurs explicatifs, moins importants cependant. Etant donné que le Sahel est un paysage construit (un « paysage culturel », d'après Rasmussen *et al.*, 2001), il est concevable que la tendance observée dans les résidus pourrait être attribuée au signal humain. Des tendances à long terme sont tout à fait compatibles avec des éléments induits par les activités humaines telles que l'évolution de l'occupation des sols, l'exploitation des ressources naturelles, les stratégies de conservation des sols et des végétaux. Cependant le fait que sur l'ensemble du Sahel, on n'observe pas de dégradation à long terme liée à l'action humaine n'empêche pas qu'on remarque quelques poches de dégradation, où l'action humaine empêche le reverdissement, comme par exemple au nord du Nigeria ou au centre du Soudan (figure 64. Herrmann *et al.* 2005).

Seaquist *et al.* (2006) ont appliqué un modèle « light use efficiency » pour estimer la PPN (productivité primaire nette) ; au vu de la carte, ils trouvent en général au Sahel, entre 1982 et 1999, une augmentation de la PPN (figure 65).

On remarque que plusieurs études citées utilisent les mêmes scènes et pour à peu près la même période ; dans une synthèse à venir, il faudra tenir compte de cela. Comme Hountondji *et al.* (2004) l'avaient montré auparavant pour le Niger (voir plus bas), le rapport PPN/P (ou RUE) est plus indiqué comme indicateur de désertification que le seul NDVI. Le problème demeure car l'interprétation qui en est faite peut être différente. Hountondji *et al.* pour le Niger sont rejoints par Hein et De Ridder (2006) pour l'ensemble du Sahel pour estimer que l'évolution du RUE montre que la zone est en cours de désertification, alors que nous le verrons d'autres auteurs en retirent un regain de l'efficacité de la végétation.

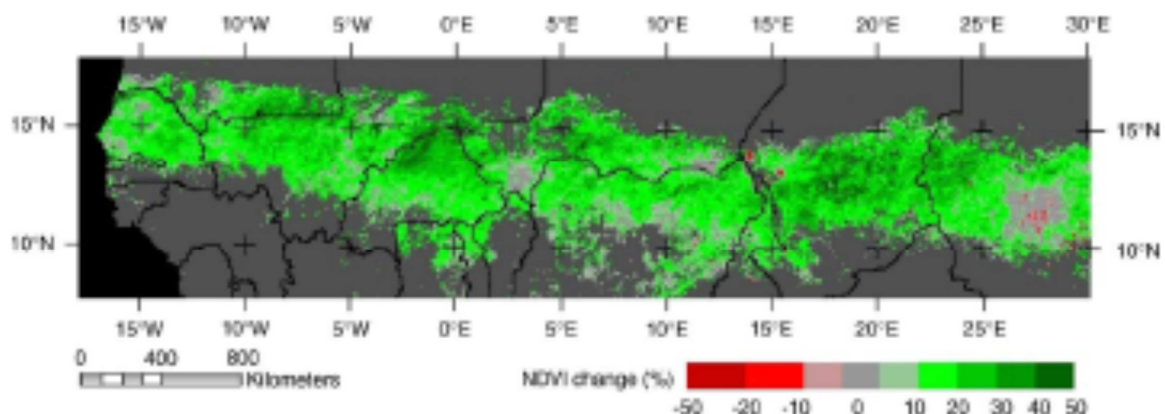


Figure 64. Evolution de la végétation verte vue par le NDVI (NOAA AVHRR) Herrmann *et al.*, 2005 (fig. 1)

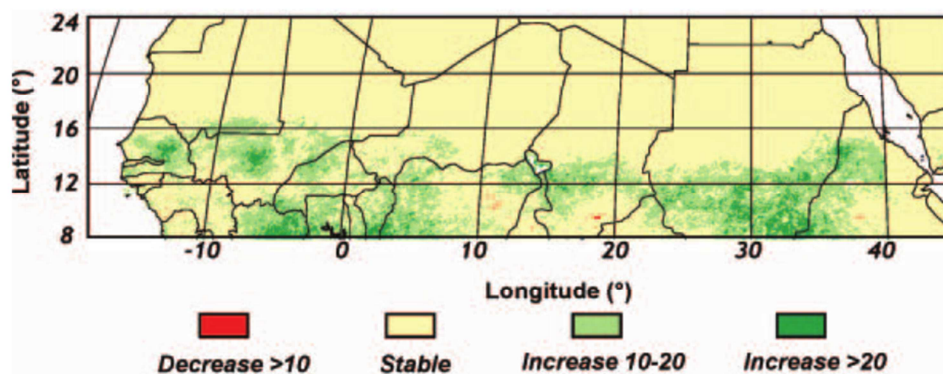


Figure 65. Carte de l'évolution de la PPN au Sahel entre 1982 et 1999 d'après Seaquist *et al.* (2006)

En effet, pour Hein et De Ridder (2006) « *L'impact des activités humaines, en particulier l'élevage, sur le couvert végétal du Sahel est toujours en débat. Dans certaines études, les scènes satellites ont été utilisées pour analyser le développement du couvert végétal dans le temps. Ces études n'ont pas mis en évidence une dégradation significative du Sahel dans les deux dernières décades. Dans ce papier, nous examinons les hypothèses écologiques sous-tendant l'utilisation des images satellitaires pour analyser la dégradation du Sahel. Plus particulièrement, nous analysons la variabilité du RUE, qui est souvent utilisé comme indicateur de l'état de la végétation. Nous détectons une faille fondamentale dans la manière dont le RUE a été utilisé dans plusieurs études en télédétection ; ces études ont ignoré la relation entre la variation de la pluie annuelle et le RUE. Du fait de la tendance croissante du RUE durant les années 1980 et 1990, cela conduit à un biais dans l'interprétation des images satellitaires. Nous montrons l'importance de cette variabilité sur le RUE pour l'analyse des images satellites sur des zones semi-arides de pâturages. Notre analyse montre aussi qu'il est probable que des dégradations d'origine humaine aient impacté la végétation sahélienne durant les deux dernières décades. Cela a d'importantes conséquences dans le débat sur les impacts du pâturage en zone semi-arides. Plus encore, l'occurrence d'une dégradation anthropique est intéressante pour expliquer l'amplitude des sécheresses du 20^{ème} siècle au Sahel. Notre analyse indique aussi que les populations sahéliennes sont plus vulnérables aux sécheresses que ce qui est généralement admis* » (Hein et De Ridder, 2006).

Cet article a donné lieu à une réplique scientifique de Prince *et al.* (2007) équipe qui fait partie des précédentes citées ci-dessus, et qui ont toutes conclu que la désertification était en recul (Figure 66). Pour Prince et ses co-auteurs, « *dans les zones semi-arides, le ratio de la Productivité Primaire Nette annuelle sur la pluie (PPN/P ou RUE) a été utilisé comme un indice de désertification. Dans des publications récentes (Hein et De Ridder, 2006) il est proposé qu'une compréhension incorrecte de la relation entre RUE et Pluie a mené à une mauvaise interprétation du suivi de la désertification au Sahel. Nous montrons que, contrairement aux énoncés de Hein et de Ridder, les études par satellites de la RUE sahélienne ont reporté des augmentations, des diminutions et des valeurs constantes depuis*

1981. Plus encore, nous trouvons que les données n'appuient pas leur proposition selon laquelle le RUE augmente avec la pluie, même dans les secteurs non dégradés. Donc nous rejetons leur corollaire, qui veut qu'un RUE constant soit une preuve de désertification. La difficulté fondamentale de l'utilisation du RUE pour la détection de la désertification demeure, c'est la difficulté d'estimer des RUE pour des zones non-dégradées à l'échelle régionale ». (Prince *et al.* 2007).

D'autres auteurs ont utilisé la variation de l'albédo de la surface continentale pour estimer la désertification ; ainsi Govaerts et Lattanzio (2008) montrent que suite à la remontée des précipitations après les années 1980 les plus sèches, on observe une diminution de l'albédo dans les régions sahéliennes (figure 67). C'est nettement dans la bande sahélienne que la diminution de l'albédo est la plus forte (figure 67), puisqu'il passe de 0,34 en 1984 (une des années les plus sèches) à 0,26 en 2003 (quelques années après la fin de la remontée partielle des précipitations) en moyenne à la latitude de 16°N. La moyenne de la diminution pour le Sahel est de 0,06 ; cela peut apporter de bonnes informations pour la validation des modèles couplés surface atmosphère qui permettent d'étudier l'éventuelle rétro-action surface/atmosphère (Zeng *et al.*, 1999). Pour Prince *et al.*, (2007), « ces résultats sont en concordance avec les études précédentes qui montrent un reverdissement du Sahel (Olson *et al.*, 2005 ; Hermann *et al.*, 2005) ; à partir de données NDVI utilisées comme proxy pour la verdeur de la végétation, ces derniers ont montré une récupération persistante de la végétation depuis les années 1980 ».

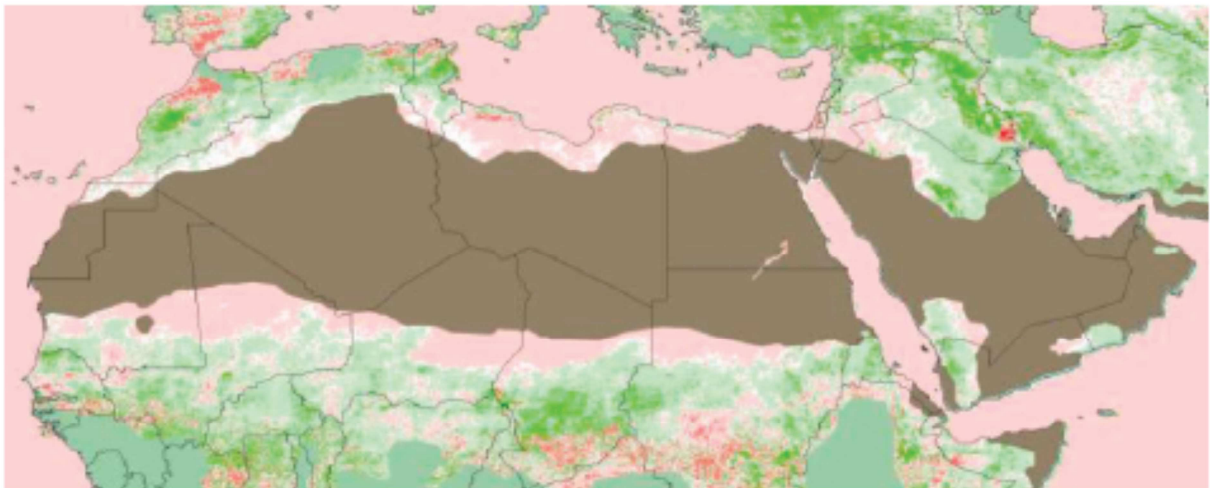


Figure 66. Evolution interannuelle des tendances des résidus des écarts de NDVI par rapport aux valeurs attendues. Seuls les pixels rouges et verts sont significatifs (vert clair et brun = masques humides et hyperarides respectivement ; pixels roses, blancs et verts clairs non significatifs (Prince *et al.*, 2007, figure 3)

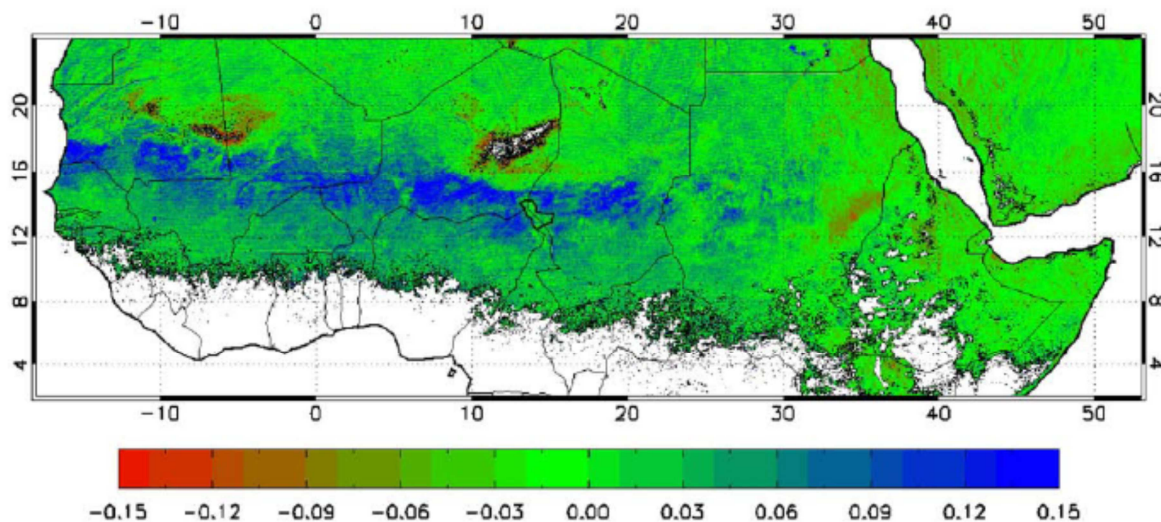


Figure 67. Diminution de l'albédo au Sahel due au reverdissement (Govaerts and Lattanzio, 2008 fig 5)

Les études menées dans le cadre de AMMA ont montré que le degré carré de Niamey n'était pas représentatif de l'ensemble du Sahel ni de la bande située à la même latitude (voir figure 16 plus haut, Mougin *et al.*, 2009).

Kaptue *et al.* (2010) ont réalisé une carte d'eco-climat selon une classification « ECOCLIMAPII » couvrant l'Afrique de l'Ouest basée sur les données MODIS (figure 68).

A notre sens, la plus achevée des études par télédétection de l'évolution des usages des sols est celle des géographes danois ; Fensholt et Rasmussen ont déjà produit dans le passé de telles études, soit régionales (Rasmussen *et al.*, 2001 au nord du Burkina Faso –voir plus loin) soit plus méthodologiques de comparaison de produits et de méthodes de classification de la végétation (Fensholt *et al.* 2009). Dans leur étude récente (Fensholt et Rasmussen, 2011), ils notent un accroissement substantiel de la verdure du Sahel (par NDVI) entre 1982 et 2007.

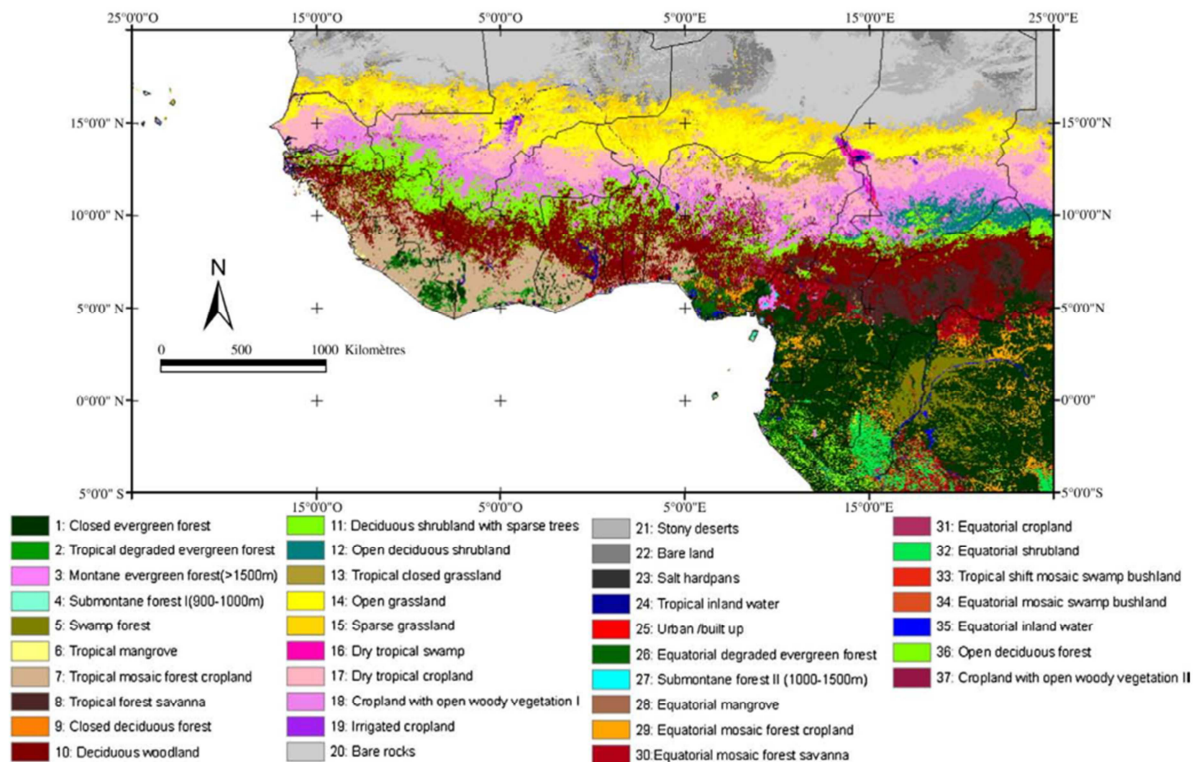


Figure 68. La carte ECOCLIMAP II d'occupation des sols en Afrique de l'ouest à travers 37 écosystèmes (Kaptue *et al.* 2010)

Par contre, ils notent bien que pour la période plus récente 1996-2007, l'allure de la tendance des différences de NDVI est plus complexe, avec des régions mélangeant des tendances positives et d'autres plus mitigées ; la tendance générale temporelle définie comme une pente de régression est bien plus faible que pour la période 1982-2007 mais reste positive sur l'ensemble du Sahel. Concernant plus spécifiquement les bassins des affluents de rive droite du Niger Moyen (au Burkina et Niger) pour lesquels on dispose de données hydrométriques de l'ABN, on voit nettement, pour la période 1982-2007 (figure 69), une croissance du NDVI sur la partie burkinabé (mais non côté nigérien), alors que pour la période 1996-2007 (figures 70), la tendance est nettement négative partout, même si peu de pixels sont représentatifs. « Une compensation des sommes de NDVI liée à l'influence de la mémoire du sol rend le RUE simple inadapté pour une normalisation en fonction des variations pluviométriques ; en conséquence, une analyse de RUE fondée sur une approche incluant les résidus de régression a été réalisée. Ceci n'est valide que pour les zones caractérisées par de fortes corrélations temporelles par pixels entre pluie et NDVI. Il résulte de cette étude qu'il reste peu d'éléments pour étayer une quelconque dégradation – non liée aux précipitations- des milieux aux échelles régionales à continentales pour la période 1982-2007 » (Fensholt et Rasmussen, 2011).

Ceci dit, pour nous, l'inversion de tendance entre la période 1982-2007 et la période 1996-2007 montre que si la végétation a cru de 1982 à 1996, cela pourrait être dû pour l'essentiel à un rattrapage

post-sécheresse. C'est notre opinion, du moins pour la zone des affluents de rive droite. En effet, cette très bonne synthèse récente de Fensholt et Rasmussen (2011) doit permettre d'y voir plus clair, même si ses résultats énoncés ne sont pas forcément toujours en adéquation avec ce que montrent ses figures. En effet si la figure 69 montre une progression générale du NDVI sur la région (moins franche d'ailleurs sur la partie ouest du Niger) entre 1982 et 2007, ce n'est pas le cas si on compare 1996 à 2007 (figure 70) où la bande soudano-sahélienne est bien plus contrastée et où clairement, l'ouest et le centre du Niger, c'est à dire les deux régions les plus peuplées du pays, semblent voir régresser leurs valeurs de NDVI. Par ailleurs, sans rien enlever du très grand intérêt de ce travail de synthèse, est-ce que la comparaison 1982-2007 ne souffre pas, comme dans un précédent travail du même auteur sur les environs de la mare d'Oursi (Rasmussen *et al.*, 2001), d'un point de départ au creux de la sécheresse, et donc forcément point bas des NDVI, après lequel la tendance ne pourrait qu'être positive ?

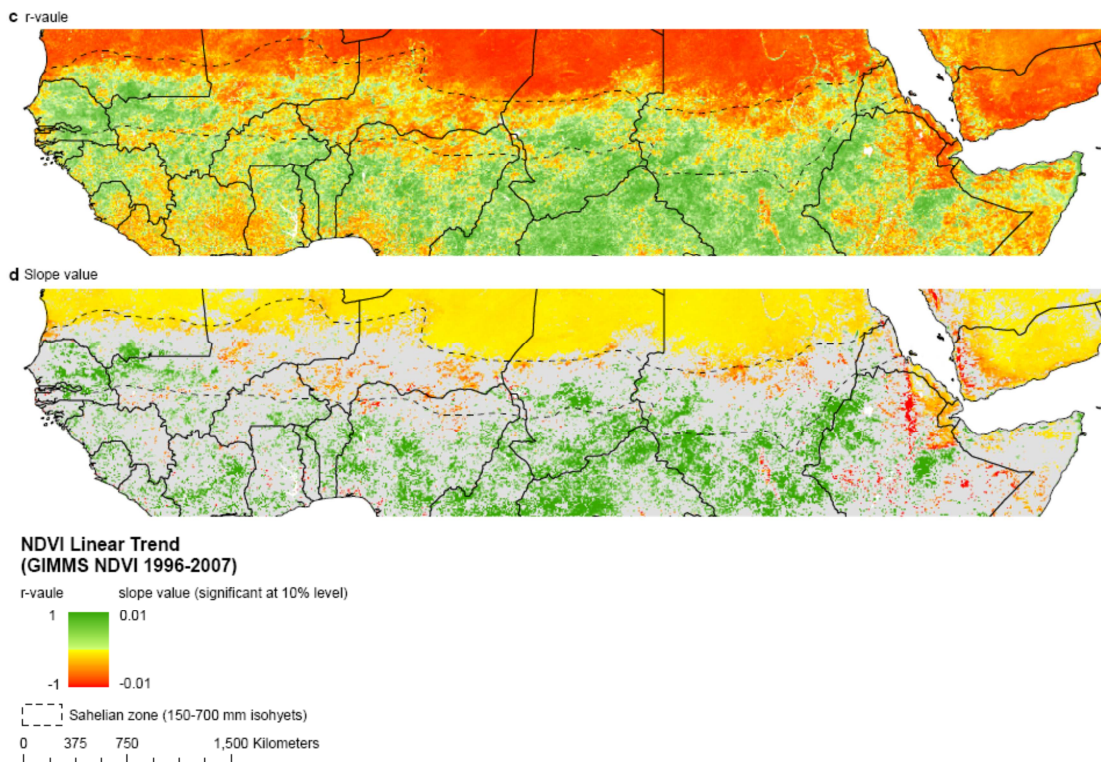


Figure 69. Cartes de tendance de régression linéaire de NDVI GIMMS : valeur r (a) et valeur de pente (b) 1982-2007; seules les pentes basées sur des tendances significatives à un seuil de confiance de 10% sont prises en compte dans la carte b. Le Sahel est limité par les isohyètes 150 et 700 mm.

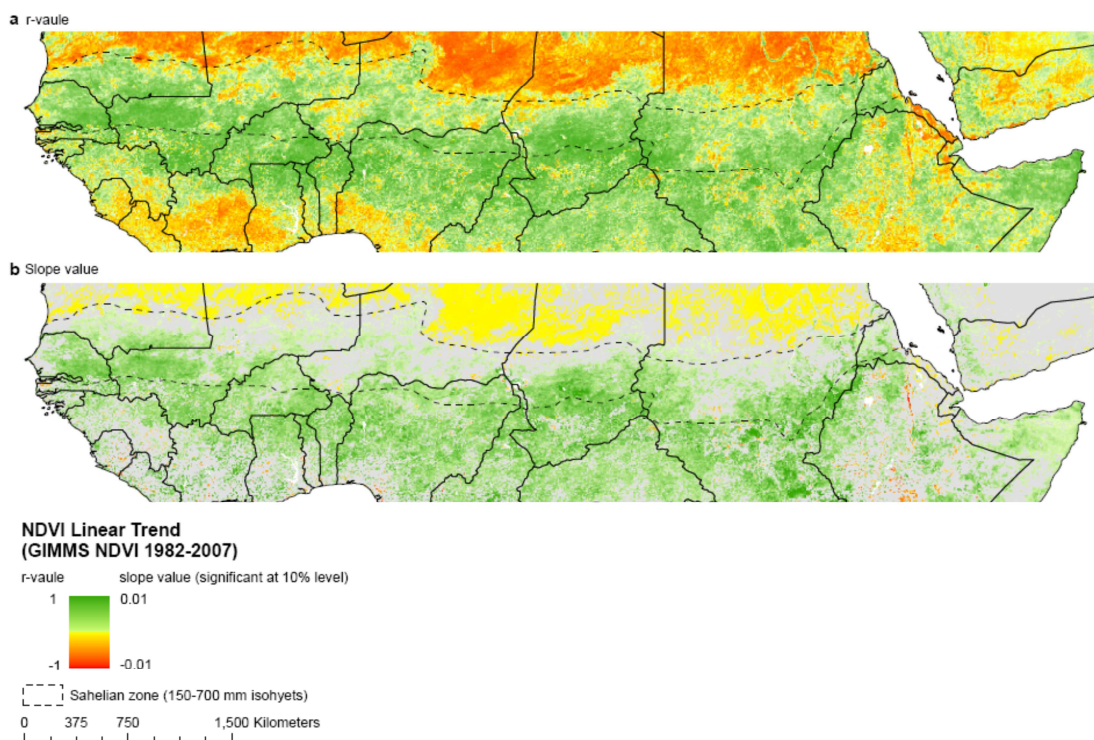


Figure 70. C D: Cartes de tendance de régression linéaire de NDVI GIMMS : valeur r (a) et valeur de pente (b) 1996-2007;

Les cartes 69 B et 70 D montrent quels sont les pixels les plus significativement modifiés durant la période considérée. La carte 70D en particulier semble montrer une évolution négative sur l'ensemble du Niger et une grande partie du Sahel burkinabé.

Enfin, la même équipe montre à nouveau l'évolution de 1982 et 2007 (Huber *et al.*, 2011); de grandes étendues ont connu une verdure croissante sur cette période de 26 ans (1982-2007). Un accroissement plus significatif a été observé au Sénégal alors qu'on note inversement une baisse de l'analyse des résidus sur le Soudan central. Le sud-ouest du Niger est aussi marqué par une tendance négative (Figure 71).

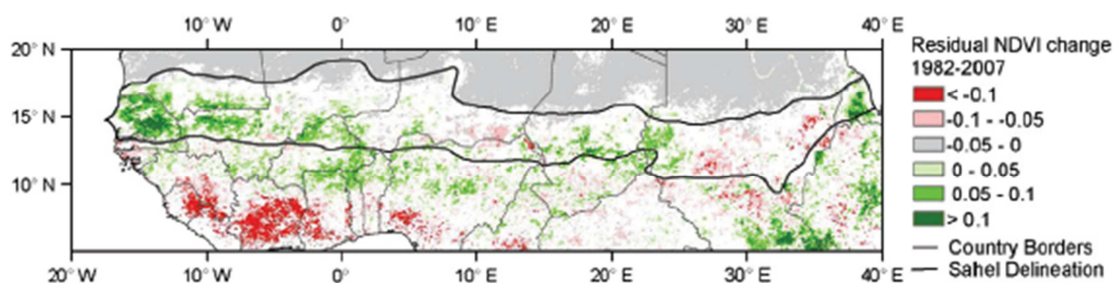


Fig. 8. Median trend (slope) of the residual NDVI for 1982-2007 based on regression analysis of JASO NDVI and 3-monthly rainfall sums.

Figure 71. carte de l'évolution des résidus de l'indice NDVI (Huber et al., 2011 fig 8) un net greening ?

A l'échelle locale des petits bassins versants expérimentaux de Wankama et Tondi Kiboro, on assiste indéniablement à une dégradation des sols et de la végétation (Souley Yéro, 2008) conduisant à une accélération du ruissellement (voir ci-dessous, chapitre 8). Par ailleurs, on note, sur les rares bassins instrumentés d'Afrique de l'Ouest, une augmentation continue des débits sans relation avec une augmentation des pluies. Ce dernier point conduit à penser que l'on assiste bien à une diminution de la capacité des sols et des bassins à conserver l'eau, ce qui est en principe en lien avec une diminution de la végétation et des capacités d'infiltration des sols. Mais le lien entre ces deux échelles de travail, malgré des travaux récents (Amogu, 2009, Descroix *et al.*, 2009, Amogu *et al.*, 2010) n'est pas encore suffisamment établi, et on manque toujours, du reste, de matériau permettant de régionaliser et spatialiser l'information obtenue expérimentalement à l'échelle ponctuelle ou locale.

Toujours est-il que, sur les sites expérimentaux du degré carré de Niamey, on constate aussi bien à court terme (d'une année sur l'autre) qu'à long terme (sur les 15-20 dernières années, a fortiori des périodes plus longues), une évolution très nette des terroirs, caractérisée par :

- une très forte diminution de la végétation naturelle, remplacée par cultures et jachères
- une très forte dégradation des sols, qui se traduit par une très forte érosion (par ravine et par dépressions hydro éoliennes) et de très importants dépôts sableux en bas de versants ;
- une dégradation des propriétés physiques des sols, due à un fort encroûtement (croûte de type ERO suivant classification de Cazenave et Valentin, 1989).

7-2. Retour sur les échelles locales et méso, par télédétection

Nous nous proposons à présent de revenir vers notre échelle de travail, méso à locale, en analysant l'apport d'un certain nombre de travaux menés au Sahel, alliant photo-interprétation et télédétection.

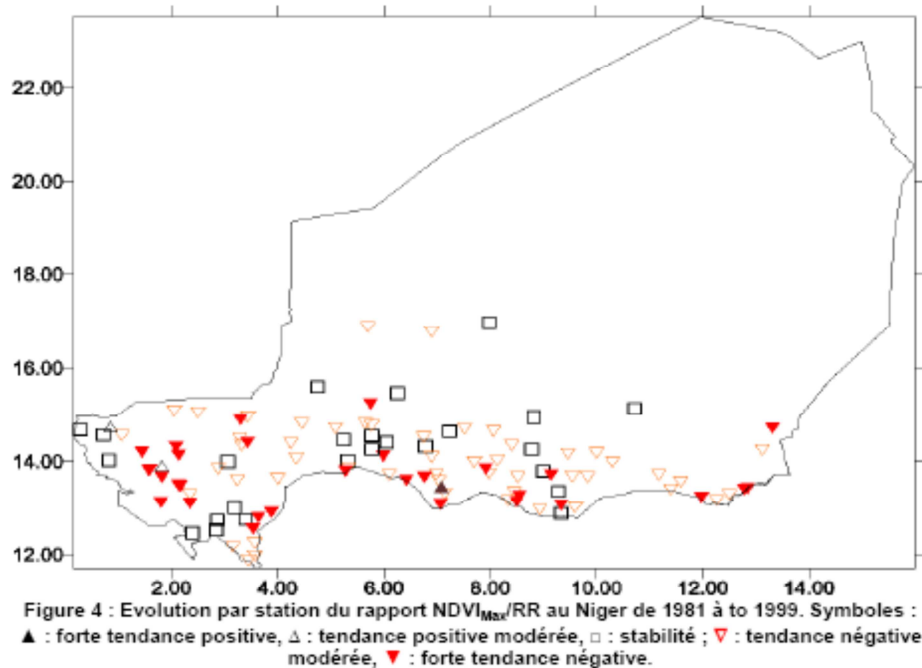


Figure 72. Tendance à l'évolution du rapport NDVI/RR sur le territoire nigérien entre 1981 et 1999 d'après Hountondji *et al.* (2004)

Hountondji *et al.* (2004), ont réalisé l'analyse suivante sur le Niger (figure 72) : « L'évaluation qualitative de la dynamique à long terme du couvert végétal a été réalisée grâce à l'analyse de tendance des valeurs maximales annuelles du NDVI par rapport aux précipitations pendant la période de végétation pour chacun des points étudiés. Sur la période analysée, il ressort que 98% des résultats obtenus pour les précipitations contre 76% des valeurs du $NDVI_{Max}/RR$ [RR = pluviométrie totale de juin à août] montrent une tendance positive allant de modérée à très forte pour l'ensemble des pixels. Par contre, la combinaison des deux variables à travers le rapport $NDVI_{Max}/RR$ montrent un déclin généralisé de l'efficacité de l'utilisation de l'eau par la végétation avec une tendance non significative pour les stations situées dans le Sahel pastoral ($p=0,52$), hautement significative pour celles localisées dans la zone sahélienne à culture sous pluie ($p=0,00009$) et significative dans le Sahel méridional ($p=0,041$). Au total, sur les 109 stations étudiées, 75,3% d'entre elles accusent une baisse du ratio $NDVI_{Max}/RR$. Seule une station sur quatre (24,7%) révèle une certaine stabilité de ce rapport. Les tendances négatives traduisent une diminution progressive de la productivité végétale qui se reflète dans la baisse du ratio $NDVI_{Max}/RR$. Cette situation suggère une dégradation environnementale continue et met en lumière que les processus de désertification se sont probablement perpétués au cours des deux dernières décennies sur plus de la moitié de la frange sahélienne du territoire nigérien. » (Hountondji *et al.*, 2004)

A une échelle plus méso voire locale, de nombreuses études ont utilisé la télédétection pour caractériser l'évolution de l'occupation des sols. Certaines études ont utilisé les photos aériennes pour les périodes les plus anciennes, puis des scènes satellites pour des périodes plus récentes. Ainsi Rasmussen *et al.* (2001) utilisent-ils ces documents et un titre volontairement accrocheur pour montrer que la désertification serait plutôt en retrait tout à la fin du dernier millénaire, au nord du Burkina. Ils y observent une dégradation du couvert végétal jusqu'au milieu des années 1980, puis un regain de la végétation suite aux derniers épisodes très secs, bien remarqué sur les scènes satellites de 1995 (figure 73). Ils montrent bien qu'on ne peut plus parler de désertification pour les dunes de l'Oudalan au nord du Burkina, et remettent donc en cause la notion d'irréversibilité qui est attachée au concept de désertification.

Dans la zone guinéenne du haut bassin du fleuve Niger à Koulikoro, située essentiellement en Guinée et pour une petite partie au sud du Mali, Ruelland *et al.* (2008) ont pu déterminer, à des fins de modélisations hydrologiques, l'évolution du couvert végétal à partir d'images Landsat depuis 1975 jusqu'en 2000 (Fig. 74).

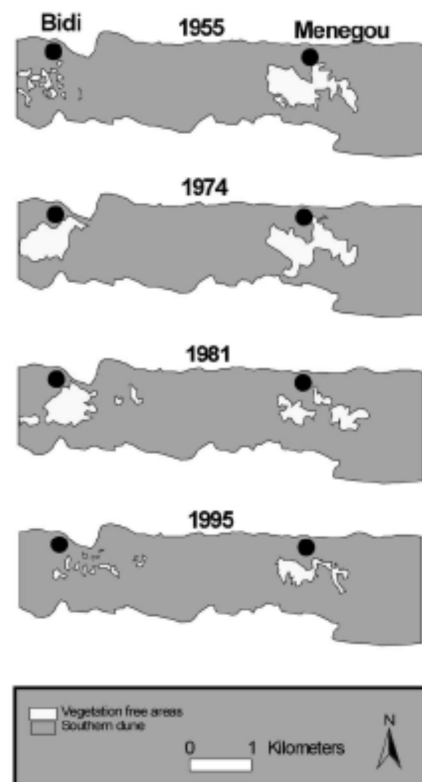


Fig. 4. Changes in size and location of vegetation free areas on a section of the southern dune between 1955 and 1995, as detected by use of aerial photos. A clear decrease may be observed in the 1981-1995 period.

Figure 73- Désertification en progrès (1955- 1974) puis en retrait ensuite (Rasmussen *et al.* 2001, figure 4)

Leur analyse montre des changements de couverture végétale très modérés, bien inférieurs à ceux observés au Sahel (Fig. 74). Pour l'ensemble de ce haut bassin, les sols nus ne progressent que de 8,5 à

10% depuis 1985, la forêt passant de 48,5 à 44% de la surface totale. Les brousses semblent progresser (de 19 à 21%), probablement en interstice des forêts là où celles-ci ont été éclaircies ; les auteurs ne perçoivent pas d'évolution des savanes boisées.

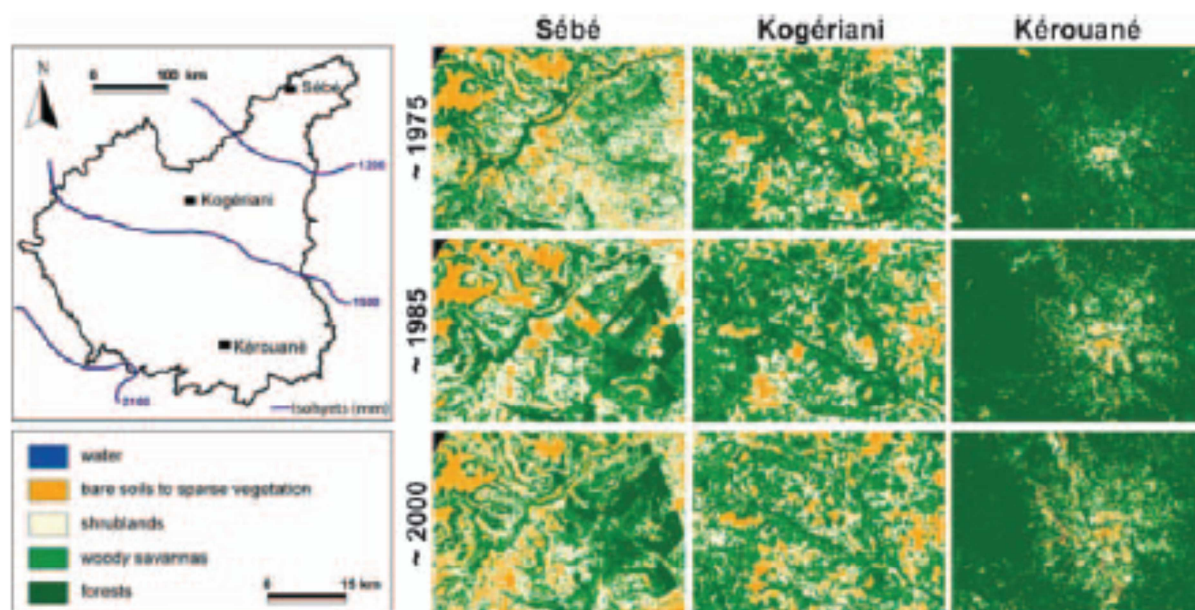
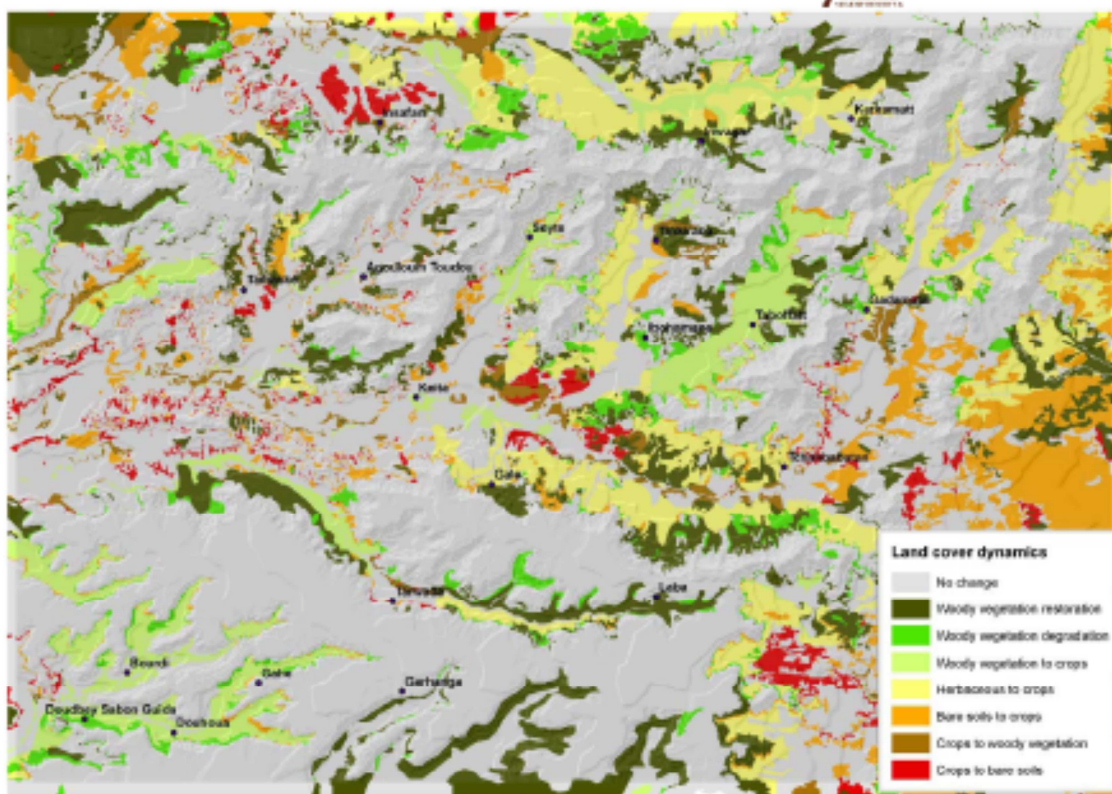


Figure 9. Local changes for three typical zones along the bioclimatic gradient.

Figure 74- Exemples de modifications du couvert végétal sur trois sites du gradient bio-climatique (Ruelland *et al*, 2008, figure 9)

On note une évolution également bien plus mitigée dans certains secteurs qui ont été l'objet de traitements intenses de restauration comme le secteur de Keita (Niger central). Pour Tarchiani et Di Vecchia (2006), « *les changements dans l'utilisation des sols sont le résultat de synergies entre plusieurs facteurs (changement climatique, interventions du programme italien PDR-ADM -Projet Développement Rural Ader Douchi Maggia, Keita, Niger-, pression démographique). L'état de l'environnement au début du projet témoignait de l'impact négatif du climat et de la pression anthropique sur les éco-systèmes* ».

En 1962, les pentes des plateaux étaient boisées, mais en 1972, des signes de dégradation ont commencé à être évidents, et ce jusqu'en 1984, où on a pu noter une disparition totale de la forêt claire. Par contre, entre 1984 et 2002 (tableau 15 et figure 75) une récupération progressive de la végétation naturelle est observée. En particulier, la forêt claire a vu sa surface plus que quadrupler en moins de 20 ans.



Picture 2, Land cover dynamics between 1984 and 2002

Figure 75. Evolution du couvert végétal de 1984 à 2002 dans le périmètre de Keita (Tarchiani et Di Vecchia, 2006 fig 2)

Tableau 15. Evolution des différents types de couvert dans le périmètre de Keita (d'après Tarchiani et Di Vecchia, 2006)

Type of land cover (hectares)	2002	1984	Variation
Woodlands	45,542	10,876	319%
Shrub lands	67,422	95,950	-30%
Grasslands	17,417	60,277	-71%
Rainfed croplands	150,730	84,102	79%
Irrigated croplands	1,006	968	4%
Bare	124,196	144,998	-14%
Dunes	21,847	32,441	-33%

Enfin, au nord du Burkina Faso, Diello *et al.* (2006) (équipe de HSM Montpellier/2iE-Ouaga) a proposé, dans un but de modélisation hydrologique également, une cartographie diachronique des couverts végétaux sur le bassin du Nakambé. Leur travail montre clairement une très forte diminution de la végétation (traditionnellement des forêts claires, des savanes arborées, des brousses et des forêts galeries), surtout visible entre 1986 et 2002, c'est-à-dire finalement après la fin de la sécheresse (Fig. 76). Ils observent une forte diminution du couvert végétal au profit des zones cultivées et des sols nus, d'ailleurs appelés « sols dégradés » ; la dégradation est surtout notable dans le nord, c'est-à-dire dans la zone sahélienne du bassin.

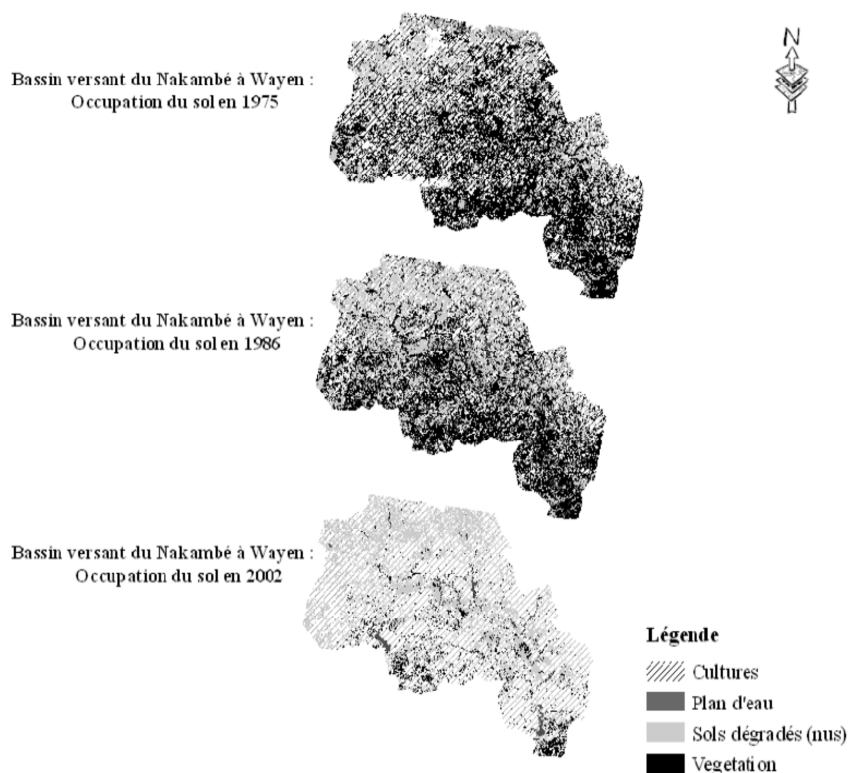


Figure 76. Occupation du sol sur le bassin versant du Nakambé à Wayen en 1975, 1986 et 2002. On observe une forte diminution du couvert végétal au profit des surfaces cultivées et des sols nus entre 1975 et 2002 (Diello *et al.*, 2006)

Conclusion

De nombreuses études ont été menées au Sahel depuis le début de la sécheresse, visant le plus souvent à suivre l'évolution de la désertification. La plupart de ces études, fondées sur l'utilisation de l'indice de végétation NDVI, montrent qu'après une dégradation des couverts végétaux entre 1968 et la fin des années 1980, on observe une augmentation des indices depuis le début des années 1990.

Cependant, des scientifiques d'origines diverses mettent en doute ce recrû de la végétation, et préconisent plutôt l'emploi du rapport PPN/P (productivité primaire nette/ précipitation) qui indique la manière dont la végétation profite ou pas de la pluviométrie. D'après eux, cet indice serait un meilleur indicateur de la résilience de la végétation et des milieux que le seul NDVI ; celui-ci serait trop soumis à l'influence des plantes annuelles et de la strate herbacée, et ne constituerait donc pas, du point de vue de ces scientifiques, un bon indicateur de la désertification et/ou a contrario, de la résilience des milieux.

Or nous verrons au dernier chapitre que le ruissellement semble s'accroître fortement ces dernières années, voire ces dernières décennies, en zone sahélienne, ce qui pourrait être le reflet d'une diminution de la couverture végétale, au moins de celle des ligneux, plus à même de permettre au sol et au milieu de garder ou d'améliorer leur capacité à retenir l'eau pour en faire profiter la végétation, qu'elle soit naturelle ou qu'il s'agisse de cultures.

Le Sahel reverdit –il donc ?

La réponse à cette question est rien moins que facile à donner, tant elle est rendue complexe par :

- le fait que la pluviométrie ré-augmente, dans une partie du Sahel, depuis le milieu des années 1990 ; il est donc logique que le manteau végétal en profite ; mais en tire-t-il pleinement profit ? la résilience de la végétation n'est-elle pas telle que la récupération végétale serait plus rapide que celle que laisserait attendre la seule remontée du montant annuel des pluies ?
- la biomasse d'un champ de mil moyen est supérieure à celle d'un pâturage ou d'une jachère qu'il remplacerait ; l'augmentation de la surface cultivée en mil (essentiellement) ou en sorgho entraîne donc logiquement une augmentation des indices de végétation ;
- l'évolution des couverts végétaux, qu'il s'agisse de végétation « naturelle » ou des cultures, est soumise à une variabilité spatiale et temporelle très forte ; ceci rend l'extension de l'information obtenue directement sur le terrain (observation et mesure de la biomasse et de la densité végétale) ou par photo-interprétation (mesures faibles de la densité végétale ou de la proportion de sol nu) très délicate, et difficile à corrélérer avec les données satellitales ;
- enfin, certaines études ont pu chercher à mettre en valeur une progression de la végétation pour mettre en évidence le rôle positif joué par un programme de développement ou de restauration des sols mené par une ONG ou un organisme nationale ou supra-national ; à l'inverse, certaines études auraient pu être tentées d'exagérer la désertification pour faciliter la collecte de fonds destinés à lutter contre celle-ci.

Nous verrons dans le prochain et dernier chapitre que, quoiqu'il en soit, et quelle que soit l'échelle de travail, on observe une augmentation forte du ruissellement et des écoulements, ainsi donc que du débit des cours d'eau, au Sahel, et, de plus en plus, au nord de la zone soudanienne ; au contraire, plus

au sud, on note une nette baisse des débits des cours d'eau, plus attendue et plus logique, depuis le début de la sécheresse. Partout, toutefois, on observe une augmentation du risque de crue.

CHAPITRE 8 : Quelles en sont les conséquences sur le cycle de l'eau ?

Le Sahel est la région semi-aride emblématique par excellence, la plus médiatisée ces dernières décennies en lien avec les processus de « désertification » et la sévère sécheresse que connaît cette région, comme une grande partie de l'Afrique de l'Ouest, depuis la fin des années 1960. Les deux pics de sécheresse des années 1973-74 et 1984-85 ont été dramatiques pour les sociétés mais également pour le milieu.

Et pourtant, le modelé et la topographie sont entièrement dessinés par le cycle de l'eau et s'il est un élément qui est vraiment typique des paysages, des usages et de la structuration de l'espace au Sahel, ce sont bien les mares ; du fait de la péjoration climatique ayant suivi la phase humide Atlantico-Boréale (Faure, 1986), de nombreuses vallées ont été fermées par des cordons dunaires, ou bien souvent les cours d'eau n'ont plus eu le débit suffisant pour s'extraire des accumulations sableuses ; des vallées se sont fermées et l'endoréisme s'est généralisé dans les secteurs sédimentaires. Les zones de socle comme le Liptako Gourma ont, elles, continué à « produire » suffisamment d'eaux de ruissellement pour assurer une pérennisation des cours d'eau, la plupart étant d'ailleurs intermittents (écoulement saisonnier durant la mousson et les semaines ou les mois suivants, en fonction de la taille du bassin).

On a repris ici les deux cartes de l'introduction du chapitre 6, mais en ne gardant que les surfaces encroûtées, de type ERO (Casenave et Valentin, 1992). Ces deux cartes résument l'élément clé de la problématique hydrologique sahélienne ; malgré un éventuel reverdissement, à confirmer et surtout à caler chronologiquement, on observe une augmentation des surfaces de sols encroûtés ; or celles-ci sont réputées être très ruisselantes (Tableau 16).

La figure 77 montre l'extension des surfaces de sols encroûtés (croûte ERO) des bassins de Tondi Kiboro (deux bassins de 12 hectares environ) entre 1993 et 2007 (Souley Yéro, 2008). Ces dates correspondent à celles pour lesquelles des mesures hydrologiques ont été réalisées dans ces bassins (1991-1994, expérience HAPEX SAHEL, 2004-2011, expérience AMMA). Les surfaces correspondant à la croûte ERO passent de 20% à 40% de la surface totale entre ces deux dates. C'est surtout sous le talus de cuirasse latéritique, dans la partie amont de la jupe sableuse, que cet encroûtement s'est le plus développé, entraînant une forte propension au ruissellement de ce bassin, dès la tête de celui-ci. Cette partie du versant a été mise en culture relativement tôt dans l'historique du terroir de Tondi Kiboro, ce début de versant étant toujours réputé plutôt plus fertile que le reste du glaci.

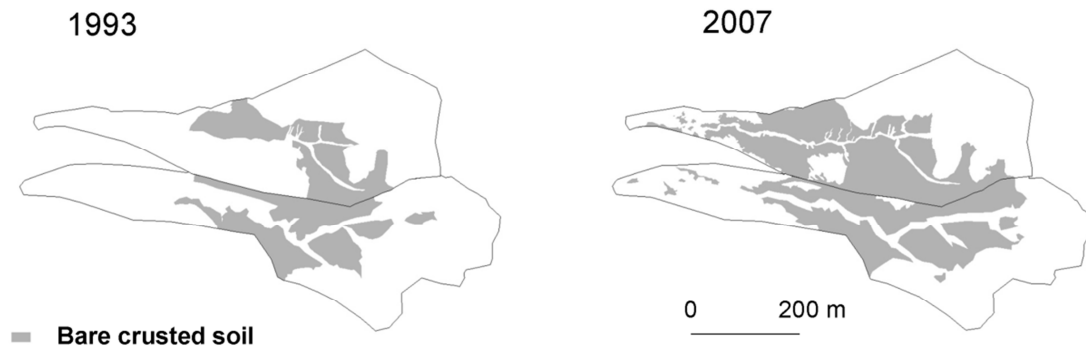


Figure 77. Cartographie diachronique de l'extension des zones de sols encroûtés des bassins de Tondi Kiboro (à partir de Souley Yéro, 2008)

Dans le bassin du kori de Boubon, qui s'étend sur 160 km² (figure 78), la proportion de sols encroûtés reste pour l'heure bien plus faible (5% en 2005) (Souley Yéro, 2007). Mais comme l'a bien montré Mamadou (2012), ce bassin est devenu très actif en termes de ruissellement et d'érosion ces dernières décennies, ayant lui-même connu une rupture d'endoréisme avant 1975. Par ailleurs, les zones encroûtées sont proches du talweg, favorisant l'érosion des bas de versants et une rapide fourniture de ruissellement au kori principal.

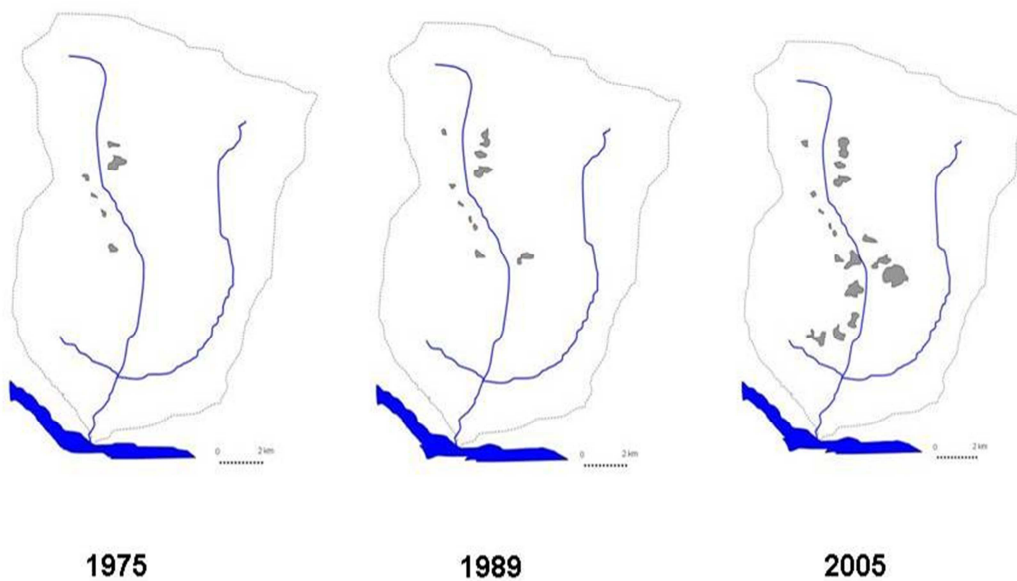


Figure 78. Cartographie diachronique de l'extension des zones de sols encroûtés dans le bassin de Boubon (à partir de Souley Yéro, 2007)

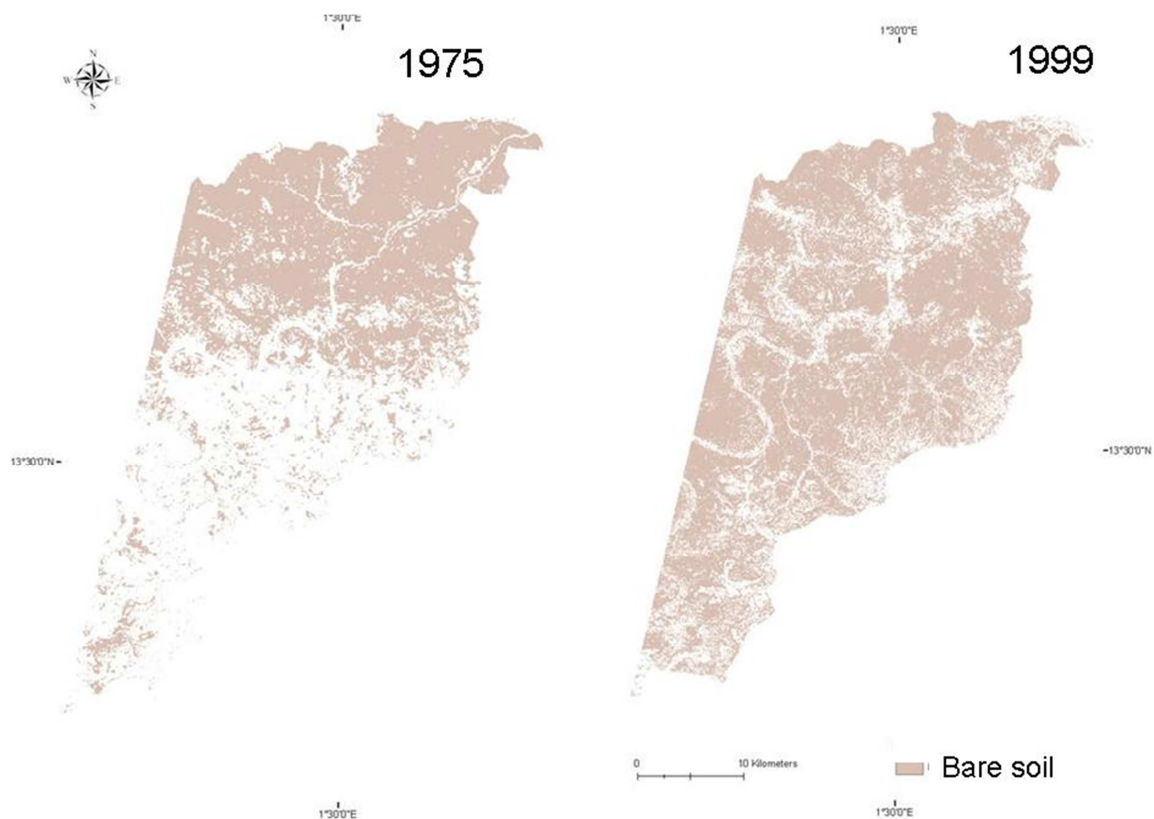


Figure 79. Cartographie diachronique de l'extension des zones de sols nus du bas bassin de la Sirba (Amogu, 2009)

Ces deux travaux précédents ont été réalisés par photo-interprétation, concernant des surfaces peu importantes. Pour ces superficies plus étendues, il est difficile de prétendre faire une carte d'occupation des sols à partir de photos aériennes. C'est donc en télédétection, et à partir d'images LANDSAT TM qu'Amogu (2009) a réalisé les cartes d'occupation des sols de parties étendues (plusieurs milliers de km² à chaque fois) de trois bassins versants affluents de rive droite du fleuve Niger : le Gorouol (sahélien), la Sirba (sud sahélien) et la Mékrou (soudanien). La figure 79 représente la partie aval du bassin de la Sirba, et on n'a retenu ici que l'extension de sols nus, sans qu'il soit possible à ce stade, de distinguer par télédétection les sols nus encroûtés de ceux qui ne le sont pas.

Cette augmentation des surfaces de sol nu semble appartenir à une tendance lourde liée à la mise en culture, qui même sans dégradation des sols, laisse le sol à nu une grande partie de l'année. L'accroissement des surfaces mises en culture a été mis en évidence par Guengant et Banoïn (2003) (figure 80a), ainsi que la tendance longue à la baisse continue des rendements (figure 80b), obligeant pour maintenir une disponibilité alimentaire par habitant constante, à augmenter les surfaces cultivées à un rythme plus rapide que celui de la croissance démographique.

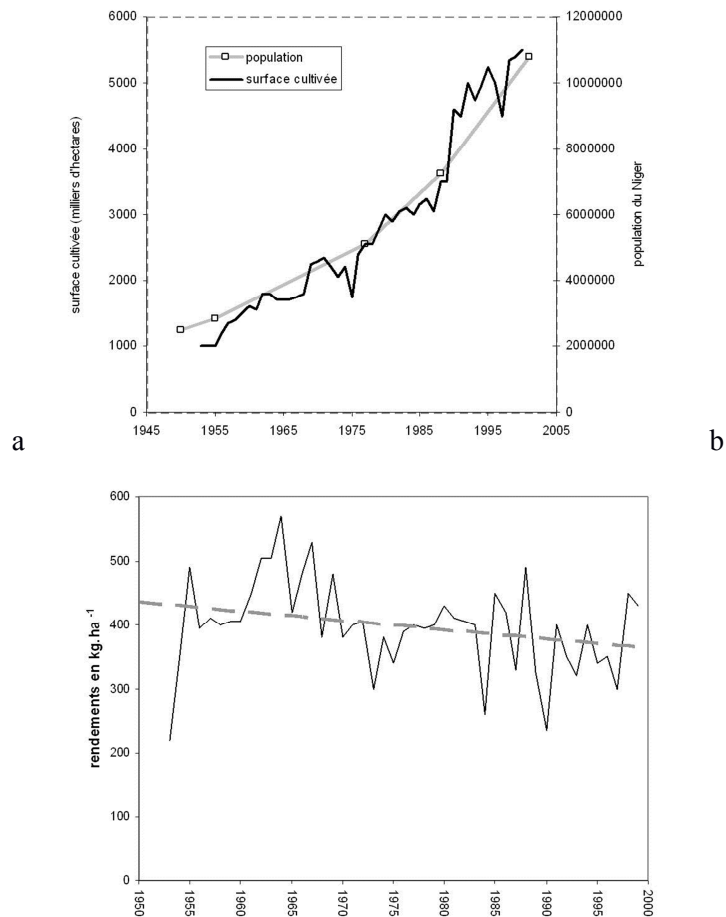


Figure 80. a-Evolution de l'extension des zones cultivées au Niger depuis 1950. b- évolution du rendement céréalier moyen durant la même période (Guengant et Banoin, 2003) en bas.

Par ailleurs, dans le cadre du programme AMMA, de nombreuses mesures ont été effectuées afin de connaître les propriétés hydrodynamiques des sols (Le Breton, 2012 ; Mamadou, 2012, Descroix *et al.*, 2012a) ; on a pu ainsi déterminer avec précision quelles étaient les valeurs de ruissellement et de conductivité hydraulique à attendre des sols et des états de surface et de diverses occupations des sols caractéristiques de la région. Le tableau 16 ci-dessous résume ces données pour les quatre types de couverture les plus fréquents (déterminés ici comme des états de surface).

Tableau 16. Valeurs de coefficient de ruissellement et conductivité hydraulique à saturation sur les principaux états de surface répertoriés dans le degré carré de Niamey (Descroix *et al.*, 2012a)

Etats de surface	coefficient de ruissellement %	Conductivité hydraulique à saturation mm.h ⁻¹
Surface culturale cultivée en mil	4 +/- 1.4	172 +/- 79 (20)*
Sols structurés sous jachère	10 +/- 4	79 +/- 41 (20)
Croûte biologique sur jachère ancienne	25 +/- 7	18 +/- 12 (30)
Croûte d'érosion sous culture et jachère	60 +/- 8	10 +/- 5 (30)

* (nombre de répétitions)

On peut constater que par rapport à un champ cultivé non dégradé, l'encroûtement produit un accroissement très fort du coefficient de ruissellement, ce qui s'explique par la très forte baisse de la conductivité hydraulique à saturation (mesurée ici par infiltromètre à disque et à succion variable).

Ces valeurs de ruissellement et de conductivité sont les moyennes de toutes les mesures réalisées de 2003 à 2012 dans le cadre du programme AMMA par une équipe d'une bonne demi-douzaine de chercheurs et étudiants. Elles sont donc robustes et, ayant été mesurées sur 4 sites différents, relativement représentatives de cette région, malgré des écarts types très forts qui sont comme partout le reflet de l'extrême variabilité spatiale des caractéristiques des sols.

Comme une introduction à ce chapitre sur les conséquences des changements d'usage des sols sur le cycle de l'eau, il semble évident qu'une extension notoire des surfaces sur lesquelles on enregistre par ailleurs, et une faible conductivité hydraulique et en conséquence de forts coefficients de ruissellement, ne peut mener qu'à une augmentation généralisée des écoulements. Celle-ci n'aura pas les mêmes conséquences en zone endoréique (où elle a pu dans la région de Niamey, conduire à une hausse de la nappe phréatique par l'intermédiaire d'une multiplication des mares et de l'augmentation de leur durée en eau, ce qui entraîne la hausse observée du niveau de la nappe du CT3 depuis le début de la sécheresse, processus connu sous le nom de « paradoxe de Niamey » - Leduc *et al.*, 2001) qu'en zone exoréique où elle a pu produire une augmentation du risque de crue.

La synthèse des conséquences hydrologiques des changements environnementaux observés qui vient ci-dessous a été alimentée par les nombreux travaux de terrain menés dans le cadre de AMMA, à savoir les trois thèses de Oke Amogu (2009), Eric Le Breton et Ibrahim Mamadou (2012), ainsi qu'une bonne quinzaine de mémoires de maîtrise, de DEA ou de Master (dont font partie les miens) ou bien de mémoires de fin d'étude d'école d'ingénieur, pour la plupart d'étudiants nigériens, réalisés durant le programme AMMA. Il doit aussi beaucoup au livrable n°1-3b sur l'évolution de l'occupation des sols produit pour le programme ANR ESCAPE par l'équipe LTHE-ESPACE DEV en juin 2010.

8.1. Le rôle des nouvelles formes observées comme indicateurs : les plages de sol nu

On a défini au chapitre 3-1 quelques indicateurs de l'évolution du comportement hydrologique des milieux sahéliens ; on se propose ici de montrer quel peut être leur impact au niveau hydrologique.

- les zones de sols encroûtés : croûtes ERO et croûtes biologiques

Les données présentées dans le tableau 16 suffisent à expliquer le rôle hydrologique primordial que sont appelées à jouer les zones de sols encroûtés. Elles sont en amont des processus, l'explication de l'essentiel des modifications morphologiques observées ces dernières décennies dans la région de Niamey et du Fakara.

Casenave et Valentin (1989), Albergel et Valentin (1988) puis Valentin et Bresson (1992) ont montré comment l'accélération des rotations cultures/jachères dans un système dont la période de repos (jachère) est la seule méthode de fertilisation (ou plutôt de récupération de la fertilité) conduisait à une fatigue des sols ; même les sols très sableux du Sahel (plus de 90% de sables mesurés au granulomètre laser) ont tendance à s'encroûter très facilement dès qu'ils sont mis à nu du fait entre autres de la forte intensité moyenne des précipitations ; Le Breton (2012) a montré que sur les bassins expérimentaux de Wankama, 43% de la précipitation annuelle tombait avec une intensité supérieure à 60 mm/h, 75% tombant avec une intensité supérieure à 30 mm/h. Les sols nus sont donc soumis à un splash intense ; c'est le cas de toutes les zones cultivées en début de saison tant que le sol n'est pas couvert par les cultures sortantes.

Les croûtes se forment en principe en priorité sur des zones peu pentues ; elles apparaissent au départ sous forme de « dépressions hydro-éoliennes » formées en saison sèche par le vent tourbillonnant qui exagère la moindre dépression pré-existante. Ces dépressions ont ensuite tendance à devenir coalescentes, ce qui favorise grandement l'écoulement de l'une à l'autre, les processus hydrologiques prenant dès lors le relais des processus éoliens du début (figures 81 et 82).



Figure 81. Dépression hydro-éolienne (DHE) récente sur le plateau de Komakoukou, (Descroix et Yéro, 2010)



Figure 82. Vue aérienne de la partie aval du bassin de Wankama, où les DHE sont devenues coalescentes, et constituent un secteur en dégradation totale rapide (courtoisie J-L Rajot, IRD)

La figure 81 montre une dépression hydro-éolienne isolée sur un plateau latéritique, celui de Komakoukou, largement recouvert de placages sableux. La figure 82 est une photo prise du drone PIXY de l'IRD Niamey sur la partie aval du bassin de recherche de Wankama. Toutes les tâches claires et rosées sont des zones encroûtées (croûte ERO) ; elles sont en grande partie coalescentes et représentent plus de la moitié de la surface totale de cette zone, reflétant une très forte dégradation du terroir ici tout proche du village de Wankama (500 à droite (Est) de la photo).

Sur la figure 83 on distingue bien une zone sévèrement encroûtée coupée par une ravine franche (récente) et très marquée, les bords escarpés reflétant la résistance du sol encroûté ; la formation de la ravine a été facilitée par le fort ruissellement sur la zone encroûtée, qui a concentré les flux d'écoulement dans le bas-fond. Le décapage par le vent et l'eau du sol en voie d'encroûtement déchausse les racines des arbres et arbustes (Figure 84) ; cela permet de mesurer la vitesse de l'érosion.

Sur les sols structurés caractéristiques des jachères anciennes se forme, au bord de 5-6 ans une croûte biologique (des algues en général ; figure 85). Celle-ci, bien qu'hydrophobe et peu perméable (elle facilite bien le ruissellement), n'est pas du tout un signe de dégradation des sols mais au contraire le témoin du rétablissement d'une certaine fertilité du sol recouvert.



Figure 83. Encroûtement sous un rebord de plateau, entraînant un fort ruissellement ayant causé la formation d'une grosse ravine guidée par la piste de KomaKoukou à Banizoumbou, (Descroix et Yéro, février 2010)



Figure 84. Dégradation rapide d'un glacis sous replat latéritique sur la piste de Banizoumbou à Sabara Bangou, juste avant le gué du kori de Sama Dey vers le nord ; déchaussement des *Gueira senegalensis* (Descroix et Yéro, février 2010)



Figure 85. Même secteur : croûte algale (elle-même plutôt signe de stabilité) sous un gueira, formant corniche, témoignant de la dégradation d'une jachère ancienne (Descroix et Yéro, février 2010)

- zones d'épandage, cônes de déjection

Comme on vient de le voir, les conditions sont réunies pour que le ruissellement et l'érosion s'accroissent dans le haut des versants. La croissance continue des zones de sol nu encroûté se traduit

par une diminution de la capacité de rétention en eau des sols, et par suite, par une augmentation du ruissellement et de l'érosion. Les matériaux arrachés aux versants sont transportés par un flux écoulé en augmentation. Qui dit érosion dit sédimentation et dépôt ; dans le secteur endoréique qui nous intéresse, le dépôt se fait forcément dans une dépression fermée, sans dommage donc pour le lit du fleuve Niger, qui souffre ces dernières décennies d'un fort problème d'ensablement, ou d'un de ses affluents.

Dans la zone sédimentaire du bassin des Iullemeden, et en particulier, pour la région qui nous intéresse entre la vallée du fleuve Niger et la vallée fossile du Dallol Bosso, on trouve aussi assez souvent des replats à mi-pente (voir chapitre 6). Ces replats constituent parfois des coupures complètes pour l'écoulement des eaux, qui s'arrête dans des mares situées sur ces replats ; toutefois le processus d'accroissement des écoulements, observé depuis quelques décennies, pourrait bien conduire à des débordements de ces mares, comme ceux qui ont permis les ruptures d'endoréisme observées près de Niamey (Mamadou, 2012 ; Descroix *et al.*, 2012b).

Dans les bassins d'études du programme AMMA, Tondi Kiboro et Wankama, tous deux situés dans la commune de Dantiandou, on observe deux configurations différentes, qui ont été décrites par Le Breton (2012).

- Tondi Kiboro : dans les bassins de Tondi Kiboro, le replat héberge une mare temporaire qui recueille les eaux arrivant des deux koris équipés (voir Descroix *et al.*, 2012a et Le Breton, 2012) ; les observations ont été menées de 1991 à 1994 (Esteves et Lapetite, 2003) puis de 2004 à 2011 (Descroix *et al.*, 2012a) ; on sait donc que cette mare ne débordait traditionnellement pas, arrivant à retenir l'intégralité des eaux d'écoulement (figure 86).

Toutefois en 2006, il est apparu pour la première fois un écoulement déversant de cette mare perchée vers l'aval, raccordant ce réseau hydrographique à celui du kori de Dantiandou (lui-même étant très parcellaire et intermittent, occupant une vallée fossile) ;

- Wankama : dans le bassin de Wankama (0,9 km²), malgré une défluvation dont il sera question plus bas, l'écoulement est continu du haut en bas de la toposéquence ; la zone d'épandage qui occupe le replat (et qui est à l'origine de la défluviation) est parcourue de ravines dont la tête remonte annuellement à un rythme décamétrique (Le Breton, 2012, voir plus bas). Mais arrivé au fond de la vallée fossile, l'eau hésite entre deux mares et peut suivant les années « remonter » quelques centaines de mètres vers l'amont et vers le creux formé par la mare ouest (figure 87).

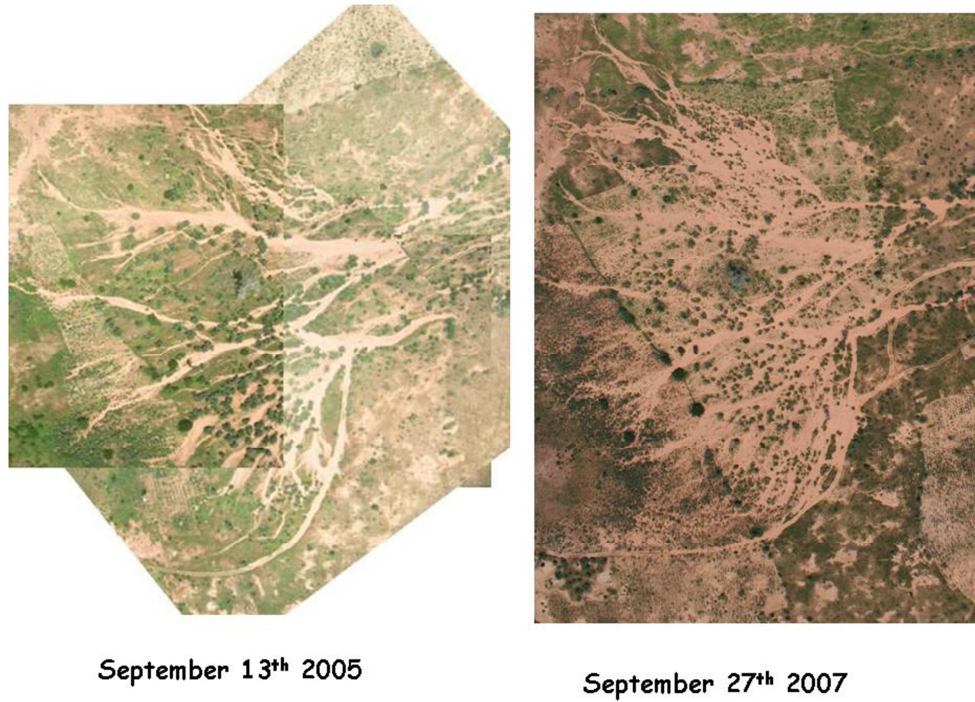


Figure 86. Evolution du cône de déjection double des deux ravines nord et sud de Tondi Kiboro entre septembre 2005 et septembre 2007 : progression des dépôts sableux (sources photos Pixy)

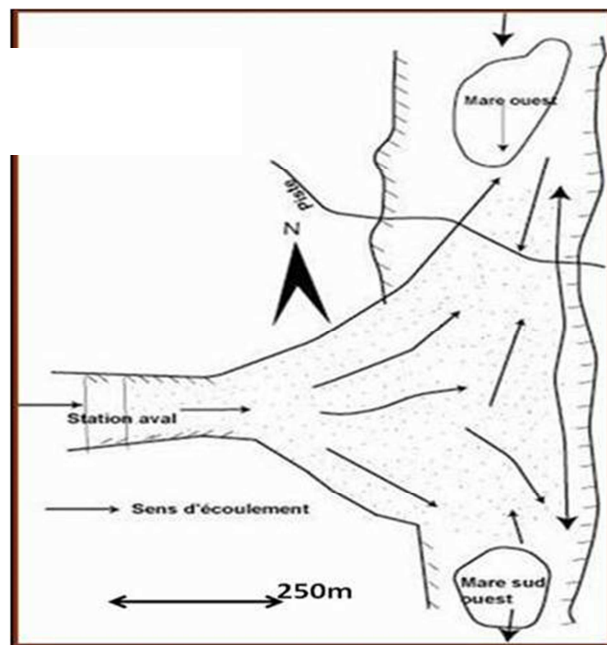


Figure 87. Arrivée (à l'ouest) du kori de Wankama dans le kori principal de Dantiandou ; l'eau peut, au gré des atterrissements et du remplissage des mares, aller vers l'amont ou l'aval de la vallée fossile ; mais les deux mares finissent par communiquer si le remplissage de la dépression est complet (Le Breton,, 2012)

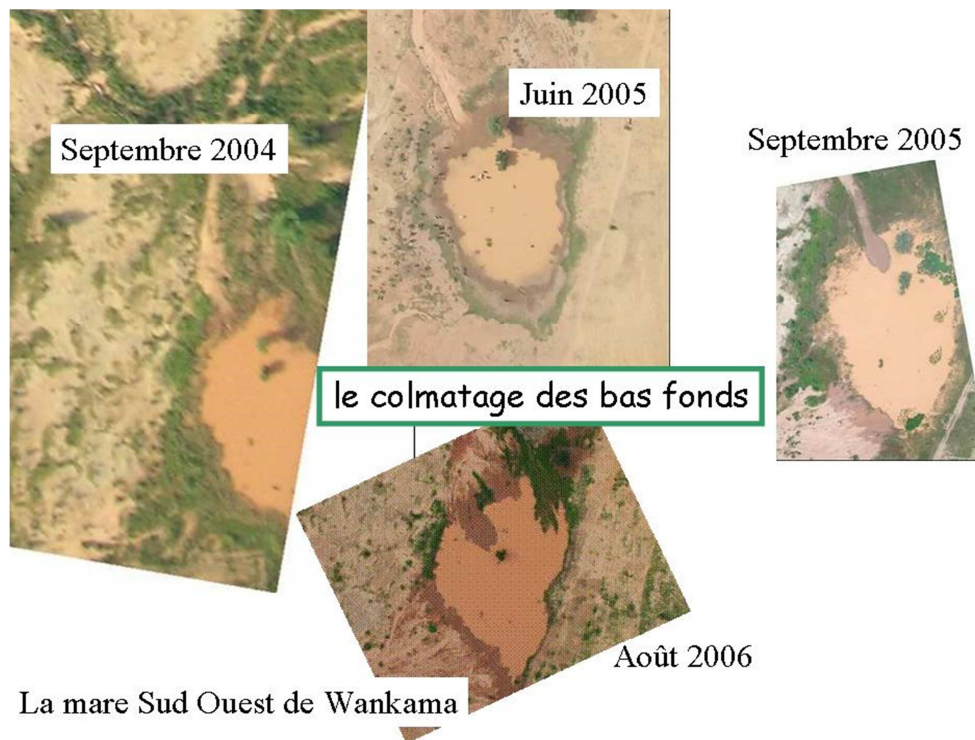


Figure 88. Cône de déjection formé par le kori de Wankama dans la mare Sud Ouest dans laquelle il se jette par épisodes (sources photos Pixy)

La figure 88 montre l'évolution de la mare sud-ouest de Wankama (voir localisation sur figure 87) au gré des saisons et de l'arrivée des transports sableux. Son ensablement a considérablement augmenté suite à la défluviation qui la remplit à présent par le sud.

8.2. Un réseau hydrographique rajeuni

Les travaux d'Eric Le Breton (Le Breton, 2005 ; Le Breton, 2012) ont bien illustré le lien entre augmentation du ruissellement et des écoulements, d'une part, densité de drainage de l'autre ; on observe bien une forte augmentation du linéaire du réseau hydrographique en corollaire de l'augmentation des volumes d'eau à écouler. Cette comparaison a par ailleurs fait l'objet d'un chapitre très illustré de la thèse de Sylvain Massuel (2005) et constitue un des points forts de l'article de Leblanc *et al.* (2008).

Le Breton (2005 et 2012) s'est en particulier intéressé à la zone d'épandage qui se trouve comme on l'a dit au centre du bassin de Wankama, position héritée du léger replat structural qui caractérise ce site. Il a assuré pendant 4 ans (2004-2008) le suivi de l'évolution de la ravine qui s'est creusée sur le drain principal, par recul de tête, avant et après la défluviation de 2006 (Figure 89).

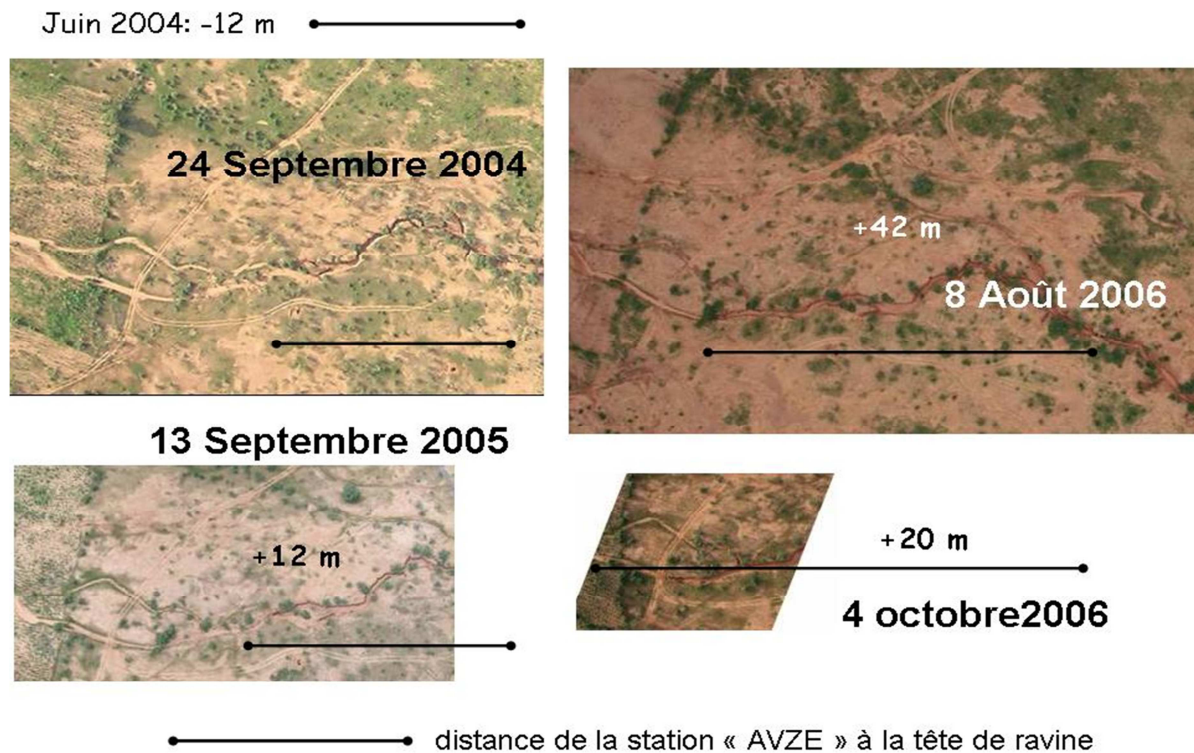


Figure 89. Evolution de la ravine du drain central du bassin de Wankama de 2004 à 2006 (Le Breton, 2012)

Cette ravine a été caractérisée par un recul de tête rapide les deux premières années, avant que la défluviation ne lui ôte l'essentiel de son agent érosif, l'essentiel du courant s'écoule ensuite dans un autre kori situé plus au sud et parallèle au kori équipé (voir plus bas figure 98). Le replat et la présence de cette zone d'épandage, dans laquelle s'infiltré une grande partie de l'eau provenant du haut du bassin, expliquent la baisse des débits observée (Descroix *et al.*, 2011b ; Le Breton, 2012) entre l'amont et l'aval de la zone d'épandage ; ce processus, mis en évidence par Esteves et Lapetite (2003) sur le bassin de Tondi Kiboro, est à la base de l'alimentation secondaire des nappes que constituent ravines et dépôts de versants. Il est clair que l'alimentation principale de la nappe du CT 3 provient des mares (Leduc *et al.*, 1998), mais de plus en plus elles sont secondées par un grand nombre de zones d'infiltration apparues avec la dégradation des milieux : ravines aux dépôts sableux parfois épais (figures 90 et 91), zones d'épandage, cônes de déjection, sont autant de secteurs dans lesquels l'eau peut à présent être stockée temporairement en attendant une infiltration profonde dans les sols et terrains sableux sous-jacents.

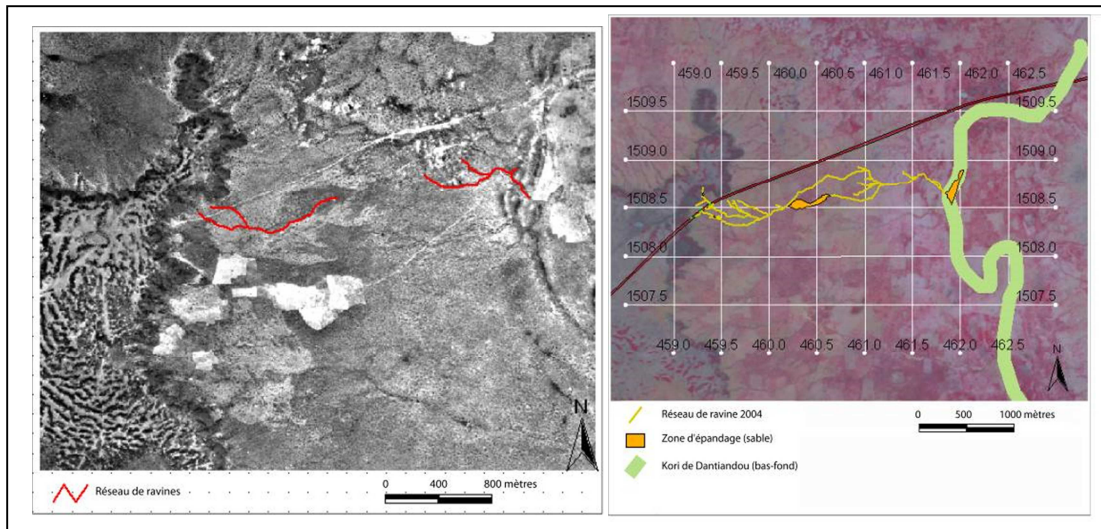


Figure 90. Evolution du réseau de ravines à Wankama 1950-2004 (Le-Breton, 2004)

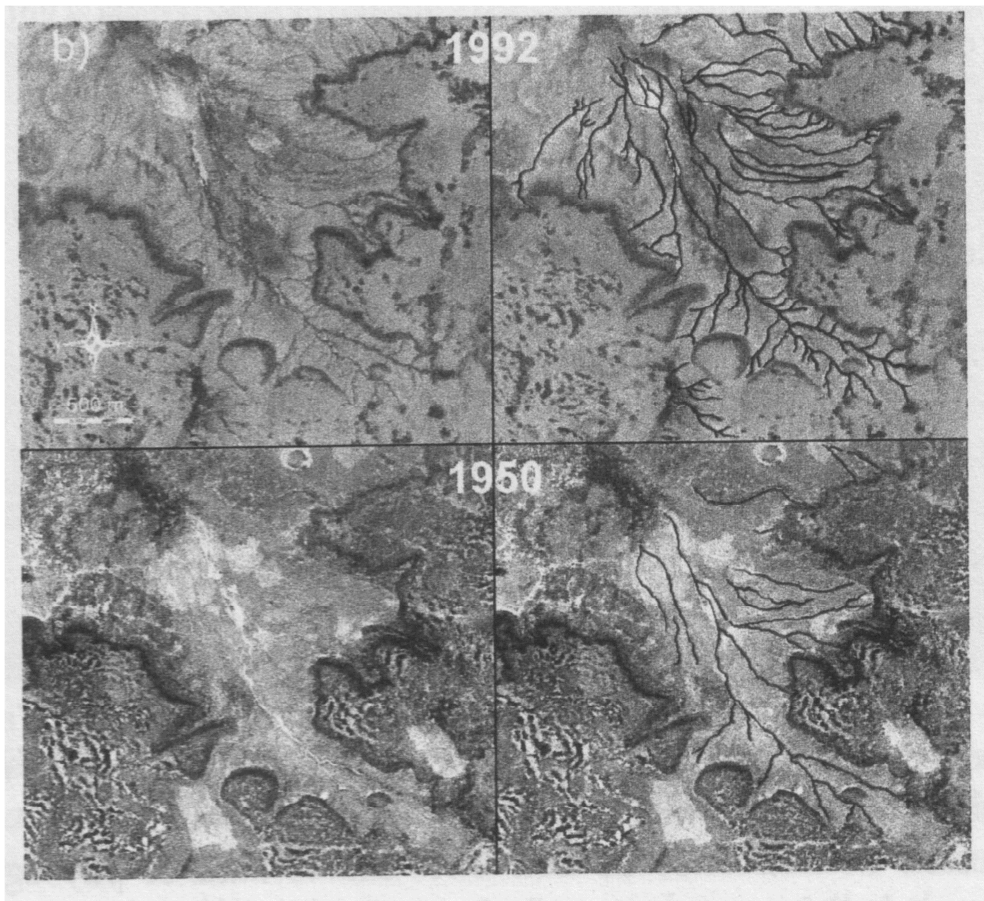


Figure 91. Evolution du réseau de ravines dans un secteur du degré carré de Niamey (Massuel, 2005)

La zone d'épandage de mi-versant de Wankama a fait l'objet de mesures hydrologiques puisqu'on s'est vite aperçu qu'elle représentait une zone d'infiltration importante (Le Breton 2012) ; dès 2003, des mesures géophysiques ont permis de confirmer par des méthodes géophysiques l'importance de l'infiltration profonde sous cette zone (Massuel *et al.*, 2006). Le Breton (2005) avait montré que la longueur totale du réseau de drainage avait été multipliée par 5 entre 1950 et 1992 (figure 90).

Le recul de tête est le processus principal de formation et d'entretien/évolution des ravines dans les milieux sahéliens aux sols sableux. On en voit le stade en 2004 sur la photo de la figure 92. Le bras gauche de cette ravine a les années suivantes reculé de plusieurs centaines de mètres au gré de ce recul de tête, avant de voir l'essentiel de son alimentation changer de bassin et stopper pratiquement ce processus de recul de tête (voir en plan, figure 89).



Figure 92. Ravine formée par le drain central (à gauche) du bassin de Wankama (Descroix *et al.*, 2004)

Que ce soit sur les bassins expérimentaux (Wankama, Tondi Kiboro, Dyabou, Boubon, Mélé Haoussa) ou ailleurs (figure 93, au bord d'une route), on voit bien que le ravinement est extrêmement rapide dans les sols sahéliens sableux, et ce malgré des pentes généralement très faibles. On a pu montrer qu'une pente de 0,5% jouait le même rôle dans la collecte du ruissellement qu'une pente bien plus prononcée, du moment que la surface concernée est très ruisselante, comme sur les plateaux cuirassés (figure 94, sur le plateau du Fakara à Sabara Bangou) ou les zones de sols encroûtés par les pratiques culturales. La photo de la figure 95 a été prise le 30 avril 2004 lors d'un événement pluvieux très précoce où 34 mm étaient tombés à Wankama (mais plus de 100 mm localement à Niamey et environs où de gros dégâts et des pertes humaines avaient été enregistrées). Le ruissellement se produit ici sur des zones encroûtées qui se sont formées à proximité du talweg, et qui mettent de plus en plus en communication les zones de cultures avec les drains, contribuant à accroître sensiblement les coefficients d'écoulement des bassins (Descroix *et al.*, 2011b).



Figure 93. Ravinement au bord d'une piste, probablement en lien avec celle-ci (impluvium accru, drain devenant ravine) ; on aperçoit l'encroûtement du sol au premier plan à gauche (route de Torodi à Kantchari) (Descroix et Yéro, février 2010)



Figure 94. Ruissellement de type hortonien sur un plateau latéritique à la pente imperceptible lors du passage d'un grain (pluviographe de Sabara Bangou, plateau du Fakara) (Descroix *et al.*, 2004)

Il s'agit bien sûr d'un ruissellement de type hortonien, lié au dépassement par l'intensité de la pluie de l'infiltrabilité des sols.



Figure 95. Crue du 30 avril 2004, bien avant le début de la mousson, sur la station Wankama AVZE alors en chantier ; le débit spécifique est fort du fait de l'absence totale d'activité végétale, comme pour les pluies de début de mousson (photo JM Bouchez, 2004)

Mamadou (2012) a parfaitement analysé le rôle des sapements de berge dans l'alimentation en sédiments des cours d'eau et dans leur dépôt. Ces matériaux prélevés sur les bords, formant des talus sub-verticaux du fait de la proportion de sable dans les sols et les terrains encaissants, constituent l'essentiel des matériaux transportés et déposés.

Ceci explique l'extrême facilité et rapidité de la dégradation des terroirs dans la commune de Dantiandou comme dans l'ensemble de la région (figures 96 et 97).

- Captures et défluviations

La grande mobilisation des sédiments et leur dépôt dans des secteurs plats d'une topographie par ailleurs très peu marquée est à l'origine des processus fréquents de défluviations ainsi que des ruptures d'endoréisme.



Figure 96. Sapements de berge observés par Mamadou (2012) en bordure du kori de Boubon ; ces sapements pourvoient l'essentiel du volume de matériaux érodés dans le bassin



Figure 97. Sapements de berge et berges sub-verticales dans le bassin du kori de Dantiandou (piste Wankama- Maourey Kouara Zéno) (Descroix, 2006)

La défluviation produite en août 2006 sur la zone d'épandage de Wankama n'est qu'un exemple de l'extrême activité de la dynamique morphologique liée à l'explosion du ruissellement sur des sols pourtant très sableux. C'est l'accumulation des dépôts à mi versant qui a modifié le système de pentes (très faible) et causé le déversement du kori de Wankama amont dans son voisin du sud (figure 98).

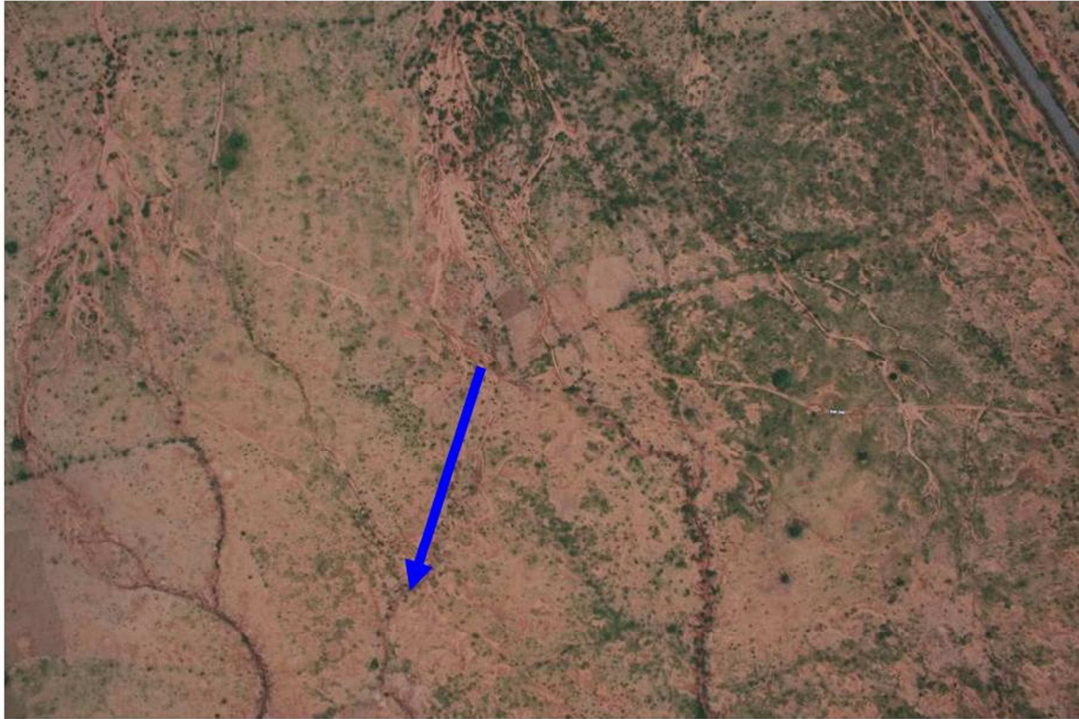


Figure 98 . Capture du kori de Wankama amont par le kori parallèle coulant au sud, au cours de la mousson 2005 (sources photos Pixy) (le nord est à droite de l'image).

8.3. L'influence du relief sur l'hydrologie

- l'eau dans la toposéquence et les bas-fonds

Toujours est-il que, sur les sites expérimentaux du degré carré de Niamey, on constate aussi bien à court terme (d'une année sur l'autre) qu'à long terme (sur les 15-20 dernières années, a fortiori des périodes plus longues), une évolution très nette des terroirs, caractérisée par :

- une très forte diminution de la végétation naturelle, remplacée par cultures et jachères
- une très forte dégradation des sols, qui se traduit par une très forte érosion (par ravine et par dépressions hydro éoliennes) et de très importants dépôts sableux en bas de versants ;
- une dégradation des propriétés physiques des sols, due à un fort encroûtement (croûte de type ERO suivant classification de Casenave et Valentin, 1989).

Ceci se traduit par une très forte baisse de la perméabilité des sols et donc de l'infiltration de l'eau, une forte augmentation des ruissellements, des écoulements et des débits ; comme on est dans une zone endoréique, ces eaux se concentrent dans les bas-fonds, formant des mares qui sont les principaux points de recharge de la nappe phréatique. Le niveau de celle-ci, dans le DCN (degré carré de Niamey), a donc monté de 4 m dans les 20 dernières années (voir plus haut figure 15 tirée de Leblanc *et al.*, 2008). Cependant, autant la forte augmentation de l'encroûtement et du ruissellement

est un processus qu'on observe presque partout en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne, autant la hausse de la nappe n'est observée pour l'heure que dans le degré carré de Niamey.

Sur les bassins de Wankama et Banizoumbou, mais aussi dans toute la région du degré carré de Niamey, on observe une dégradation actuelle, active et constante des sols et de la végétation. Ceci n'est pas forcément représentatif de l'ensemble de l'Ouest du Niger ni du Niger ni du Sahel ni de l'Afrique de l'Ouest (mais les cartes incluses dans Fensholt et Rasmussen, 2011, malgré le texte peu illustratif à notre sens, permettent de se faire une idée de la possible extension spatiale de cette dégradation), mais n'en constitue pas moins un élément à prendre en considération dans l'étude de la vulnérabilité des sociétés et le rôle de l'élevage face à celle-ci.

On observe entre autres :

- une progression des ravines (voir mémoire de maîtrise de Eric Le Breton, 2004 pour le BV de Wankama), qui coupent les pistes et menacent les ballasts des routes. La ravine creusée par le drain principal du bassin a vu sa tête reculer de 140 m entre 2004 et 2009 (figure 89), repoussant d'autant vers l'amont le chemin permettant de la franchir. Cela a bien été décrit par Le Breton (2004 et 2012). Une étude régionale a été réalisée par Massuel (2005) et par Leblanc *et al.* (2008) (figure 91 plus haut).
- une augmentation de la surface encroûtée et des dépressions hydro-éoliennes ; la surexploitation des sols commence par une diminution des temps de jachère et un allongement des temps consacrés à la culture. Les sols sableux fragiles et peu fertiles du Sahel se détériorent très vite si un repos de quelques années (jachère) n'est pas planifié pour restaurer leur structure. Ce raccourcissement des jachères et la pratique consistant à défricher complètement les parcelles au moment de la mise en culture, ont deux conséquences :
 - la première est un encroûtement des sols du fait de leur fatigue : la structure se dégrade et les pores se referment peu à peu, entraînant une baisse de la perméabilité et très rapidement, une croûte de type ERO se forme sur les premiers centimètres (figure 99); sur des jachères anciennes se forment aussi des croûtes algales, peu perméables du fait de leur hydrophobie) (figure 85) ;



Figure 99. Parcelle de mesure constituée de croûte ERO sur le site expérimental du bassin de Boubon (Mamadou, 2012)

- la deuxième est que le vent peut agir facilement en saison sèche en emportant les particules fines en surface, le moindre creux pré-existant pouvant vite devenir une « dépression hydro-éolienne » (DHE) (figures 81 et 82) qui s’auto-entretient et s’accroît par aérodynamisme (figure 100) ; celles-ci peuvent apparaître aussi bien sur les glacis (le plus souvent) que sur les placages sableux des plateaux et parfois même dans les bas-fonds, et sont constituées d’une croûte de même type ; les paysans, pour le moment, ne cherchent pas, dans le degré carré de Niamey, à pallier ce fait, alors que mettre en culture ces zones et en multiplier les sarclages suffit, au début, à y récupérer en quelques années la fertilité d’origine. Peu à peu les DHE deviennent coalescentes, comme on peut l’observer dans la moitié aval du bassin de Wankama (près de la station de flux « milieu dégradé »). (figure 82).
- en aval, on note des dépôts plus abondants et la formation de zones d’accumulation sableuses à mi versant comme en aval des bassins expérimentaux de Tondi Kiboro, où l’on note l’évolution rapide de ces dépôts en deux ans (figure 86) ;
- l’accumulation de sédiments à mi versants peut conduire à des captures par déversement, le sable accumulé gênant la progression de l’eau dans son cours naturel, le flux peut aller se déverser dans le kori voisin, car les versants sont très plans ; cela s’est produit à la fin de l’hivernage 2006 au milieu du bassin versant de Wankama (figure 98) ;

- si rien n'arrête l'écoulement et ses transports solides, ces éléments sableux sont transportés jusque dans les bas-fonds, pouvant contribuer localement au colmatage de mares comme celle de Wankama Sud-Ouest (figure 88).



Figure 100. Dépression créée par la surpression du vent gêné par l'obstacle d'un *Balanites aegyptiaca*, très touffu même en saison sèche (Luxereau et Roussel, 2009)

Ce même genre d'apports sableux contribue, dans la zone exoréique proche du fleuve Niger, à l'ensablement du lit de celui-ci ; ainsi le kori de Kourtéré a construit un immense cône de déjection de plusieurs centaines d'hectares au cours du seul évènement très intense du 1^{er} septembre 1998 au cours duquel des précipitations supérieures à 100 mm ont été enregistrées sur les bassins entourant Niamey (rive droite essentiellement) (figures 101, 102 et 103). De l'autre côté du fleuve, en rive gauche, le kori de Boubon a connu une forte dégradation de ses sols et de sa couverture végétale ce qui a contribué à lui donner un caractère torrentiel, comme à plusieurs de ses voisins, et à construire un cône de plusieurs dizaines d'hectares en quelques années.



Figure 101. Evolution du cône de déjection du kori de Kourtéré en amont immédiat de Niamey, rive droite du fleuve Niger, considérablement agrandi lors de la crue de 1998 (Amogu, 2009)

La figure 103 réalisée à partir d'images satellitaires, montre bien comment le cône a envahi le lit principal du fleuve Niger. Celui-ci est déporté sur sa gauche, mais surtout, son lit est réduit, ce qui facilite le débordement des eaux en cas de crue ; c'est ce qui s'est produit à deux reprises durant la mousson 2010, où le fleuve a dépassé par deux fois son plus haut niveau jamais atteint durant l'hivernage, puis bien plus gravement, en août 2012 (Descroix *et al.*, 2012b).



Figure 102. Cône de déjection du kori de Kourtéré en amont immédiat de Niamey, rive droite du fleuve Niger, apparu à partir de la crue de 1998 (photo Emmanuèle Gautier, 2007)

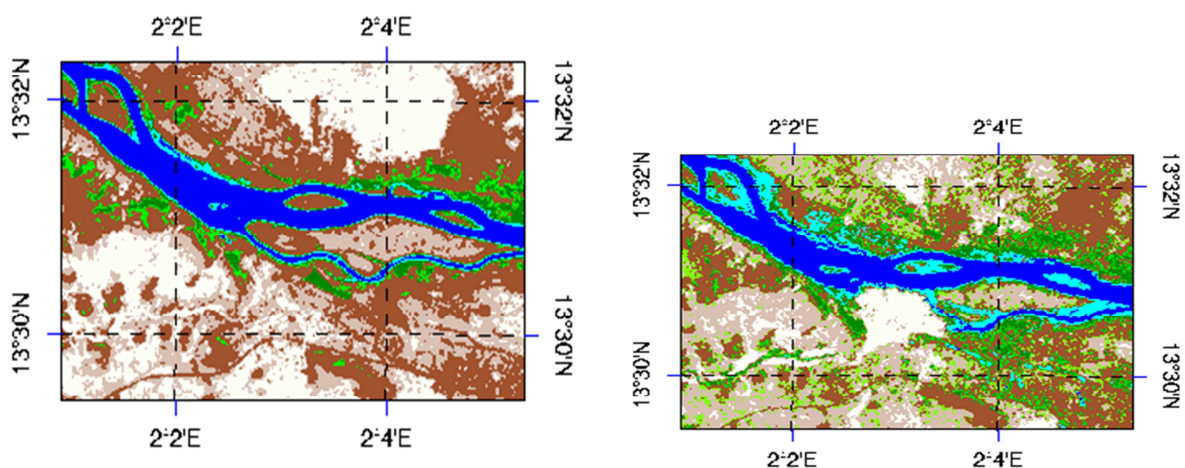


Figure 103. Confluent du Kourtéré en 1984 (à gauche) et en 1999 (à droite) juste après l'apparition du cône de déjection (Amogu, 2009)

8.4. Des débits en forte augmentation

- y a-t-il un lien avec la densité de drainage ?

Oui clairement, l'augmentation de la densité de drainage est liée à l'augmentation générale observée du ruissellement et de l'écoulement. Plus d'eau à évacuer, donc plus de drains nécessaires, c'est surtout le cas on l'a vu sur les glacis et plus spécialement sur les hauts glacis qui ont connu une forte dégradation sous la forme d'un fort encroûtement des sols. Par contre, plus on va vers l'aval, plus le réseau hydrographique reste inchangé, même s'il est de plus en plus sujet à des réajustements en raison de débits de plein bords modifiés.

- augmentation des débits sur les petits bassins versants

A l'échelle de la commune de Dantiandou, dont le territoire est entièrement endoréique, on a pu mesurer (Descroix et al., 2011b) une augmentation des écoulements sur deux petits bassins d'une dizaine d'hectares chacun, sur le site expérimental de Tondi Kiboro, à 4 km à l'Est de Banizoumbou. Les figures 43 et 77 (voir plus haut) montrent, pour les deux bassins « amont et « aval » (séparés par le petit tireté sur la carte) une dégradation des sols (surtout pour la partie aval). Le tableau 17 montre par ailleurs l'augmentation presque générale des débits pour ces bassins comme pour celui de « bodo », bassin bordier au sud du précédent. L'augmentation est très sensible pour les bassins « amont » et « bodo » en termes de coefficient d'écoulement annuel ; l'augmentation ne s'observe pas par contre pour le bassin « aval » car comme ceux de Wankama (Le Breton, 2012), et comme l'avaient déjà observé Esteves et Lapetite (2003), celui perd une grande partie de son débit, qui se perd par infiltration dans son lit. Par contre on remarque que la relation pluie/débit par évènement pluvieux marque une augmentation du coefficient a dans les trois bassins.

Tableau 17. Augmentation des écoulements entre la période 1 (1991-1994) et la période 2 (2004-2011) sur les trois petits bassins versants de Tondi Kiboro

1991-1994	pluie	Lame écoulée	Kr	Pluie/débit	r^2 $R = a P + b$	Durée annuelle écoulement en h
TK amont	513	180	0,36	$R = 0,56 P - 2,61$	0,82	34,9
TK aval	513	133	0,26	$R = 0,43 P - 2,3$	0,79	28,1
TK bodo	485	185	0,38	$R = 0,53 P - 2,14$	0,68	62,7
2004-2011	pluie	Lame écoulée	Kr	Pluie/débit	r^2 $R = a P + b$	Durée annuelle écoulement en h
TK amont	471	201	0,42	$R = 0,72 P - 4,4$	0,82	31,1
TK aval	476	120	0,26	$R = 0,45 P - 3$	0,76	16,1
TK bodo (2007-11)	451	218	0,48	$R = 0,82 P - 5,24$	0,81	23,1

Les débits augmentent et la durée des écoulements, elle (dernière colonne) diminue dans tous les cas, traduisant l'augmentation du ruissellement, la baisse de la capacité de rétention en eau des bassins, et la diminution des écoulements de base, les plus utiles pour la mise en valeur des terrains. Dans ce cas, on remarque que c'est cette fois le bassin « amont » qui évolue le moins avec une durée d'écoulement presque identique pour les deux périodes. A l'inverse cette diminution est bien plus marquée dans le bassin « aval », ce qui peut être en lien avec la très forte infiltration dans le lit, qui ne permet qu'aux crues les plus importantes d'arriver à la station aval, les autres voyant leur débit intégralement infiltrer dans le lit sableux. C'est toutefois le bassin sud « bodo » qui voit sa durée d'écoulement baisser le plus drastiquement, diminuant de plus de moitié. Et ce pour des coefficients d'écoulement et des débits écoulés sensiblement supérieurs ; il a été démontré que l'augmentation des débits était en grande partie liée à un accroissement de l'impluvium ; en effet, la dégradation de la végétation du plateau, est rapide. Les bandes de brousse tigrée sont surexploitées pour alimenter les foyers locaux en bois ; et de plus en plus, cette végétation est coupée pour les besoins en bois de la ville de Niamey, partant par camions entiers. Par contre, cet accroissement de l'impluvium n'est a priori en rien responsable de la diminution de la durée totale de l'écoulement annuel.

Le Breton (2012) note une augmentation de l'écoulement, pour la seule période de mesure de 2004 à 2011, sur le petit bassin versant de Wankama ; mais il précise bien que la période est trop courte pour que cette augmentation soit significative et attribuable à une quelconque évolution des occupations des sols.

Sur les bassins un peu plus importants se déversant directement dans le Niger, bassins ayant des surfaces de 10 à 1000 km² environ, peu de mesures existent. Mamadou (2012) n'a pu obtenir qu'une seule année complète de débits sur le kori de Boubon, l'année 2009, du fait de problèmes de logistique et de pannes de matériel.

Mais cet auteur a fait de nombreuses et riches observations concernant les ruptures d'endoréisme ; en effet, celles-ci sont assez répandues dans la région de Niamey (parce que celle où le milieu est le plus soumis à dégradation du fait de la proximité de la ville ?), comme le montre la figure 104. Ces ruptures d'endoréisme ont causé une extension du bassin versant naturel du fleuve Niger ; si cette extension est modeste (quelques centaines de km², un ou deux milliers au plus), elle concerne des terrains très dégradés, ayant pu provoquer la formation de crues fortes sur de petits bassins, donc elles sont susceptibles de fournir un débit supplémentaire notable.

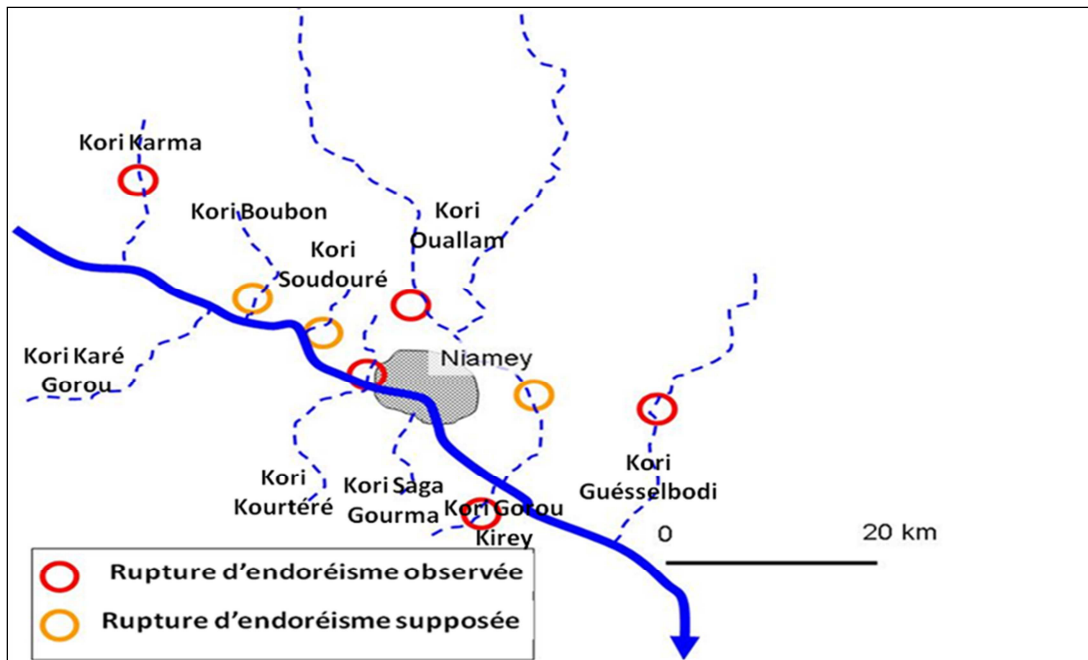


Figure 104. Ruptures d'endoréisme observées et supposées dans la région de Niamey ces dernières décennies (Mamadou 2012)

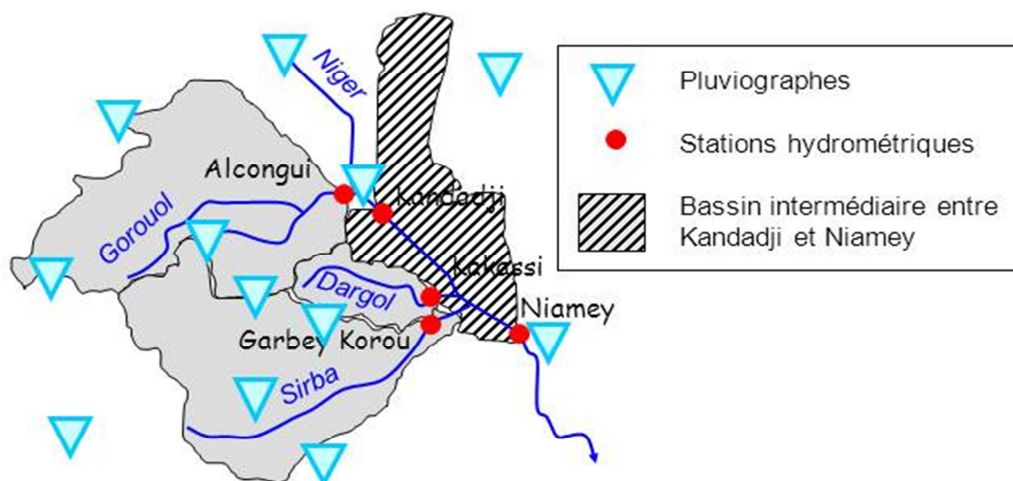


Figure 105. Bassin intermédiaire du fleuve Niger entre Ansongo (Mali) et Niamey ; la partie hachurée représente le bassin versant (rive droite et rive gauche) entre les stations de Kandadji et Niamey à l'exclusion des bassins du Dargol et de la Sirba (rive droite) (Amogu, 2009)

La seule manière d'appréhender l'évolution des débits sur les petits affluents du fleuve Niger est de procéder comme l'a fait Amogu (2009) ; celui-ci a établi la différence entre le débit du Niger à la station de Niamey d'une part, et la somme des débits du Niger à Kandadji (voir figure 105), de celui des deux grands affluents intermédiaires entre les deux stations de Niamey et Kandadji, c'est-à-dire le Dargol et la Sirba, d'autre part. En actualisant son document avec les deux dernières années disponibles on constate (figure 106) ce qu'Amogu remarquait, c'est-à-dire une très nette différence de

comportement entre la situation avant et après 1997. Avant 1997, le débit à Niamey était inférieur à la somme des trois autres, reflétant une diminution des écoulements malgré les apports, donc un surcroît de débit ne compensant pas les pertes par évaporation et infiltration. Après 1997, et en tenant compte des années manquantes, nombreuses, on remarque que le débit à Niamey est toujours très nettement supérieur à la somme des trois autres stations. Cela ne peut être dû qu'à l'apport des affluents du « bassin intermédiaire » ces petits affluents non jaugés par les stations Kandadji (Niger amont), Garbey Korou (Sirba) et Kakassi (Dargol) ; celui-ci, représenté sur la figure 105 en hachuré, semble être devenu très productif et compense donc depuis plus d'une décennie les pertes du fleuve entre Kandadji et Niamey. On peut donc en conclure que ces affluents ont vu leurs écoulements augmenter, même si comme on l'a vu précédemment, une partie de cette progression est due à l'accroissement de l'impluvium par les ruptures d'endoréisme.

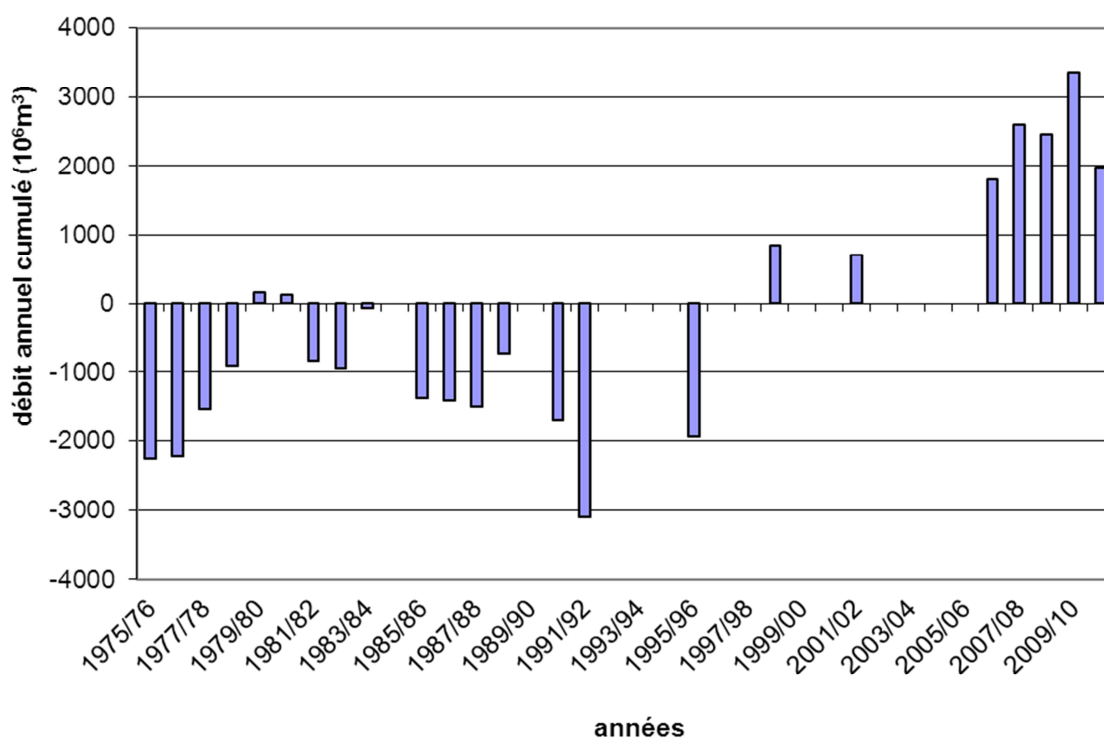


Figure 106. Différence entre le débit du Niger à la station de Niamey et la somme des débits du Niger à Kandadji sommé de celui des deux grands affluents intermédiaires entre les deux stations : le Dargol et la Sirba (in Descroix *et al.*, 2012b)

- augmentation des débits sur les grands bassins versants

Le « paradoxe du Sahel » mis en évidence par Albergel (1987) dans sa thèse, est le fait que les écoulements aient augmenté au Sahel malgré la baisse marquée des précipitations après 1968.

Comme le montre la figure 107, les débits des cours d'eau sahéliens augmentent depuis une cinquantaine d'années, en dépit de la baisse prononcée des pluies (Amogu *et al.*, 2010 ; Descroix *et*

al., 2012b). Et ce phénomène est en cours d'accroissement, au moins dans la vallée du Niger moyen. On observe très nettement que les débits des affluents de rive droite du Niger en zone sahélienne se comportent comme le Nakambé, montrant une forte croissance des débits et des coefficients d'écoulement depuis le début de la sécheresse. Les débits ont plus que doublé et les coefficients d'écoulement ont pratiquement triplé. Ceci traduit encore une nette diminution de la capacité des sols et des bassins versants à conserver leurs eaux ; la dégradation des terroirs et l'extension des sols encroûtés se traduit par une nette augmentation des débits pour ces cours d'eau dont les bassins sont des superficies comprises entre 7000 (Dargol) et 45000 km² (Gorouol).

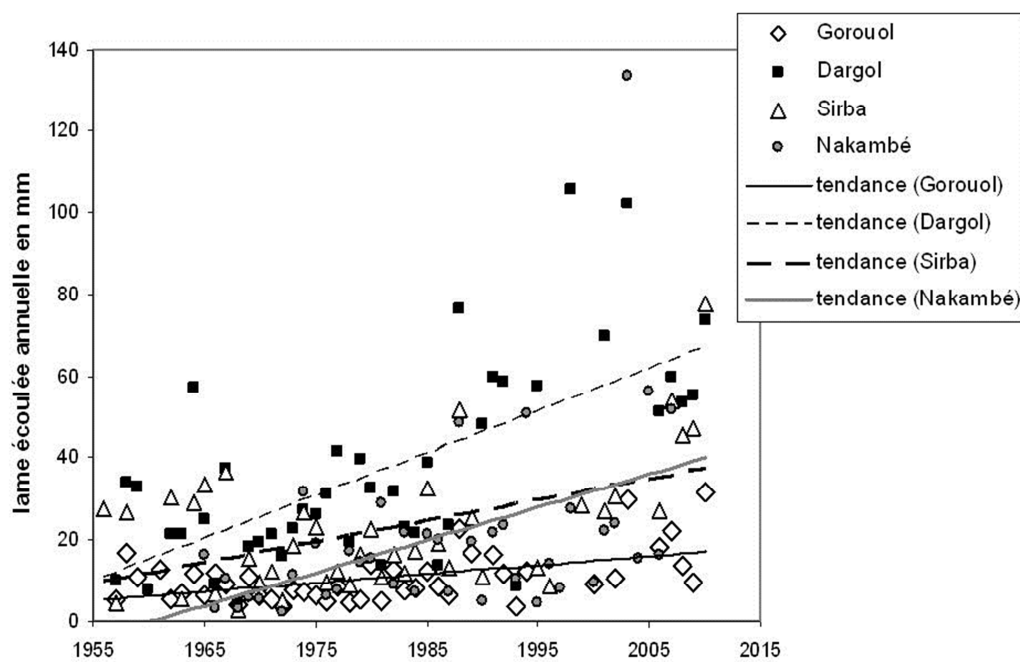


Figure 107. Augmentation des débits des cours d'eau sahéliens (Amogu *et al.*, 2010 ; Descroix *et al.*, 2012b)

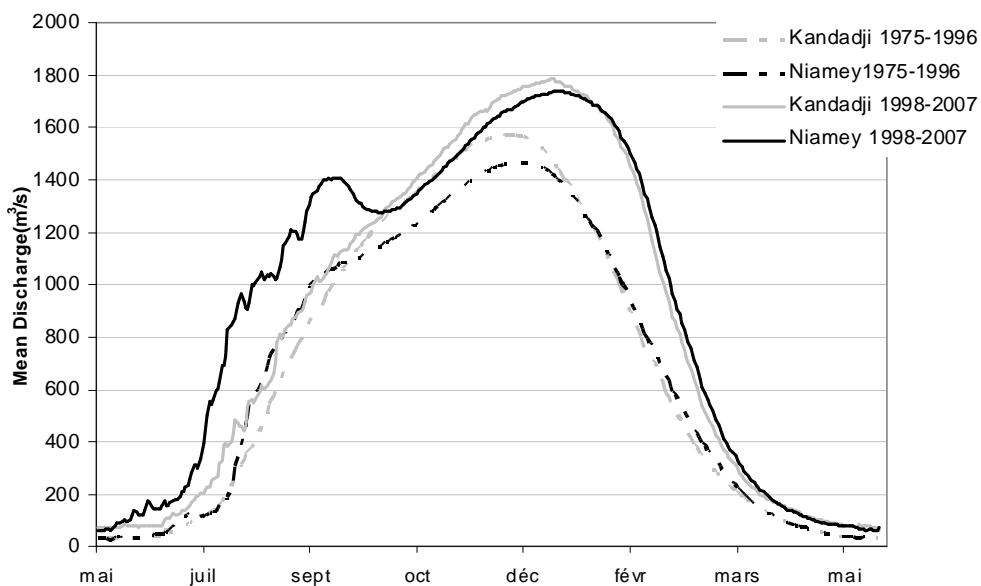


Figure 108. Mise en évidence de l'augmentation du débit du fleuve Niger en début de mousson entre Kandadji et Niamey après 1996 (Amogu *et al.*, 2010 ; Descroix *et al.*, 2012b)

Cette augmentation semble être le fait surtout du début de saison. En effet la figure 108 montre la croissance des débits du fleuve Niger entre Kandadji et Niamey en début de mousson, liée à la diminution de la capacité des sols et des versants à retenir l'eau. On compare ici les débits du fleuve Niger aux stations de Kandadji et de Niamey, avant et après 1996. On observe que, si aucune évolution notable n'est visible à Kandadji, le régime de la station de Niamey a sensiblement évolué, avec l'apparition d'une première crue durant la mousson, bien plus marquée qu'auparavant. Un important volume d'écoulement apparaît à cette station après 1996, qui n'existait pas auparavant, traduisant des écoulements plus importants et plus rapides en début de saison dans la zone sahélienne du bassin du Niger.

- une crue de plus en plus précoce

Cela rejoint une observation réalisée par Amani et Nguetora (2002) il y a déjà une dizaine d'années. Ceux-ci ont remarqué que la crue annuelle de la Sirba survenait, dans les années 1980, près de un mois plus tôt que ce qui était observé une vingtaine d'années avant, dans les années 1960 (figure 109).

Débits journaliers à Garbe sur la Sirba

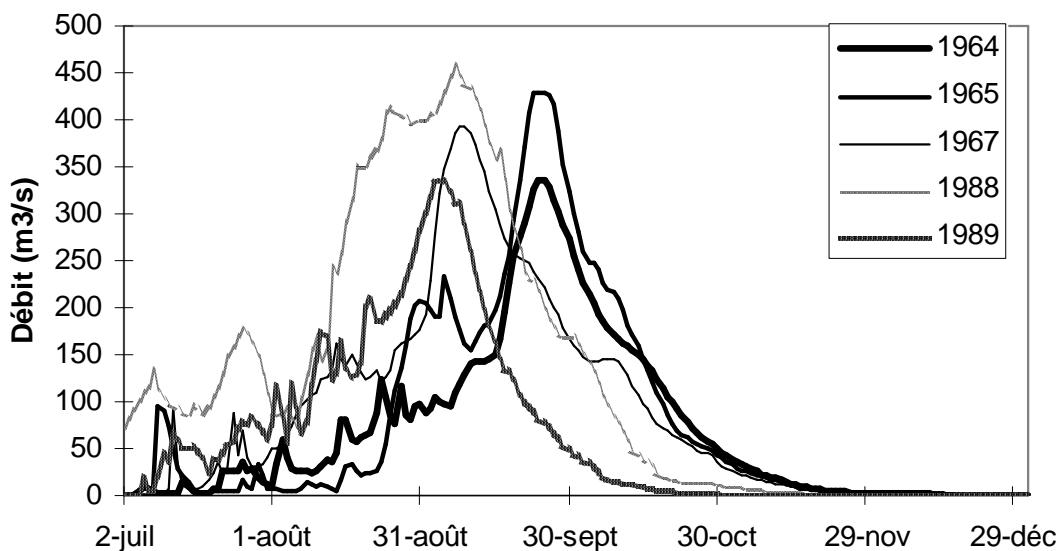


Figure 109. Evolution de la crue annuelle de la Sirba dans les années 1960 puis les années 1980 : on remarque une survenue de la crue de plus en plus précoce (Amani et Nguetora, 2002)

Plus récemment, Descroix *et al.*, (2012b) ont montré comment le comportement des affluents petits et grands du Niger dans son cours moyen influençait depuis quelques décennies le débit et le régime du Niger à Niamey ; en effet, le régime, traditionnellement monomodal malgré la distinction des deux

crues, la première, crue « rouge » et locale venue des affluents de rive droite principalement, se produisant pendant l'hivernage et la seconde, la principale, crue « noire » ou « guinéenne » venant du haut bassin, est en train de devenir chroniquement bimodal, avec la première crue se produisant de plus en plus tôt, et s'individualisant de plus en plus de la seconde crue. La figure 110 montre bien comment pour la décennie 2000, la première crue se produit pratiquement 40 jours plus tôt qu'il y a 40 ou 50 ans.

On constate donc que les écoulements se produisent plus tôt sur les grands bassins ; qu'ils se produisent plus vite sur les petits bassins, traduisant une baisse de la capacité de rétention en eau des sols et des bassins, observée à toutes les échelles.

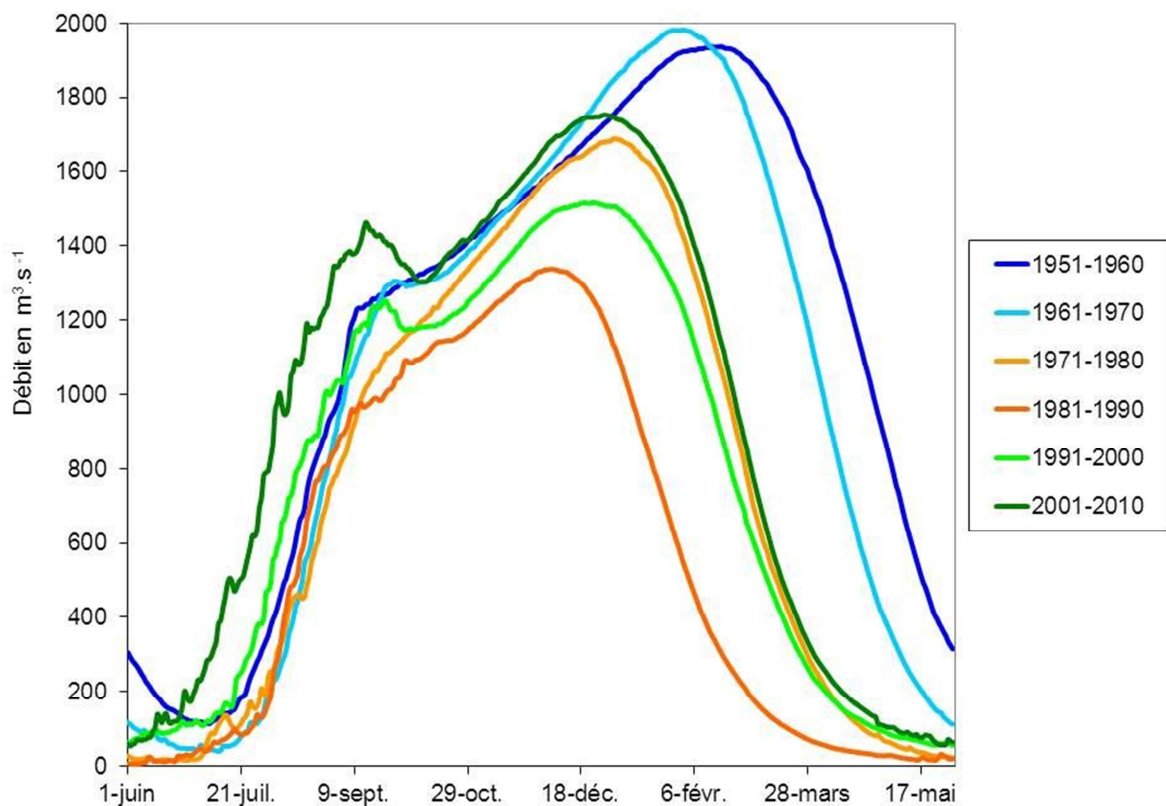


Figure 110. Mise en évidence de l'augmentation du débit du fleuve Niger en début de mousson à la station de Niamey pour la décennie 1991-2000 et plus encore, la décennie 2001-2010 (Descroix *et al.*, 2012b)

8.5 Quel lien entre les unités de paysage et le cycle de l'eau ?

- lien avec le « paradoxe de Niamey » (hausse de la nappe dans le degré carré de Niamey)

Cependant, la commune de Dantiandou est entièrement située dans le secteur endoréique du bassin des Iullemmeden. Si l'on y a constaté une hausse récente des débits, le surcroît d'eau est surtout visible dans la nappe du CT3 (figure 15 plus haut).

Dans ces secteurs endoréiques, le surcroît d'écoulement finit dans des mares, qui sont devenues plus nombreuses, plus étendues et aussi plus durables. Si cela peut apporter un bénéfice pour l'abreuvement du bétail (moins de problème d'accès aux points d'eau durant la saison sèche), il arrive que la multiplication des mares et leur plus grande durée en eau pose des problèmes à cause de la submersion de bonnes terres agricoles ou de chemins d'accès ou de liaison enfouis sous l'eau (Bouzou Moussa *et al.*, 2009).

Un phénomène est également apparu ces dernières décennies en lien avec la remontée de la nappe (accélérée dernièrement par l'infiltration profonde sous les ravines et sous les plages de dépôt sableux. C'est l'affleurement de plus en plus fréquent de la nappe dans les creux de la topographie, sous forme de mares ; ce sont les fameuses « bangou bi » (mares noires) très distinctes des mares saisonnières, « bangou kirey » ou mares rouges. Ces mares permanentes sont devenues omniprésentes ; la plus fameuse, celle de Mountséka, a gêné la circulation dans une grande partie du Niger central depuis des années ; elle est encore en croissance ; dans le degré carré de Niamey, elles sont apparues tout d'abord au fond du Dallol Bosso (figure 111) où elles sont localement exploitées en rizières, mais ont aussi rendu hydromorphes de nombreux terroirs auparavant très fertiles. Puis elles sont apparues petit à petit dans les parties les plus basses de la topographie, aux alentours de Niamey (nord aéroport, Bagabati Kouara, Gardama Kouara, etc) mais aussi, près de Dantiandou, dans les villages de Boula Kouara Zéno et Boula Kouara Tegui (figure 112), en bordure de la commune, dans la basse vallée fossile du kori de Dantiandou.

On a donc un processus double d'alimentation des nappes principalement par les mares « rouges » du fait du caractère endoréique de la région, mais la remontée de la nappe finit elle-même par provoquer l'apparition de nouvelles mares, mais « noires » celles-là, puisque constituées d'eaux filtrées de la nappe phréatique.



Figure 111. Affleurement de la nappe du CT3 au fond du Dallol Bosso ; photo prise en pleine saison sèche (Descroix *et al* janvier 2004).



Figure 112. Affleurement de la nappe du CT3 au fond de la vallée du kori de Dantiandou, en bordure du village de Boula Kouara Tegui (novembre 2006). Une photo bien plus ancienne de cette mare, prise en 1997, alors plus réduite, figure dans la thèse de Guillaume Favreau (2000)

Conclusion du chapitre 8. Quelles conséquences régionales ?

Comme on l'a vu plus haut, l'augmentation des ruissellements et des écoulements semble se produire partout au Sahel ; le problème majeur d'information provient du faible nombre de cours d'eau jaugés depuis longtemps. Les stations hydrométriques sont peu nombreuses ; de plus, beaucoup ont été fermées au début des années 1990 suite aux Plans d'Ajustement Structurels imposés par les institutions internationales, et parmi elles des stations qui avaient plusieurs décennies d'enregistrements et auraient pu permettre de constater l'évolution des dernières décennies.

En tout cas l'hypothèse émise par Jean Albergel dans sa thèse sur l'augmentation des débits pour des raisons non-climatiques se confirme ; partout où des mesures existent au Sahel (figure 113), on observe une augmentation des débits depuis le début de la sécheresse, liée à des causes non climatiques, et attribuée aux changements d'usage des sols. Insistons sur le fait qu'une partie de la mortalité végétale, en particulier pour les arbres et, sur les sols peu épais, pour toutes les strates de végétation, est due à la sécheresse elle-même, de nombreuses variétés n'ayant pas supporté les deux pics de sécheresse, celui des années 1973-74 puis celui de 1984-85. Comme l'ont justement fait remarquer Gardelle *et al.* (2010), les sols peu épais comportent peu de réserves hydriques et une sécheresse prolongée suffit pour y occasionner une forte perte dans les espèces végétales ; pour peu que le sol, qui n'est plus retenu par les racines, soit ensuite emporté par l'érosion, le processus pourrait être irréversible sauf intervention des sociétés pour restaurer volontairement ces terroirs.

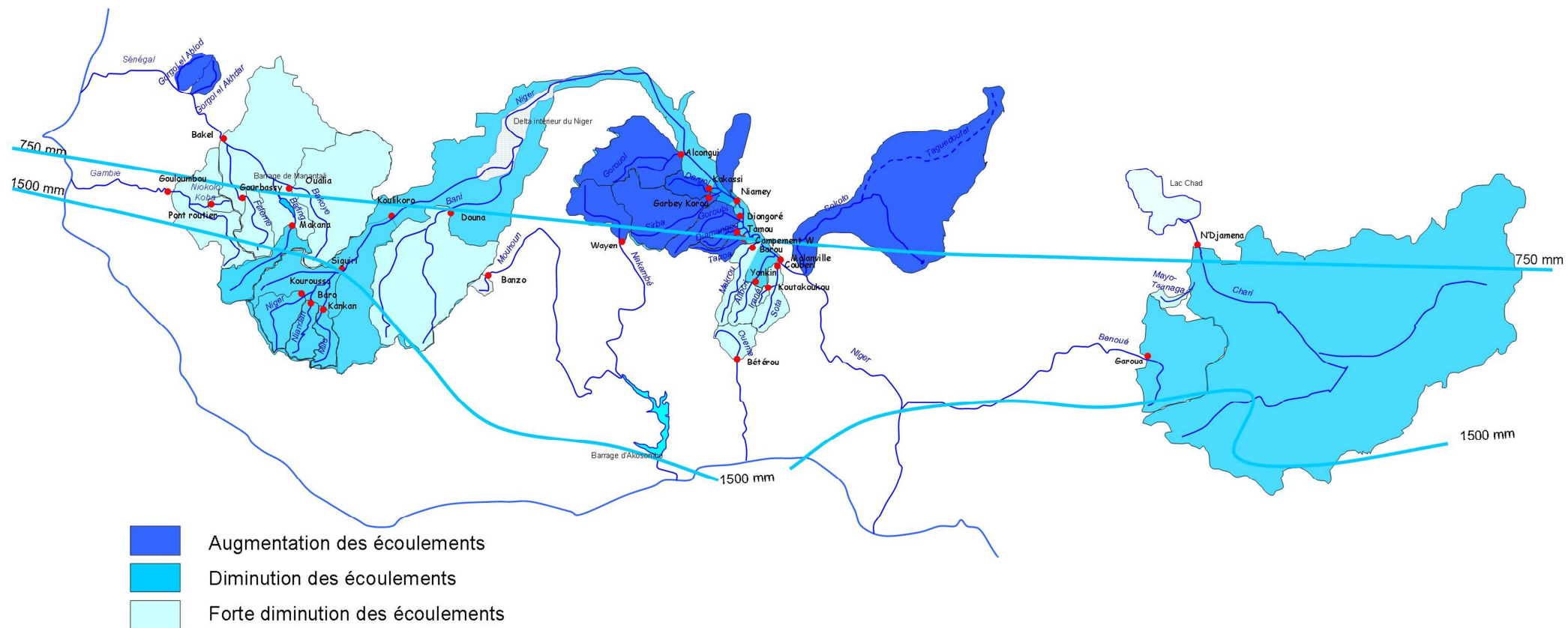


Figure 113. Bassins versants dont le comportement est connu : diminution ou augmentation des écoulements (actualisé de Amogu *et al.*, 2010)

CONCLUSION GENERALE

La figure 113, actualisée d'Amogu *et al.* (2010) est en soi une tentative de régionalisation des processus hydrologiques et de leur évolution.

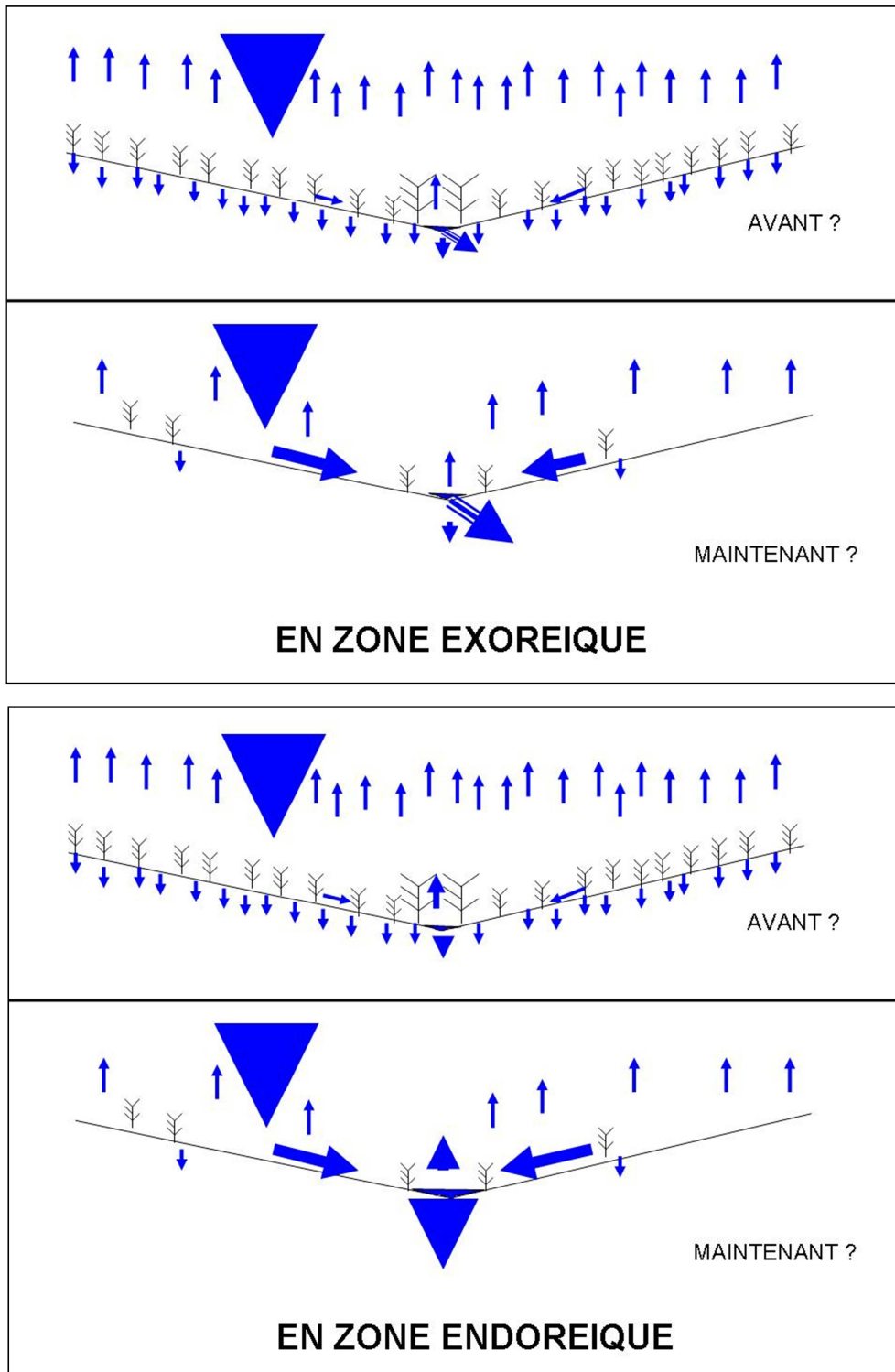


Figure 114. Schéma synthétisant les fonctionnements principaux des zones sahéniennes, en zone exoréique (en haut) et en zone endoréique (en bas) (Le Breton, 2012)

Le suivi des changements d'occupation des sols de 1950 à 2010 à partir des photographies aériennes et des images satellitaires montre que la zone d'étude a subi des changements majeurs. En effet, du point de vue bilan de cette étude nous retiendrons que l'occupation des sols a considérablement évolué entre les différentes dates examinées. De l'échelle des petits bassins versants à celle du degré carré de Niamey l'occupation des sols a connu des variations importantes :

- Au niveau du bassin versant de Wankama, on a observé une augmentation des surfaces cultivées, une augmentation des sols dégradés entre 1950 et 1992 ;
- Au niveau du bassin versant de Tondi Kiboro la brousse tigrée a diminué de 1965 à 2007, la savane arborée présente en 1965 est remplacée par des cultures en 2007, on assiste à l'apparition de zones d'épandage en 1993, mais aussi à une progression des surfaces ravinées entre 1965 et 2007 ;
- Au niveau de la commune de Dantiandou la dynamique des occupations des sols révèle une augmentation des surfaces des sols dégradés entre 1986 et 2010, une baisse de la végétation contractée de la brousse tigrée pour la même période et aussi une augmentation des superficies occupées par les mares ;
- Au niveau du degré carré, le suivi de l'évolution de l'occupation des sols entre 1965 et 2010 sur une grande partie de cette région a mis en évidence l'augmentation des zones de culture, des sols dégradés entre les deux dates mais aussi une diminution de la végétation contractée de la brousse tigrée.

Le même constat a été effectué par des travaux antérieurs d'autres équipes sur la zone d'étude et dans d'autres terroirs sahéliens.

Or nous assistons de plus en plus à une augmentation des coefficients de ruissellement des bassins versants sahéliens, une augmentation des coefficients d'écoulement des cours d'eau affluents de la rive droite du fleuve Niger, et des débits, depuis le début de la sécheresse (la fameux paradoxe du Sahel...). Cependant, Il faut remarquer à la suite d'Olivry (2002) que, à l'inverse des régions sahéliennes, les zones soudaniennes ont connu, elles, une très forte diminution des écoulements, plus logique que le processus paradoxal observé plus au nord. En effet, ces régions ont traditionnellement un comportement hydrologique de type hewlettien, avec un ruissellement qui n'apparaît qu'une fois le sol saturé. Comme la capacité de rétention en eau des sols n'y a pas fondamentalement évolué, du fait de sols épais et de changements très modérés dans l'occupation des sols, la baisse des précipitations n'a concerné que la part des pluies qui, après saturation des sols, était destinée au ruissellement et à l'écoulement ; de ce fait, les débits ont fortement baissé dans ces régions, contrairement aux zones sahéliennes. Ceci a été confirmé plus récemment par Amogu *et al.* (2010).

Les processus tels qu'on peut les résumer au Sahel sont schématisés figure 114. On a une diminution des précipitations (non notée sur la figure) ; mais surtout, un changement d'usage des sols, avec une forte diminution de la couverture végétale ; celle-ci entraîne à la fois une diminution de l'évapotranspiration (moins de plantes) et de l'infiltration (moins de systèmes racinaires des plantes),

d'où un accroissement du ruissellement, facilité par un sol de plus en plus nu. En zone exoréique (figure 114 haut), cela se traduit par un écoulement accru et une augmentation du débit des cours d'eau. En région endoréique, ce surcroît de ruissellement entraîne un gonflement des mares (figure 114 bas) ; celles-ci étant les principales zones de recharge de la nappe (Leduc *et al.*, 1997), le niveau de celle-ci s'élève. Dans les deux cas, on a donc un accroissement des ressources en eau ; mais autant, en milieu endoréique, on gagne un volume important d'eau de qualité stockée à une profondeur raisonnable et exploitable, autant dans les secteurs exoréiques, le surplus d'eau est de mauvaise qualité : l'écoulement est plus bref et intermittent, les transports solides considérablement accrus, donc une eau rendue plus difficile à mettre en valeur.

De fait cette propension accrue au ruissellement liée à la diminution généralisée de la capacité de rétention en eau des sols s'est déjà traduite, outre par une augmentation des débits, par un risque de crue accru. Les très importantes inondations de 2007 en zone soudanienne (sud Burkina, nord Bénin et nord Togo) étaient encore dans toutes les mémoires quand se sont produites, le 1^{er} septembre 2009 deux inondations mémorables et meurtrières, l'une à Ouagadougou, l'autre quelques heures ensuite à Agadès (donc touchée par un grain postérieur) ; en 2010 c'est Niamey qui voyait sa rive droite complètement submergée par la plus forte crue d'hivernage jamais enregistrée depuis 1929, début des observations (Descroix *et al.*, 2012b).



Figure 115. Photos de l'inondation historique d'hivernage d'août 2010 à Niamey (photo I. Mamadou)

Ce risque de crue, encore peu connu, a pourtant fait l'objet de publications récentes et très bien argumentées (Tschakert *et al.*, 2010, Di Baldassare *et al.* 2010). L'actualité est du reste terrible car si les conclusions de la crue de 2010 (voir figure 115) étaient en cours d'analyse (Descroix *et al.*, 2012b),

une crue encore bien plus forte, la plus abondante jamais enregistrée, a été observée le 18 août 2012 à Niamey (figure 116) (Sighomnou, 2012) ; elle a provoqué des dégâts considérables. Cette même mousson 2012 est par ailleurs remarquable par le nombre d'inondations relevées en Afrique de l'Ouest, du Sénégal au Lac Tchad. Cela démontre malheureusement que le risque de crue est en augmentation sévère ; pour cette dernière crue de 2012, les données manquent pour l'heure pour déterminer le poids de la pluie et de son intensité, ainsi que le rôle éventuel des changements d'occupation des sols. Elle montre en tout cas l'actualité de cette question et l'importance d'améliorer la connaissance sur le lien entre les états de surface et la formation du ruissellement.

L'augmentation de ces écoulements, la présence des crues qui sont de plus en plus prononcées, de plus en plus courtes et plus précoces et rapides qu'auparavant s'expliquent, en effet, par cette modification des états de surfaces.

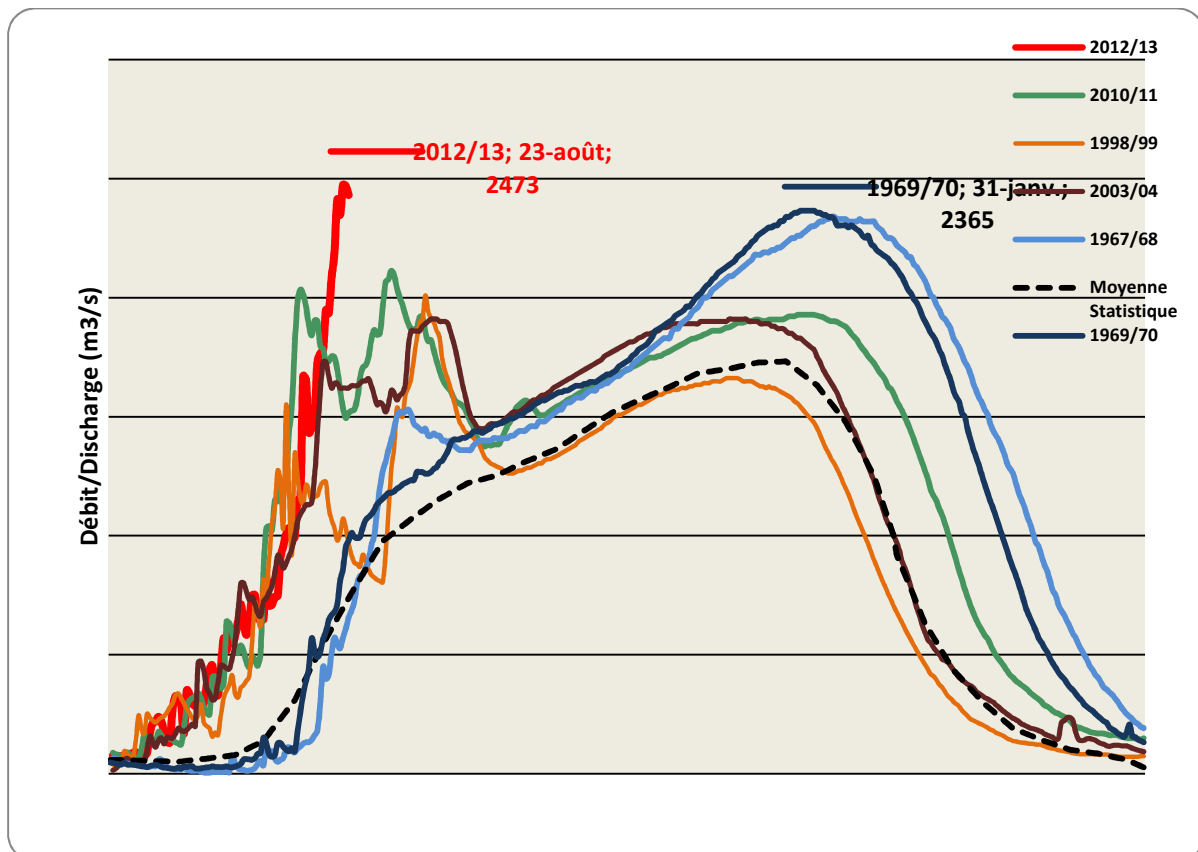


Figure 116. Evolution de la crue 2012/2013 comparativement aux plus importantes crues connues à Niamey (Sighomnou, 2012)

De cette conclusion, on peut déduire deux autres conclusions:

- D'une part, il est urgent de proposer une généralisation des ouvrages de génie éco-systémiques, dont la plupart sont bien connus, destinés à lutter contre ruissellement et érosion des sols pauvres

du Sahel. Il faut tout faire pour que l'eau reste dans les sols, dans les terroirs, dans les bassins, afin d'une part que la végétation et les cultures en tirent le plus profit, et d'autre part que cette eau évite de ruisseler en grande quantité pouvant déclencher des crues, de plus en plus fréquentes ces dernières années en dépit de la persistance du déficit pluviométrique. La Grande Muraille Verte pourrait être un élément fédérateur des pays du Sahel afin de générer une dynamique propre et interne pouvant mobiliser savoirs ancestraux et main d'œuvre surabondante dans un chantier régional destiné à améliorer le fonctionnement des éco-systèmes en cette période de forte croissance démographique ; cette croissance va persister durant au moins une génération (même si le taux de fécondité baisse, il va s'appliquer à des générations récentes très pourvues), il est donc primordial de s'atteler à un chantier qui permette à la fois d'accroître la production agropastorales et de maintenir les services fournis par les zones rurales (fourrage et bois entre autres) tout en améliorant la fertilité des sols, leur capacité à absorber l'eau des précipitations intenses du régime de mousson ;

- D'autre part, on n'a probablement pas tranché le débat entre les tenants du « re-greening » du Sahel et ceux qui au contraire sont persuadés que la désertification se poursuit. Nous constatons que malgré un certain reverdissement mesuré ces dernières années grâce à la télédétection, le ruissellement continue à augmenter. Peut être faut-il admettre que la végétation connaît bien un certain regain, aidée en cela par sa résilience et par la légère augmentation des pluies relevée depuis 1995. Mais que un certain pourcentage de la surface s'encroûte (entre 2 et 10% de la surface totale suivant les secteurs ?) ce qui est suffisant pour expliquer la forte croissance des débits et de l'occurrence des crues, mais pas suffisant pour empêcher la croissance des indices de végétation.

Références Bibliographiques

Ada L., Rockstrom J. 1993 : Diagnostic sur le système agricole du « Zarmaganda central » (Niger). Mémoire de fin d'étude INAPG, Paris, 82p.

Albergel, J., Ribstein, P., Valentin, C., 1985. L'infiltration : quels facteurs explicatifs? Analyse des résultats acquis sur 48 parcelles soumises à des simulations de pluies au Burkina Faso. Journées hydrologiques, Montpellier, ORSTOM, 24 p.

Albergel, J., 1987 : Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface_Application aux petits bassins du Burkina Faso. IAHS Publ. N° 168 12p.

Albergel, J. et Valentin, C., 1988. « Sahélisation » d'un petit bassin-versant soudanien : Kognéré-Boulsa au Burkina Faso. Colloque Nordeste-Sahel. Les Hommes face aux sécheresses, I.H.E.A.L. Paris.

Ali, A. et Lebel, T., 2009. The Sahelian standardized rainfall index revisited. *Int.J. Climatol.* 29, 1705-1714.

Amani, A. et Nguetora M. 2002 : Evidence d'une modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey. In Van Lannen, H., Demuth, S. (Eds). FRIEND 2002 regional Hydrology: bridging the gap between research and practice. Proc. Of Friend conf. Cape Town. S.A. IAHS Pub. 274: 449-456p.

Ambouta, J. M. K., 1994. Etude des facteurs de formation d'une croûte d'érosion et de ses relations avec les propriétés internes d'un sol sableux fin, Thèse -Ph-D, Université Laval, 97p.

Ambouta, J.M.K., Valentin, C. et Laverdière, M., 1996. Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. *Sécheresse*, 7 : 269-75.

Ambouta, J. M. K (1997), Définition et caractérisation des structures de végétation contractée au Sahel: cas de la brousse tigrée nigérien. In D'HERBES, J. M. & al. 1999, Fonctionnement et gestion des écosystèmes contractés sahéliens, John Libbey Eurotext, Paris, pp 41-57.

Amogu, O. 2009. La dégradation des espaces sahéliens et ses conséquences sur l'alluvionnement du fleuve Niger: méthodes expérimentales et modélisation; Ph.D. Thesis ; Université Joseph Fourier: Grenoble, France.

Amogu O., Descroix L., Yéro K.S., Le Breton E., Mamadou I., Ali A., Vischel T., Bader J.-C., Moussa I.B., Gautier E., Boubkraoui S., Belleudy P., 2010. Increasing River Flows in the Sahel?. *Water*, 2(2):170-199.

Anyamba A. et Tucker C.J. 2005: Analysis of sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003 In : *Journal of Arid Environment* 63 (2005) 596-614p.

- Audrin, M., 2005. L'érosion au Sahel: Etude de l'infiltrabilité des sols d'un bassin versant nigérien, mémoire de fin d'études, ISTOM, 76p.
- Bannari, A., Teillet, P.M., et Landry, R., 2004. Comparaison des réflectances des surfaces naturelles dans les bandes spectrales homologues des capteurs TM de Landsat-5 et TME+ de Landsat-7. *Revue Télédétection*, vol. 4, no. 3, p. 263-275.
- Béringuier, P., Dério, P., Laques, A.E., 1999. Les paysages français, coll. « Synthèse », Armand Colin, 95 p.
- Bernus, E., Fauck, R., Marchal, J. Y., 1984. Le Sahel et ses problèmes : l'apport de la recherche. *Afrique contemporaine*. La Doc. Française, 129 : 11-17.
- Beven, K. J., Kirkby, M. J., 1979. A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24 (1), 43-69.
- Bobée, C., 2011. Elaboration d'indicateurs de vulnérabilité/résilience À l'échelle d'un site à partir des séries MODIS et de données exogènes sur le milieu Cas d'étude de Dantiandou (SO Niger). Poster ECLIS.
- Boulain, N. 2004 : « Effets des facteurs climatiques et anthropiques dans l'évolution récente des écosystèmes tropicaux : modélisation spatialisée du bilan hydrique d'un petit bassin versant sahélien » Thèse de Doctorat Université Pierre et Marie Curie – Paris VI p.171.
- Bouzou Moussa, I, Faran Maiga, O, Karimou Ambouta, J-M, Sarr, B., Descroix, L, Moustapha Adamou, M., 2009. Les conséquences géomorphologiques de l'occupation des sols et des changements climatiques dans un bassin versant rural sahélien. *Sécheresse*20(1) : 1-8.
- Casenave A. et Valentin C. 1989: Les états de surfaces de la zone sahélienne, influence sur l'infiltration. ORSTOM Editions, coll. Didactiques, Paris, 229 p.
- Casenave, A. et Valentin, C., 1992. A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *Journal of Hydrology* 130, 231–249.
- Chamard, P.C. et Courel, M.F., 1979. Contribution à l'étude du Sahel voltaïque. Causes et conséquences de la dégradation du couvert végétal des dunes, Secteur de Menegou–Bidi (Département du Sahel – sous-préfecture de l'Oudalan). *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*, 39-40 : 75-90.
- Chinen, T., 1999. Recent accelerated gully erosion and its effects in dry savanna. Southwest of Niger. In *Human Response to Drastic Changes of Environments in Africa*; Faculty of Economics, Ryutsu Keizai University publication N°120: Hirahata, Ryugasaki, Japan, pp. 67-102.

Collinet, J. 1988. - Comportement hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest. Evolution des matériaux et des organisations sous simulation des pluies : Thèse de Doctorat, Géol. Pédol. Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 5 13 p. et annexes.

Courault, D., D'Herbes, J.M., Valentin, C. and Rémy, D., 1991. Etude de la variabilité spatiale du comportement hydrodynamique des sols au Niger à partir d'images satellitaires. In: *5th International Colloquium - Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, pp. 601-604. ESA, Courchevel, France.

Courel M-F., 1984 : Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse Université Paris I 407p.

D'Aquino P.. 1998. Le traitement et la gestion de l'information foncière. In : Lavigne-Delville Philippe. *Quelles politiques foncières pour l'Afrique rurale ? Réconcilier pratiques, légitimité et légalité*. Paris : Karthala, p.479-488. (Economie et développement).

Depraetere, C., 2013. Introduction à l'hydrogéomorphométrie Etude des relations entre le modelé des formes de terrain et les processus hydrologiques dans des contextes insulaires. Mémoire HDR ED de Montpellier, 165 p.

Derioz, P., 2008. L'approche paysagère : un outil polyvalent au service de l'approche opérationnelle et interdisciplinaire des problématiques environnementales. 1ères Journées scientifiques ARPEnv – Université de Nîmes – 6 juin 2008 Interdisciplinarité et gestion environnementale : Partage d'expériences autour de la psychologie environnementale, Pp.23.

Desconnets J.C., 1994 : Typologie et caractérisation hydrologique des systèmes endoréiques en milieu sahélien (degré carré de Niamey - Niger). *Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et techniques du Languedoc*. 326 p., 110 fig., 54 Tabl.

Desconnets J.C, Lebel T., Taupin J.D., 1995 : Bilan hydrologique de surface régional durant la période de suivi à long terme de HAPEX - Sahel à partir du suivi des mares temporaires sur une zone test de 600 km² dans *Hydrologie et Météorologie de Mésos - échelle dans HAPEX Sahel : Dispositif de Mesures au sol et premiers résultats*. Ed. ORSTOM, Paris. pp 69-114.

Desconnets, J-C.; Taupin, J-D.; Lebel, T.; Leduc, C. , 1997. Hydrology of the HAPEX-Sahel Central Site: surface drainage and aquifer recharge through the pool systems. *J. Hydrol.* 188-189, 155-178.

Descroix, L. et Lasserre, F., 2007. Or bleu et grands ensembles économiques : une redéfinition en cours des rapports de force interétatiques ? *La Revue Internationale et Stratégique*, 66 : 93-104.

Descroix, L., Mahé, G., Lebel, T., G., Favreau, G., Galle, S., Gautier, E., Olivry, J-C., Albergel, J., Amogu, O., Cappelaere, B., Dessouassi, R., Diedhiou, A., Le Breton, E., Mamadou, I. Sighomnou, D., 2009. Spatio-Temporal Variability of Hydrological Regimes Around the Boundaries between Sahelian

and Sudanian Areas of West Africa: A Synthesis. *Journal of Hydrology, AMMA special issue*, 375, 90-102. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.12.012.

Descroix, L., Genthon, P., Amogu, O., Sighomnou, D., Rajot, J-L., Vauclin, M., 2011a. Recent hydrological changes of Sahelian rivers: the case of the 2010 red flood of the Niger River at Niamey. Poster at AGU (American Geophysical Union) congress, San Francisco, CA, Etats Unis, déc. 2011.

Descroix, L., M. Esteves, K. SouleyYéro, J-L. Rajot, M. Malam Abdou, S. Boubkraoui, J-M. Lapetite, N. Dessay, I. Zin, O. Amogu, A. Bachir, I. Bouzou Moussa, E. Le Breton, and I. Mamadou, 2011b. Runoff evolution according to land use change in a small Sahelian catchment. *Hydrol. Earth Syst.Sci.Discuss.*,8,1569-1607,2011.

www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/8/1569/2011/doi:10.5194/hessd-8-1569-2011.

Descroix, L., Laurent, J-P., Vauclin, M., Amogu, O., Boubkraoui, S., Ibrahim, B., Galle, S., Cappelaere, B., Bousquet, S., Mamadou, I., Le Breton, E., Lebel, T., Quantin, G., Ramier, D., Boulain, N. 2012a. Experimental evidence of deep infiltration under sandy flats and gullies in the Sahel. *Journal of Hydrology* 424-425, 1-15; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.019>.

Descroix, L., Genthon, P., Amogu, O., Rajot, J-L., Sighomnou, D., Vauclin, M., 2012b. Change in Sahelian Rivers hydrograph: The case of recent red floods of the Niger River in the Niamey region. *Global Planetary Change*, 98-99, 18-30.

Deshayes, M. et Maurel, P., 1990. L'image spatiale et son contenu. in Deshayes M. (ed.) *La télédétection en agriculture = Remote sensing in agriculture* Montpellier : CIHEAM-IAMM, 1991. 154 p. (Options Méditerranéennes : Options Méditerranéennes, Sér. A I n°4, 1990 - la Télédétection en Agriculture, pp 12-20.

Desjardins, R., 2000. La télédétection: Perspective analytique ESTEM (Editions scientifiques, techniques et médicales), 2000 - 226 pages.

De Wispelaere G.. 1990. Dynamique de la désertification au Sahel du Burkina Faso : cartographie de l'évolution et recherches méthodologiques sur les applications de la télédétection. Thèse de docteur-ingénieur : Géologie appliquée. Paris : CNAM, 546 p.

D'Herbès, J.M. et Valentin, C., 1997. Land surface conditions of the Niamey region: ecological and hydrological implications *Journal of Hydrology* 188-189, 18-42.

Di Baldassarre, G., Montanari, A., Lins, H., Koutsoyiannis, D., Brandimarte, L., and Blöschl, G., 2010. Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation. *Geophysical Research Letters*, vol. 37, L22402, doi:10.1029/2010GL045467, 2010.

Diello et al, 2006 : Méthodologie et application d'une démarche de modélisation hydrologique prenant en compte l'évolution des états de surface en milieu sahélien d'Afrique de l'ouest. *Climate Variability*

and Change—Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006), IAHS Publ. 308, 2006. pp.8.

Djaby, B. 2010, Modélisation spatiale des flux organiques et minéraux assurant la productivité durable des systèmes culture-élevage dans le sahel nigérien. Thèse, Université de Liège, 388 p.

Dubreuil, P., Chaperon, P. Guiscafré, J. & Herbaud, J. ,1972. *Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux: années 1951-1969*. Orstom, Paris.

Dubreuil V., Laques A.-n, Nédélec V., Arvor D. et Gurgel H., 2008. Paysages et fronts pionniers amazoniens sous le regard des satellites : l'exemple du Mato Grosso, *Espace géographique* 1, Tome 37, p. 57-74.

Eklundh, L. and Olsson, L., 2003. Vegetation index trends for the African Sahel 1982–1999. *Geophysical Research Letters*, Vol..30, N°. 8, 1430, doi:10.1029/2002GL016772, 2003.

Escadafal, R., 2012. Observation à long terme des environnements arides par satellites : retour d'expériences et perspectives. *Options méditerranéennes*, N° 68 Pp.41-70.

Esteves, M. et Lenoir, F., 1994. Cartographie d'unités hydrologiques homogènes et modélisation hydrologiques. Exemple de l'expérience HAPEX - SAHEL. In HOEPFFNER M. LEBEL T.-MONTENY. B.- Interactions SURFACES CONTINENTALE /ATMOSPHERE. L'expérience HAPEX-SAHHEL, Actes des XIème journées hydrologiques Montpellier, ORSTOM, pp4463-473.

Esteves, M., Lapetite, J.M., 2003. A Multi-scale approach of runoff generation in a Sahelian gully catchment: a case study in Niger. *Catena* 2003, 50, 255–271.

Faran, Maiga, O., 2000. La dynamique actuelle dans le Zarmaganda. Recherches géomorphologiques dans l'Ouest du Niger. Thèse de 3^{ème} cycle, UCAd, Dakar, 366 p.

Faran Maiga, O. 2004. Erosion éolienne dans le Zarmaganda, *Revue de Géographie Alpine* tome 92 n°1, mars 2004 – Grenoble – France.

Faure, L. 1986. Changements globaux en Afrique durant le quaternaire: passé, présent, futur : Dakar 21-28 avril 1986 ; Faure, H., Diop, E.S., Eds [*Volume 197 de Travaux et documents de l'ORSTOM ;*](#) Éditions de l'ORSTOM, 1986.

Favreau, G.. 1996. Modélisation locale de la recharge de la nappe phréatique sur le site de Wankama (Sud Ouest du Niger). Mémoire de DEA, Université Paris Sud Orsay, 93 p.

Favreau, G. , 2000. Characterization and modelling of a rising water table in the Sahel: Dynamic and geochemistry of the Dantiandou kori natural hollow aquifer (southwest Niger) (in French), Ph.D. thesis, 258 pp., Univ. Paris XI, Orsay, France.

- Favreau G., Leduc C., Marlin C., Dray M., Taupin J.-D., Massault M., Le Gal La Salle C., Babic M., 2002. Estimate of recharge of a rising water table in semiarid Niger from 3H and 14C modeling. *Ground Water*, 40, 2, 144-151.
- Fensholt, R., Rasmussen, K., Nielsen, T.T., Mbow, C., 2009. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends — Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, TerraMODIS and SPOT VGT data. *Remote Sensing of Environment* 113, 1886–1898. doi:10.1016/j.rse.2009.04.004.
- Fensholt, R. & Rasmussen, K., 2011. Analysis of trends in the Sahelian ‘rain-use efficiency’ using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data. *Remote Sensing of Environment* 115, 438-451.
- Galle, S., Ehrmann, M., Peugeot, C., 1999. Water balance in a banded vegetation pattern: A case study of tiger bush in western Niger. *Catena*, 37, 1-2, 197-216. [http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162\(98\)90060-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162(98)90060-1).
- Gardelle, J., Hiernaux, P., Kergoat, L. & Grippa, M., 2010. Less rain, more water in ponds: a remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel. (Gourma region, Mali) *Hydro. Earth Syst. Sci.*, 14, 309–324.
- Gavaud, M., 1968. Les sols bien drainés sur matériaux sableux du Niger: Essai de systématique régionale. Cahiers ORSTOM, pédologie, - : 277-307.
- Gavaud, M., 1971 -. Les sols “Hardé » du Nord-Cameroun. Mise au point bibliographique. ORSTOM, Bull. de liaison du thème B, n° 2, pp. 55- 88.
- Gavaud, M., 1977. Les grands traits de la pédogenèse au Niger méridional. Travaux et documents de l'ORSTOM, Paris, France, 102 p.
- Girard, C.M. et Girard, M.C., 2010. Traitement des données de télédétection ; Environnement et ressources naturelles ; Dunod, Paris, 553 p.
- Govaerts, Y.M.; Lattanzio, A. , 2008. Estimation of surface albedo increase during the eighties Sahel drought from Meteosat observations. *Global and Planetary Change*, 64, 139-145.
- Greigert, J., 1966. Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Iullemeden (Afrique occidentale). Ministère des Travaux publics, des Transports, des Mines et de l'Urbanisme de la république du Niger. Direction des mines et de la géologie, 2. BRGM éd., 229 p. Paris, France.
- Greigert, J. et R. Pougnet, 1967: Essai de description des formations géologiques de la République du Niger. Editions du Brgm, Paris, 273 pp.
- Guengant, J-P., Banoin, M., 2003. Dynamique des populations, disponibilités en terres et adaptation des régimes fonciers: le Niger. Pub.FAO-CICRED, 142 p.

Hein L. et De Ridder, N. 2006. Desertification in the Sahel: a reinterpretation. *Global change Biology* (2006) 12, 751-758p.

Hien, F., Compaoré, J-A., Coulibaly-Somé, O., 1996. La dynamique de la dégradation des sols dans le bassin du Nakambé : une étude diachronique dans le secteur des forêts classées de Bissiga-Nakambé au Burkina Faso. in : Escadafal Richard (ed.), Mulders M.A. (ed.), Thiombiano L. (ed.) Surveillance des sols dans l'environnement par télédétection et systèmes d'information géographiques = Monitoring soils in the environment with remote sensing and GIS. Paris: ORSTOM, 1996, p. 523-530. (Colloques et Séminaires) ISBN 2-7099-1331-3.

Herrmann, S.M.; Anyamba, A.; Tucker, C.J., 2005. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change*, 15, 394-404.

Hiernaux P.H.Y. et Ayantunde A. 2004. The Fakara: a semi-arid agro-ecosystem under stress. Report of research activities. First phase (July 2002-June 2004) of the DMP-GEF programme (GEF/2711-02-4516) International Livestock Research Institute (ILRI). 94 p.

Hiernaux, P., Diarra, L., Trichon, V., Mougin, E., Soumaguel, N., Baup, F., 2009a. Woody plant population dynamics in response to climate changes from 1984 to 2006 in Sahel (Gourma, Mali). . *J. Hydrol.*, 375, 103-113.

Hiernaux, P., Ayantunde, A., Kalilou, A., Mougin, E., Gérard, B., Baup, F., Grippa, M., Djaby, B., 2009b. Trends in productivity of crops, fallow and rangelands in Southwestern Niger: impact of land use. Management and variable rainfalls. *J. Hydrol.*, 375, 65-77.

Hillion, A., Boucher, J-M., Roux, C., 1989. le traitement des images de télédétection : aperçus et perspectives. Éd. AUPELF-UREF. John LibbeyEurotext. Paris 0 1989. p. 97-110.

Hountondji, Y-C., Ozer, P., et Nicolas, J., 2004 : Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection a basse résolution au Niger, *Cybergeo : Revue européenne de géographie*, N° 291, 10 novembre 2004 pp.18.

Huber, S., Fensholt, R. and Rasmussen, K., 2011. Water availability as the driver of vegetation dynamics in the African Sahel from 1982 to 2007. *Global and Planetary Change* 76, 186-195.

Hulme, M., 2001. Climatic perspectives on Sahelian desiccation: 1973-1998. *Global Environmental Change* 11, 19-29. [doi:10.1016/S0959-3780\(00\)00042-X](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(00)00042-X).

Kaptue, T.A.T., Roujean, J.-L. and Faroux, S. (2010) ECOCLIMAP-II: An ecosystem classification and land surface parameters database of Western Africa at 1 km resolution for the African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA) project. *Remote Sensing of Environment*, **114**, 961-976.

Kergoat, L.; Hiernaux, P.; Baup, F.; Boulain, N.; Cappelaere, B.; Cohard, J.-M.; Descroix, L.; Galle, S.; Guilbert, S.; Guichard, F.; Grippa, M.; Lebel, T.; Lloyd, C.; Lohou, F.; Mougin, E.; Otlé, C.;

Ramier, D.; De Rosnay, P.; Serca, D.; Samain, O.; Saut-Picart, S.; Taylor, C.; Timouk, F.; Trichon, V.; Zribi, 2007. M. Land surface in AMMA: extending ecosystem. Energy and water balance studies in space and time is some-times surprising. In *Proceedings of the 2nd International Conference of AMMA Program*, Karlsruhe, Germany, 26–30 Nov. 2007; Genau, I., Van den Acker, E., Redelsperger, J-L., , Eds.; AMMA Pub, Karlsruhe, Germany.

Kilian, C., 1931. Des principaux complexes continentaux du Sahara. CR. Somm. Soc. Géol. De France, 9, 109-111.

Laques, A.E., 2009. Paysage, image et observatoire. Lire et diagnostiquer les territoires amazoniens. Mémoire de recherche inédit. Pp.274.

Larwanou, M., Abdoulaye, M., Reij, C., 2006. *Etude de la régénération naturelle assistée dans la région de Zinder (Niger)*; International Resources Group, USAID: Washington, DC, USA.

Leblanc, M., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S., Loireau, M., Cappelaere, B., 2008. Land clearance and hydrological change in the Sahel : SW Niger. *Global and Planetary Change*, 61 (3), p.135-150. [doi:10.1016/j.gloplacha.2007.08.011](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.08.011).

Lebel, T.; Ali, A., 2009. [Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime \(1990–2007\)](#). *J.Hydrol.*375, 90-102.

Le Breton, E. 2004 : Etude de l'érosion hydrique dans un bassin versant du Sahel. Mémoire de Maîtrise de Géographie. Université Paris 8. Pp.77.

Le Breton, E..2005 : Ensablement des bas-fonds sahélien: étude des transferts sédimentaires au fleuve Niger dans le secteur moyen Niger –Mali ; Niger ; Bénin, DEA de géomorphologie de l'université Paris 7-Denis –Diderot, 74p.

Le Breton, E., 2012 : « Réponses hydrologiques et géomorphologiques aux changements environnementaux au Sahel nigérien ». Thèse de géographie en cotutelle Université Paris 1 Panthéon Sorbonne et Université Abdou Moumouni de Niamey, 210 p.

Leduc C. et Loireau M. 1997. Fluctuations piézométriques et évolution du couvert végétal en zone sahélienne (Sud-ouest du Niger). In Sustainability of <Water Resaources under Increasing Uncertainty. Proc. Rabat Symposium. IAHS, 240: 193-200.

Leduc, C., Bromley, J., Shroeter, P., 1997. Water table fluctuation and recharge in semi-arid climate: some results of the HAPEX Sahel hydrodynamic survey (Niger). *J. Hydrol.* 188-189, 123-138.

Leduc, C., Favreau, G. et Shroeter, P., 2001. Long-term rise in a Sahelian water-table: the Continental Terminal in South West Niger. *Journal of Hydrology*, 243:43-54.

L'homme, S., He, D.-C., Morin, D., 2004. Évaluation de la qualité d'une image IKONOS pour l'identification de bâti en milieu urbain. *Téledétection*, 2003, vol. 3, n° 5, p. 457–466.

- Lienou, G. , Mahé, G., Paturel, J-E., Servat, E., Sighomnou, D., Ekodeck, G-E, Dezetter, A., et Dieulin, C.. 2008. Evolution des régimes hydrologiques en région équatoriale Camerounaise: un impact de la variabilité climatique en Afrique équatoriale. *Hydrological Sciences Journal*. 24p.
- Loireau, M. 1993. Dynamique d'un paysage sahélien au Niger. Bilan paysagé entre la production primaire et l'utilisation des ressources par les groupes sociaux. Caractérisation de l'espace et des ressources à l'aide de la télédétection spatiale haute résolution. Mémoire de DEA, Université Paul Valéry, Montpellier.
- Loireau M. 1998 : Espaces – Ressources – Usages : Spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien. Thèse Université Montpellier III – Paul Valéry 411p.
- Loireau, M. and D'Herbès, J.M. , 1996. Cartographie des unités d'occupation des terres du super site central est (Banizoumbou) du programme Hapex-Sahel. In: *Interactions surface continentale/atmosphère: l'expérience HAPEX-Sahel. Xème journées hydrologiques* (Eds M. Hoepffner, T. Lebel and B. Monteny), pp. 105-122. ORSTOM, Montpellier.
- Luxereau, A. et Roussel, B., 2009. L'arbre au Sahel : éléments pour la chronique d'une non-disparition ; présentation de l'arbre dans le contexte GMV, réunion GMV, Dakar, février 2009.
- Machens, E., 1967: Notice explicative sur la carte géologique du Niger Occidental à l'échelle 1/200000. Editions du Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Paris XXVe.35p.
- Mahamane, L.E. et Montagne, P. 1997. Les grands axes stratégiques du projet Energie II. In : D'Herbès, J-M., Ambouta, J.M.K. et peltier, R.: Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés au Sahel, pp 155-167.
- Mahamane, A., 2009. Evolution of land cover through the ROSELT Dantiandou observatory (Niger). GEO Capacity Building Committee– 9th meeting, 27 – 28 April 2009, Athens, Greece.
- Mahé, G., Dray A., Paturel J.E., Crès A., Koné F., Manga M., Crès F.N., Djoukam J., Maïga A.H, Ouédraogo M., Conway D., Servat E., 2002. Climatic and anthropogenic impacts on the flow regime of the Nakambe River in Burkina.In : FRIEND 2002 Regional Hydrology : Bridging the gap between research and practice (H. Van Lannen and S. Demuth Sci. Eds.), Proc. FriendConf., Cape Town, South Africa, 2002, IAHS Pub. n° 274, 69-76.
- Mahé, G., Leduc, C., Amani, A., Paturel, J-E, Girard, S., Servat, E., et Dezetter, A., 2003. Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau. In : Hydrology of the Mediterranean and semi-arid regions (Servat E., Najem W., Leduc C., Ahmed S., Sci. Eds). Proceedings of the International Conference, Montpellier, France, 1 – 4 avril 2003. IAHS Publication n°278, 215-222.

- Mahé, G., L'Hôte, Y., 2004. Sahel: une sécheresse persistante et un environnement profondément modifié. *La Météorologie* 8e série, 44, 2-3.
- Mahé, G., 2006. The impacts of land use/land cover change and climate variability on the hydrology of the Sahel. In: *Water Resource Variability: Processes, Analyses and Impacts. Proc. of the 5th FRIEND World Conference*, La Havana, Cuba, IAHS Publ. 308, 679-684.
- Mahé, G. et Paturel, J-E., 2009. 1896-2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian rivers. *C.R. Geosciences*, 341, 538-546.
- Mamadou, I., 2012. la dynamique des kouris et l'ensablement de leur lit et de celui du fleuve Niger dans la région de Niamey. Thèse de géographie en cotutelle, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne et Université Abdou Moumouni de Niamey, 260 p.
- Masse, D., 2007. Changements d'usage des terres dans les agro-systèmes d'Afrique sub-saharienne. Propriétés des sols et dynamique des matières organiques. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches Institut National Polytechnique de Toulouse Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse.
- Massuel S. 2005 : Evolution récente de la ressource en eau consécutive aux changements climatiques et environnementaux du Sud-Ouest Niger. Modélisation des eaux de surface et souterraines du bassin du kori de Dantiandou sur la période 1992-2003. Thèse sciences, Université Montpellier II 220p.
- Massuel, S., Favreau, G., Desclotres, M., Le Troquer, Y., Albouy, Y., Cappelaere, B., 2006. Deep infiltration through a sandy alluvial fan in semiarid Niger inferred from electrical conductivity survey, vadose zone chemistry and hydrological modelling. *Catena* 67 (2006) 105 – 118.
- Mougenot B. et Cailleau D., 1996. Identification par télédétection des sols dégradés d'un domaine sahélien au Niger. In : Escadafal Richard (ed.), Mulders M.A. (ed.), Thiombiano L. (ed.) *Surveillance des sols dans l'environnement par télédétection et systèmes d'information géographiques = Monitoring soils in the environment with remote sensing and GIS*. Paris : ORSTOM, p. 169-179. (Colloques et Séminaires).
- Mougin, E., 2009. Vegetation dynamics over West-Africa during AMMA. III Conférence AMMA Ouagadougou, Burkina Faso, juillet 2009.
- Mounirou, A., 2012. Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso : quantification et transposition des données, Thèse de doctorat en sciences Montpellier/2iE Ouagadougou, 250 p.
- Nageleisen, 2004. L'analyse paysagère par la photographie au sol : du paysage visible au paysage vu. Laboratoire ThéMA Besançon Pp.5.

- Nicholson, S.E., Tucker, C.J. et Ba, M.B., 1998. Desertification, Drought, and Surface Vegetation: An Example from the West African Sahel. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79 (5), 815-829.
- Nicholson, S.E., 2005. On the question of the “recovery” of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environments*, 63, 615–641. doi:10.1016/j.jaridenv.2005.03.004.
- Nouvelot, J-F., 1993, Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique Tropicale et Equatoriale CIEH-ORSTM Ed. 540 p.
- Olivry, J-C., 2002. *Synthèse des connaissances hydrologiques et potentiel en ressources en eau du fleuve Niger*. World Bank, Niger Basin Authority, provisional report, 160 p, Niamey.
- Olsson, L., Eklundh, L., Ardo, J., 2005. A recent greening of the Sahel, _ trends, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environments*, 63, 556-566.
- Ottlé, C., C. André, M. Zribi, S. Saux-Picart, R. Lacaze, N. Boulain, B. Cappelaere, J.L. Rajot, L. Descroix, 2007. Land cover evolution over the Niger Supersite between 1986 and 2005 from SPOT-HRV data, 2nd International AMMA Conference, Karlsruhe, 26-30 November.
- Ozer, P., Hountondji, Y.-C., Niang, A., Karimoune, S., Manzo, O. L., Salmon, M., 2010. Désertification au Sahel : historique et perspectives, *BSGL*, 54, 69-84, ISSN: 0770-757.
- PDC, 2009. Plan de développement communal de Dantiandou (PDC, février 2009).
- Pedro, G., Kilian, J., Pieri, C., Moreau, R., Dubreuil, P., Le Goupil, J-C et Eldin, M., 1987. Sols et eaux. Acquis et perspectives de la recherche agronomique française en zone intertropicale. ORSTOM/Banque Mondiale, 184p.
- Peugeot, C., 1995. Influence de l’encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d’un versant sahélien. Thèse, Université de Grenoble, France.
- Peugeot C., Esteves M., Galle S., Rajot J-L., Vandervaere J.P., 1997. Runoff generation processes : results and analysis of field data collected at the East Central Supersite of the HAPEX-Sahel experiment. In : Goutorbe J.P. (ed.), Dolman A.J. (ed.), Gash J.H.C. (ed.), Kerr Y.H. (ed.), Lebel Thierry (ed.), Prince S.D. (ed.), Stricker J.N.M. (ed.) HAPEX-Sahel. *Journal of Hydrology*, 188-189 (1-4), p. 179-202. ISSN 0022-1694.
- Peugeot C., 2003 : Les paradoxes de la sécheresse, Sciences au Sud- Le journal de l’IRD - n° 18 - janvier/février 2003.
- Prince, S.D., Brown de Colstoun, E., Kravitz, L., 1998. Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification. *Global Change Biology*, 4, 359-374.
- Prince, S.D., Wessels, K.J., Tucker, C.J. & Nicholson, S.E., 2007. Desertification in the Sahel: a reinterpretation of a reinterpretation. *Global Change Biology* 13, 1308–1313.

- Rajot, J.L., Esteves, M., 1994. Cartographie des états de surface de petits bassins de la région de Niamey. Note. Orstom Niamey, 10 p. 3 cartes.
- Rasmussen, K.; Bjarne, F.; Madsen, J-E. , 2001. Desertification in reverse? Observations from northern Burkina Faso. *Global Environmental Change*, 11, 271-282.
- Raynaud, C. 2001. Societies and nature in the Sahel: ecological diversity and social dynamics. *Global Environmental Change* 11, 9-18.
- Reij, C., Tappan, G., Belemvire, A., 2005. Changing land management practices and vegetation on the Central Plateau of Burkina Faso (1968–2002). *Journal of Arid Environments* 63, 642–659.
- Reij, C.; Tappan, G.; Smale, M. , 2009. *Agroenvironmental Transformation in the Sahel, Another Kind of “Green Revolution”*; IFPRI Discussion Paper 00914, 2020 vision initiative; IFPRI Pub, Washington, the USA.
- RGAC, 2005/2008. Recensement général annuel du cheptel annuel, 2005/2008 : Source : Direction de l'Elevage, Niamey, Niger.
- RGPH, 1988 : Recensement général de la population et de l’habitat, 1988, INS (Institut National de la Statistique).
- RGPH, 2001 : Recensement général de la population et de l’habitat, 2001, INS (Institut National de la Statistique).
- RGPH, 2010 : Recensement général de la population et de l’habitat, 2010, INS (Institut National de la Statistique).
- Richard, J-F., 1989. Le paysage un nouveau langage pour l’étude des milieux tropicaux. Eds de l'ORSTOM Pp. 210.
- Rodier, J., 1969. Hydrologie des régions arides, semi-arides et tropicales. Paris : ENGREF, 59 p. multigr. Conférence sur l'Hydrologie des Régions Arides, Semi-arides et Tropicales, Paris (FRA), 59 p. 1969/04-05.
- <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:33420>
- Rodriguez-Iturbe, I. & J. B. Valdes, 1979. The geomorphologic structure of hydrologic response. *Wat. Resour. Res.* 15(6): 1409-1420.
- Roose, E. 1974 : Contribution à l’étude de l’influence de la sécheresse sur l’évolution actuelle de certains sols ferrugineux tropicaux en zone sahélienne, rapport Orstom-Abidjan, 17 p.
- Roose, E., 1983 : Ruissellement et érosion avant et après défrichement en fonction du type de culture en Afrique occidentale In : Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., uol. XX, no 4, 1983: 327-339.

- Ruelland, D., Tribotte, A., Puech, C. and Dieulin, C., 2011. Comparison of methods for LUCC monitoring over 50 years from aerial photographs and satellite images in a Sahelian catchment. *Intl. Journal of Rem. Sensing*. 32 (6): 1747-1777.
- Saux-Picart, S., Otle, C., Decharme, B., Andre, C., Zribi, M., Perrier, A., Coudert, B., Boulain, N., Cappelaere, B., Descroix, L. and Ramier, D., 2009. Water and energy budgets simulation over the AMMA-Niger super-site spatially constrained with remote sensing data. *Journal of Hydrology*, 375, 287-295.
- Seaquist, J.W., Olsson, L., Ardo, J. and Eklundh, L. (2006) Broad-scale increase in NPP quantified for the African Sahel, 1982-1999. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 5115-5122.
- Serpantié, G., 1986 - L'élevage dans les systèmes agropastoraux soudano-sahéliens ; problématique du changement technique in : *Technologies appropriées pour les paysans des zones semi-arides de l'Afrique de l'Ouest*. Université de Purdue, USA H.Noh et J.G Nagy (Eds sc), 333 : 346.
- Sheeren, D., and Lacombe, J-P. 2009. Extraction des fragments boisés en milieu agricole à partir de photographies aériennes : proposition d'une approche de classification hybride pixel/objet, *Journées Informations Géographiques et Observation de la Terre (JIGOT'2009)*, Novembre 2009, Toulouse.
- Sighomnou, D., 2012. Evènements de crues du mois d'août 2012 sur le Niger. Note du projet GIRE 2, ABN, Niamey, Niger, 8 p.
- SouleyYéro, K. 2007. Genèse et morphodynamique des bas-fonds sahélien : caractérisation du bas-fonds de Boubon. Mémoire de Maîtrise de Géographie, université Abdou Moumouni de Niamey. 92p.
- SouleyYéro, K., 2008 : L'évolution de l'occupation des sols à l'échelle des bassins versants de Wankama et Tondi Kiboro : Conséquences sur les débits ; Mémoire de DEA, université Abdou Moumouni de Niamey, 80 p.
- SouleyYéro, K., Dessay, N., Descroix, L., 2010. Rapport et base de données sur l'historique de l'occupation des sols. Livrable ANR ECLIS, 54 p.
- Tarchiani, V. et Di Vecchia, A., 2006 Monitoring drylands ecosystem dynamics for sustainable development policies : the Keita experience. International Scientific Conference on Desertification and Drylands Research Commemorating 50 Years of Drylands Research Tunis, Tunisia 19 - 21 June 2006.
- Tschakert, P., Sagoe, R., Ofori-Darko, G. and Nii-Codjoe, S., 2010. Floods in the Sahel: an analysis of anomalies, memory and anticipatory learning. *Climatic Change*, 103: 471-502.
- Valentin, C. et Bresson, L-M., 1992. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55, 225-245.
- Valentin, C., 1994. Sécheresse et érosion au Sahel. *Sécheresse*, 5 (3), 191-198.

Valentin. C. & Ruiz Figueroa, J.F. (1985) - The effect of kinetic energy and water application rate on the development of crusts in a fine sandy loam soil using sprinkler irrigation and rainfall simulation. *Rev. int. de micromorphologie des sols*, Paris.

Vuillaume, G., 1968. Premiers résultats d'une étude analytique du ruissellement et de l'érosion en zone sahélienne : bassin représentatif de Kountkouzout (Niger). Cahiers ORSTOM.Série Hydrologie, 1968, 5 (2), p. 33-56. ISSN 0008-0381.

Yamoah, C. F., A. Bationo, B. Shapiro, and S. Koala. 2002. Trend and stability analyses of millet yields treated with fertilizer and crop residues in the Sahel. *Field Crops Research* 75:53-62.

Zeng, N., Neelin, J., Lau, K.M., Tucker, C., 1999. Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science* 286, 1537–1540.

ANNEXES

Annexe 1:

Tableau 18. Matrice de confusion de la zone non plateau 2007

Parcelle de contrôle (%)

Classe	1	2	3	4	5	6	Total
1	99.05	13.80	11.18	0.39	0.00	0.04	23.14
2	0.00	84.75	0.42	0.00	0.27	8.06	17.35
3	0.00	0.30	88.38	5.24	0.00	0.00	17.19
4	0.00	0.00	0.00	93.01	0.00	0.00	14.19
5	0.00	0.00	0.00	1.27	99.73	0.00	18.34
6	0.95	1.14	0.02	0.09	0.00	91.89	9.79
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

1= Culture, 2= Jachère ancienne, 3= Jachère récente, 4= Sol nu meuble, 5= Sol dégradé, 6=Fourré, arbre isolé, ripisylve

Tableau 19. Erreur de commission et d'omission pour la classification de 2007 en zone non plateau

Classes	Erreurs Commission (%)	Erreurs Omission (%)	Précision pour le producteur (%)	Précision pour l'utilisateur (%)
1	20.75	0.95	99.05	79.25
2	5.47	15.25	84.75	94.53
3	5.00	11.62	88.38	95.00
4	0.00	6.99	93.01	100.00
5	1.06	0.27	99.73	98.94
6	4.25	8.11	91.89	95.75

Tableau 20. Matrice de confusion de la zone plateau en 2007

Parcelle de contrôle (%)

Classification	7	8	9	Total
7	98.49	0.09	0.00	29.64
8	0.45	99.54	5.90	41.77
9	1.06	0.37	94.10	28.59
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

7=Végétation contractée régulière, 8= Végétation contractée régulière dégradée, 9=Cuirasse ferrugineuse

Tableau 21. Erreur de commission et d'omission pour la classification de 2007 plateau

Classification	Erreur d'excédents (commission)	Erreur de déficits (omission)	Précision pour le réalisateur	Précision pour l'utilisateur
7	0.12	1.51	98.49	99.88
8	4.55	0.46	99.54	95.45
9	1.63	5.90	94.10	98.37

Tableau 22. Matrice de confusion de la zone non plateau 2010

Classe	Parcelle de contrôle (%)						Total
	1	2	3	4	5	6	
1	99,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	41,96
2	0,00	99,97	0,06	58,49	0,00	10,14	26,86
3	0,16	0,03	99,94	0,00	0,00	6,24	19,30
4	0,00	0,00	0,00	41,19	0,00	0,00	5,52
5	0,00	0,00	0,00	0,32	100,00	0,39	2,46
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	82,57	3,82
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

1= Culture, 2= Jachère ancienne, 3= Jachère récente, 4= Sol nu meuble, 5= Sol dégradé, 6=Fourré, arbre isolé, ripisylve

Tableau 23. Matrice de confusion de la zone plateau 2010

Classification	Parcelle de contrôle (%)			Total
	1	2	3	
7	96,12	0,00	0,00	16,70
8	0,00	96,77	0,00	34,20
9	3,88	3,23	100,00	49,10
Total	100,00	100,00	100,00	100,00

7=Végétation contractée régulière, 8= Végétation contractée régulière dégradée, 9=Cuirasse ferrugineuse

Tableau 24. Erreur de commission et d'omission pour la classification de 2010 en zone plateau et non plateau

Class	Erreur d'excédents (%) (commission)	Erreur de déficits (%) (omission)	Précision pour le producteur (%)	Précision pour l'utilisateur (%)
1	0.07	0.16	99.84	99.93
2	30.97	0.03	99.97	69.03
3	1.50	0.06	99.94	98.50
4	0.00	58.81	41.19	100.00
5	2.44	0.00	100.00	97.56
6	0.00	17.43	82.57	100.00

Class	Erreur d'excédents (%) (commission)	Erreur de déficits (%) (omission)	Précision pour le producteur (%)	Précision pour l'utilisateur (%)
7	0.00	3.88	96.12	100.00
8	0.00	3.23	96.77	100.00
9	3.70	0.00	100.00	96.30

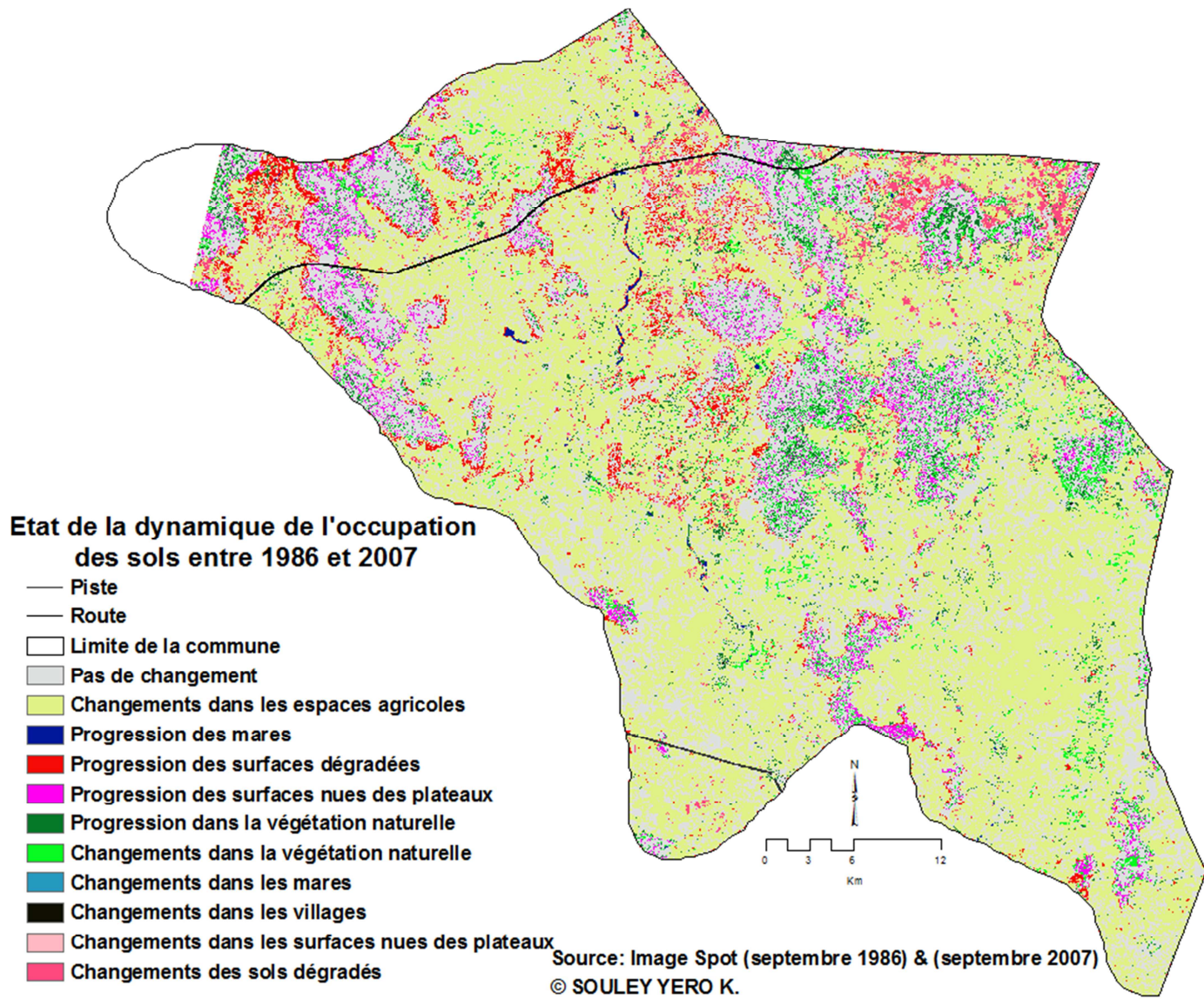


Figure 117. Carte de changements entre 1986 et 2007

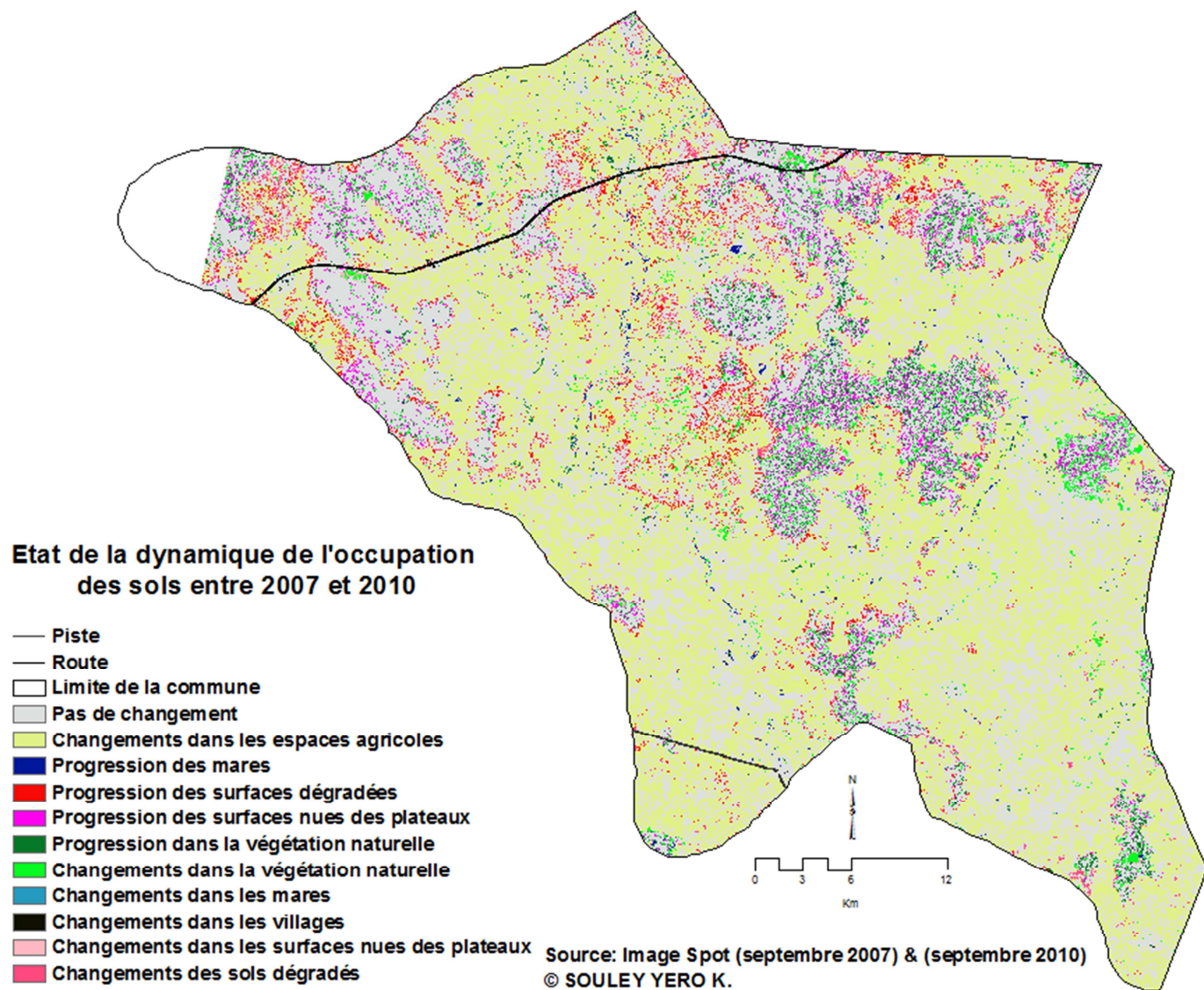


Figure 118. Carte de changements entre 2007 et 2010

Tableau 25. Evolution des occupations des sols 1986 et 2007

Classe thématique	Etat de la dynamique entre 1986 et 2007	
	(ha)	(%)
Pas de changement	27828,04	36,04
Changements dans les espaces agricoles	38235,28	49,52
Augmentation des mares	116,52	0,15
Augmentation des surfaces dégradées	2399,12	3,11
Augmentation des surfaces nues des plateaux	2123,24	2,75
Progression dans la végétation naturelle	2379,8	3,08
Modification dans la végétation naturelle	2303,36	2,98
Changements dans les mares	3,64	0,00
Changements dans les villages	10,76	0,01
Changements dans les surfaces nues des plateaux	22,32	0,03
Conversion des sols dégradés	1793,36	2,32

Tableau 26. Evolution des occupations des sols 2007 et 2010

Classe thématique	Etat de la dynamique entre 2007 et 2010	
	(ha)	(%)
Pas de changement	36900,64	47,77
Changements dans les espaces agricoles	32024	41,45
Augmentation des mares	188,76	0,24
Augmentation des surfaces dégradées	1802,6	2,33
Augmentation des surfaces nues des plateaux	1610,08	2,08
Progression dans la végétation naturelle	1582,08	2,05
Modification dans la végétation naturelle	1747,56	2,26
Changements dans les mares	9,04	0,01
Changements dans les villages	15,84	0,02
Changements dans les surfaces nues des plateaux	67,76	0,09
Conversion des sols dégradés	1303,08	1,69

Annexe 2: Cartes d'occupation des sols couvrant toute la commune de Dantiandou pour 2007 et 2010

