



HAL
open science

Apport de l'analyse spatiale à l'étude du rôle des dépressions dans la dynamique hydrologique d'un bassin versant en milieu nord-sahélien : le cas du lac Mâle (Brakna, Mauritanie)

Jean Gassani

► **To cite this version:**

Jean Gassani. Apport de l'analyse spatiale à l'étude du rôle des dépressions dans la dynamique hydrologique d'un bassin versant en milieu nord-sahélien : le cas du lac Mâle (Brakna, Mauritanie). Géographie. Université d'Angers, 2008. Français. NNT : . tel-00348007

HAL Id: tel-00348007

<https://theses.hal.science/tel-00348007>

Submitted on 17 Dec 2008

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.

APPORT DE L'ANALYSE SPATIALE A L'ETUDE DU ROLE
DES DEPRESSIONS DANS LA DYNAMIQUE HYDROLOGIQUE
D'UN BASSIN VERSANT EN MILIEU NORD-SAHELIEN.
Le cas du lac de Mâle (Brakna, Mauritanie)

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Géographie et Sciences de L'Environnement

ÉCOLE DOCTORALE D'ANGERS

Présentée et soutenue publiquement

le : 7 mars 2008

à : ANGERS

par : Jean GASSANI

Devant le jury ci-dessous :

M. Daniel DELAHAYE, professeur des universités, Université de Caen, rapporteur.
M. Jean DUCHESNE, professeur de l'enseignement supérieur agronomique, INH, examinateur.
M. Gérard MOGUEDET, professeur des universités, Université d'Angers, Directeur de thèse.
M. Pierre OZER, professeur des universités, Université de Liège, Directeur de thèse.
M. Dominique PERRIN, professeur des universités, Université de Gembloux, rapporteur.
M. Aude-Nucia TAIBI, maître de conférences, Université d'Angers, examinateur.

Thèse en cotutelle : Gérard MOGUEDET et Pierre OZER (Universités d'Angers et de Liège)

Laboratoire Paysages et biodiversité
UFR Sciences
2 Bd Lavoisier
49045 ANGERS cedex 01

Département des sciences
et gestion de l'environnement
Université de Liège, Av de Longwy 185
B-6700 ARLON-BELGIQUE

Je tiens à remercier tout d'abord mes co-directeurs de thèse, tout d'abord Gérard Moguedet, vice-président de l'Université d'Angers qui a été un soutien technique et méthodologique durant la durée de ma recherche. Je remercie également mon second co-directeur, Pierre Ozer de l'Université de Liège qui m'a apporté son soutien avec constance dans l'ensemble des étapes d'une thèse.

Je voudrais témoigner ma profonde reconnaissance au Professeur Jean Duchesne qui a suivi ma thèse au jour le jour, me permettant de disposer des moyens techniques et conceptuels nécessaires à la réalisation d'une thèse jouxtant les thématiques de l'hydrologie. Son aide précieuse à la fois à Angers dans le travail méthodologique mais également sur le terrain, en Mauritanie, dans des conditions quelquefois dantesques, m'a permis d'élever le niveau d'exigence et la précision de cette recherche.

Un important travail de relecture et d'encadrement de recherche a été réalisé par Nucia Taïbi que je remercie chaleureusement ainsi que pour ces cinq années de recherche entre le lac d'Aleg et de Mâle.

Ce travail de recherche a été réalisé conjointement au sein du Laboratoire Paysages et Biodiversité de l'Université d'Angers et du Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège.

Je remercie le laboratoire de géophysique de l'université de Miami et tout particulièrement les Docteurs Shimon Wdowinski et Kim pour leur accueil et leur encadrement dans ma formation en interférométrie radar. Je remercie le laboratoire GEOPHEN de Caen pour son accueil, et je témoigne ma profonde reconnaissance à l'ingénieur d'études Robert Davidson pour avoir encadré mes recherches en granulométrie laser. Je salue mes collègues mauritaniens et tout particulièrement les Docteurs Ould Jiddou, Vall Elghadi et Bint Mohammed pour leur disponibilité et leur aide sur le terrain.

Je tiens à remercier les rapporteurs de cette thèse, Dominique Perrin et Daniel Delahaye, d'avoir accepté de juger mon travail. Je remercie aussi tout particulièrement Mohamed Ould Abdallahi pour son amitié et son aide en Mauritanie, mes parents qui m'ont toujours soutenu moralement et financièrement ainsi que tous mes camarades du Laboratoire Paysages et Biodiversité.

SOMMAIRE

Introduction	p. 1
Chapitre I : Contexte physique et conditions de peuplement	p. 9
I) Contexte physique général de la Mauritanie	p. 10
II) Les ressources en eau	p. 12
III) Le cadre humain.....	p. 17
Chapitre II : Les précipitations	p. 49
I) Caractéristiques générales.....	p. 50
II) Analyse des variations interannuelles des précipitations à l'échelle nationale...	p. 54
III) Analyse des tendances aux pluies extrêmes en Mauritanie ((1935-2004).....	p. 61
IV) Caractéristiques climatiques de la zone d'étude (Bassin versant du lac de Mâle).....	p. 70
Chapitre III : Dynamique des unités de paysage	p. 85
I). Caractéristiques des unités de paysage.....	p. 87
II). La télédétection comme outil de compréhension de la dynamique des états de surface.....	p. 90
III). Caractéristiques et dynamique des unités de paysage (bas-fond, dune, reg).....	p. 106
IV). La dynamique temporelle des différentes unités de paysage et états de surface	p. 112
V) Dynamique et fonctionnement des bas-fonds.....	p. 127
Chapitre IV : Modélisation hydrologique	p. 150
I). La modélisation pluie-débit.....	p. 151
II). Acquisition et exploitation des données.....	p. 156
III). Evaluation du remplissage du lac de Mâle.....	p. 176
IV). Application à l'analyse de la répartition spatiale du ruissellement dans le bassin versant du lac de Mâle	p. 184
V). Simulation du remplissage du lac par des épisodes fictifs aléatoires.....	p. 189
Conclusion	p. 199

INTRODUCTION

La communauté scientifique a été particulièrement sollicitée ces derniers temps sur les questions environnementales en matière de réchauffement climatique notamment à la suite des différents rapports du GIEC/IPCC. Cette commission d'experts internationaux touchant à des disciplines scientifiques très diverses a permis de mettre au centre du débat médiatique la question très large du développement durable de nos sociétés humaines. Le réchauffement climatique devrait être, selon les experts du GIEC, plus durement ressenti dans les pays en développement, pays qui n'ont pas suffisamment de ressources, à la fois techniques et financières pour s'adapter aux évolutions en cours.

L'Afrique est donc particulièrement exposée aux conséquences du réchauffement climatique comme le confirme le rapport d'expertise international (GIEC, 2007) : « *Africa is one of the most vulnerable continents to climate change and climate variability, a situation aggravated by the interaction of 'multiple stresses', occurring at various levels, and low adaptive capacity (high confidence)* ». Les conséquences de l'évolution du climat sur ce continent sont complexes, les causes étant nombreuses et interdépendantes.

On pourrait cependant disserter sur les relations entre le réchauffement et les problèmes de désertification que connaissent notamment les pays d'Afrique de l'Ouest. Cette question n'est pas tranchée car on peut douter de l'implication de ce réchauffement dans les très sévères sécheresses enregistrées au Sahel en 1913-1915 et en 1940-1943, même si le rapport du GIEC prévoit pour le futur de sombres perspectives pour la région sahélienne: « *Ecosystem responses to past rainfall variability in the Sahel are potentially useful as an analogue of future climate change impacts, in the light of projections that extreme drought-affected terrestrial areas will increase from 1% to about 30% globally by the 2090s* » (Burke et al., 2006) .

Le phénomène de désertification, entendu comme « la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et sub-humides sèches par suite de divers facteurs parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines », pourrait pourtant résulter du réchauffement climatique. L'UICN (The World Conservation Union) et sa branche Ouest- africaine font ainsi un lien direct entre le changement climatique, la sécheresse chronique, la désertification et l'accentuation de la sécheresse.

Il semble d'autre part que les perspectives proposées par le rapport du GIEC ne sont pas toujours très fiables selon les espaces et de nombreuses incertitudes existent à l'heure

actuelle. Dans le rapport GIEC IV, on peut apprendre dans le chapitre consacré à l'Afrique que le modèle de projection des précipitations est peu fiable, notamment pour reproduire les mécanismes responsables des précipitations. En ce qui concerne la région sahélienne, les difficultés sont liées au fait de la forte présence de lithométéores et des anomalies de la température de surface de l'océan (Hulme *et al*, 2001 ; Prospero and Lamb, 2003).

Les grands domaines où l'impact de la désertification est le plus fort en Afrique subsaharienne, sont les zones pastorales, les zones de cultures pluviales, les périmètres irrigués. Le Sud-Ouest de la Mauritanie où les trois domaines évoqués ci-dessus sont présents, est ainsi soumis à la désertification. Cette partie de la Mauritanie est un espace d'interface climatique caractérisé par la présence de zones humides remarquables. Celles-ci, comme à Aleg et Mâle, résultent de la présence de massifs dunaires qui recourent des dépressions jouant ainsi le rôle de barrages sédimentaires naturels favorisant le stockage de l'eau à la saison des pluies. Ces milieux d'une grande richesse sont menacés à la fois par l'activité humaine et par la désertification liée à l'évolution du climat. Chaque année, des centaines de villages de cette région attendent la pluie avec impatience. Lorsqu'elle survient, au bout d'une longue attente, elle disparaît à peine tombée, tant sont énormes les pertes d'eau par infiltration-évaporation. La ressource en eau se retrouve alors concentrée dans ces zones humides qui deviennent durant des mois un espace vital pour la survie des populations avoisinantes.

Au cours de l'histoire, les zones humides ont été particulièrement maltraitées un peu partout dans le monde. Si les impératifs des siècles passés en matière de salubrité publique (lutte contre les moustiques et son corollaire le paludisme) ont souvent engendré une forte réduction du nombre de ces espaces particuliers riches en biodiversité, ce ne sont pas les seules raisons qui ont concouru à leur raréfaction (Fustec *et al*, 2000).

Dans la région sahélienne, plusieurs facteurs se sont conjugués pour aboutir à leur dégradation. Le plus important est la baisse de la pluviométrie depuis la sécheresse de 1970, très importante selon les endroits (de 15 à plus de 30 %), qui a induit une diminution des débits moyens des grands fleuves de 40 à 60 %. Ainsi « *La baisse des débits s'est traduite par la réduction significative de la superficie des principales zones humides naturelles* » (Niasse *et al*, 2004).

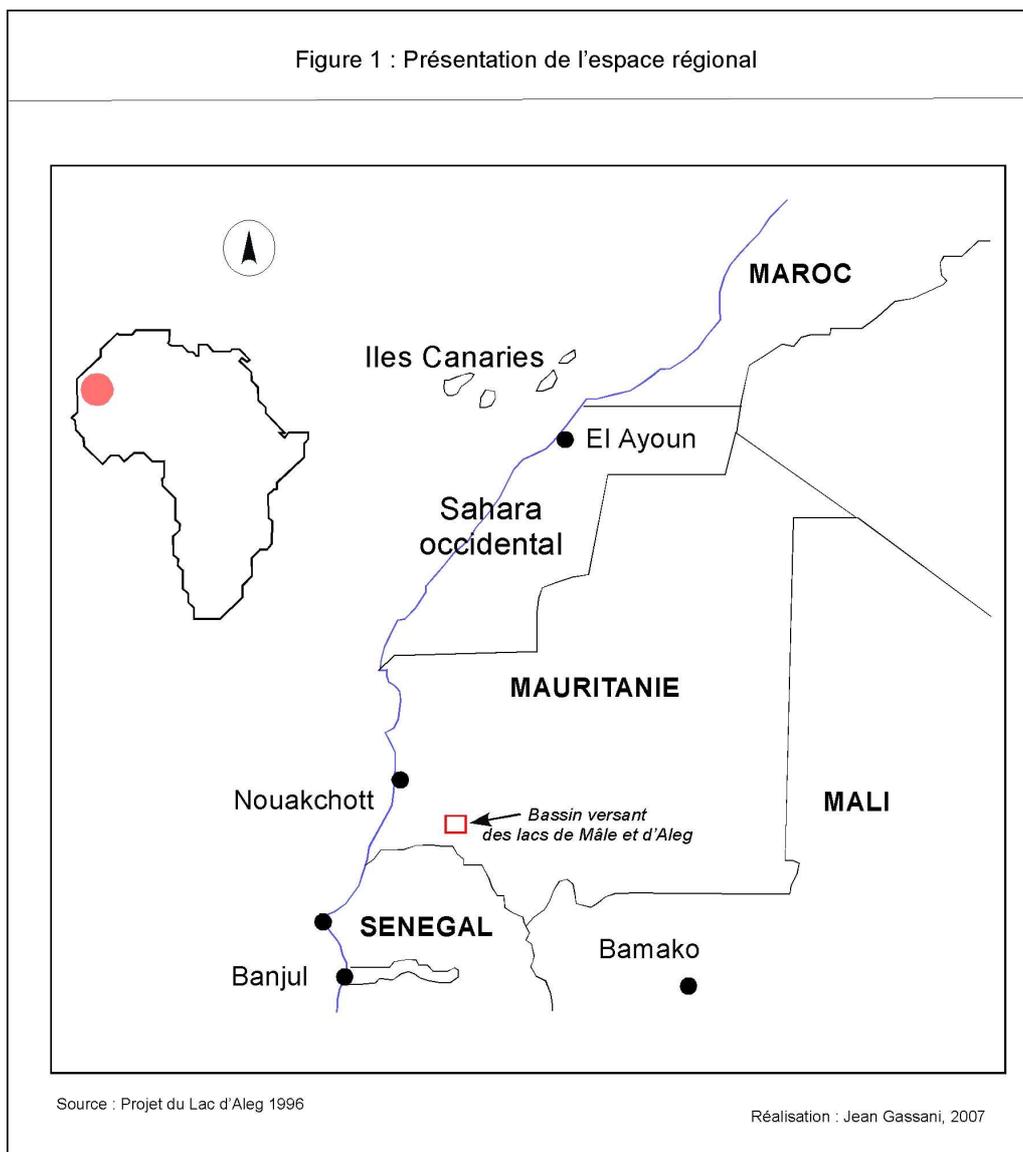
En Mauritanie, les zones humides étaient peu exploitées avant la sécheresse des années 1970. La prise en compte de leur importance à la fois économique et écologique s'est effectuée à la fin des années 1990. C'est alors que s'est créé le GREZOH (Groupe de Recherche des Zones Humides), groupe de chercheurs mauritaniens de l'Université de

Nouakchott qui a noué des collaborations avec l'équipe du Professeur Gérard Moguedet de l'Université d'Angers.

L'étude de ces milieux très importants, tant au niveau de la biodiversité que comme espace de subsistance pour les populations locales, est essentielle car les évolutions climatiques passées et en cours font peser de lourdes interrogations quant à leur subsistance.

I. La zone d'étude

Le territoire étudié est situé dans le Sud-Ouest du pays. C'est un espace de transition entre le milieu sahélien proche du fleuve Sénégal et les marges du Sahara. Le bassin versant du lac de Mâle à une superficie de 800 km², il est localisé entre les points de coordonnées 17° 4' 39'' - 16° 46' 54'' de latitude nord et 13° 25' 34'' - 13° 5' 18'' de longitude ouest. (Fig,1).



II. Justification de l'étude

L'étude des zones humides en Mauritanie, et en particulier celles de la région du Brakna est intéressante car ce sont des espaces peu étudiés où la gestion des ressources en eau devient primordiale pour la survie des populations locales. Au cours de nos précédents travaux de recherche (Gassani, 2003, 2004), nous avons utilisé la télédétection dans le but d'améliorer les connaissances sur la répartition et la dynamique de la végétation sur le lac d'Aleg durant la saison sèche. Nous avons également travaillé sur la compréhension du fonctionnement de ces zones humides nord-sahéliennes, à partir d'observations d'images satellites. Ce type d'étude principalement descriptive avait pour but de produire des connaissances et de la cartographie sur des espaces peu étudiés. De nombreux mémoires de maîtrise ou de master de l'Université d'Angers ont été réalisés sur les zones humides du lac de Mâle et d'Aleg dans le Sud-Ouest mauritanien (Hunault, 2001 ; Le Drezen, 2001 ; Glémin, 2002, Royer, 2002) ainsi qu'une thèse (Vall Elghadi 2005) afin d'éclairer ces espaces méconnus.

Les nombreuses dépressions rencontrées dans le Sud-Ouest mauritanien, comme dans tout le reste du Sahel, ont fait l'objet d'études hydrologiques peu nombreuses et c'est pourquoi nous avons voulu améliorer les connaissances dans ce domaine.

L'idée centrale et originale de cette étude est que nous avons supposé que l'infiltration ne se produit pas sur toute la surface, comme c'est forcément le cas, en conditions expérimentales. Dans les conditions naturelles, la topographie du sol joue un rôle majeur en retenant l'eau dans des dépressions de toute taille. D'après de multiples observations qui ont pu être faites sur de nombreux bassins versants de morphologies très variées en Europe, en Afrique et en Asie (Duchesne, 2007), nous pensons que le réseau des micro-talwegs est structuré comme le réseau hydrographique, c'est-à-dire qu'il est ramifié. Cependant, les dépressions doivent se remplir avant de se déverser dans la suivante ou dans le réseau. La conséquence de cette structuration est un laminage, plus ou moins efficace selon la densité de cuvettes, et le volume d'eau qu'elles peuvent stocker. Nous allons chercher à vérifier ce fonctionnement par la modélisation.

En couplant des données multisources (télédétection active et passive, granulométrie, étude des précipitations, propriétés des sols, relevés limnimétriques), il est théoriquement

possible de générer un modèle hydrologique dynamique pouvant simuler le volume d'eau ruisselé au lac après n'importe quel type d'évènement pluvieux.

La modélisation hydrologique des bassins versants en milieu sahélien est une thématique de recherche qui a commencé à émerger grâce aux travaux de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) anciennement ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le développement en coopération) dès le début des années 1980 (Bernard, 1980 ; Chevallier, 1982 ; Chevallier, Claude, Pouyaud, Bernard, 1985 ; Albergel, Chevallier, Lortic, 1987). Ces travaux remarquables, sont les premiers en matière de modélisation hydrologique dans les régions du Sahel. Ils ont été échelonnés sur une dizaine d'années, et strictement localisés sur deux espaces d'étude au Burkina Faso : les bassins versants des mares d'Oursi et de Gargara. Le bassin versant de la mare d'Oursi est de loin le plus vaste (263 km²), les 7 bassins versants attenants à la mare, Jalafanka, Kolel, Polaka, Tchalol, Outardes, Guntoure et Taima, ayant une superficie totale dépassant à peine les 300 km². Le plus petit fait 0,81 et le plus grand 105 km². Les deux bassins versants de Gargara ont été étudiés en même temps que ceux de la mare d'Oursi et ont donné lieu à de moins nombreuses publications.

En 1989, Valentin et Casenave ont publié ce qui est devenu un ouvrage de référence sur les états de surface de la région sahélienne. Ils ont créé une typologie des états de surface au moyen de simulateurs de pluie en évaluant leur influence sur l'infiltration. Cette publication permet de comprendre l'influence des états de surface sur le ruissellement et donc de pouvoir prendre en compte ces nouvelles données dans la modélisation hydrologique et dans la cartographie de ces bassins versants. Ces recherches ont donné lieu à diverses modélisations de bassins versants situés en milieu sahélien, dues notamment à Pierre Ribstein de l'IRD en 1990.

Ce dernier a créé des modèles de crue sur de petits bassins versants (9 et 50 km²) au Burkina Faso, au Tchad, Niger et au Cameroun. Cela a permis de prédéterminer des volumes de crue sur des bassins non équipés.

La modélisation hydrologique de bassins versants en Afrique ne se limite cependant pas ni au Sahel ni aux travaux de chercheurs de l'IRD. De nombreuses études ont été réalisées sur différents bassins versants dans le monde, comme dans le delta de l'Okavango par exemple (Wolski et *al.* 2006).

La limite de toutes ces études est de ne pas prendre en compte la microtopographie et par conséquent le stockage de l'eau en surface.

III. Objectifs

La démonstration s'articulera autour de trois axes (climatologie, états de surface et télédétection et la modélisation hydrologique) pour lesquels des méthodologies particulières ont été mises en oeuvre.

Nous allons d'abord nous attacher à l'étude approfondie de la dynamique des pluies journalières et mensuelles sur le territoire mauritanien. Nous disposons pour cela d'une chronique longue qui va de 1935 à 2004.

Nous chercherons ensuite à créer une base de données utilisable ultérieurement par un modèle hydrologique. Puis nous étudierons les particularités de la répartition spatiale des pluies au niveau national et sur notre zone d'étude.

Pour disposer d'informations précises sur l'espace d'étude, il nous a fallu caractériser les états de surface du bassin versant du lac de Mâle à partir d'analyses de terrain. Cette caractérisation a aussi été réalisée à partir d'études en télédétection active et passive, avec la volonté d'intégrer dans cette optique les apports de la technologie radar. Afin de déterminer les caractéristiques principales du bassin versant du lac de Mâle, nous avons, en plus d'une pratique continue du terrain d'étude, réalisé un travail préparatoire en nous appuyant sur les images satellites de SPOT 5. Nous avons aussi réalisé un MNT (Modèle Numérique de Terrain) de la zone à partir des images satellites au moyen du logiciel SIG (ArcGis 9.1).

Ce travail minutieux de caractérisation doit permettre de combiner ces données au travail de repérage et d'identification des dépressions qui sont censées agir dans la dynamique hydrologique du bassin versant. Pour comprendre et simuler le fonctionnement des dépressions du bassin versant, nous avons choisi de créer un modèle numérique de terrain (MNT) à partir de relevés de terrain et de l'utilisation des images satellites.

L'objectif final est de simuler le ruissellement sur la totalité du bassin versant et de simuler le remplissage du lac à partir de l'ensemble des données évoquées ci dessus pour différents épisodes pluvieux. Nous avons combiné une partie des sources précédentes (pluviométrie, états de surface,...) à de nouveaux éléments. Les nombreux séjours sur le terrain, échelonnés entre 2005 et 2007 (voir annexe 1), ont rendu possibles des mesures bi-quotidiennes de la hauteur d'eau au barrage de Mâle, des relevés au théodolite des caractéristiques morphologiques du lac, des mesures d'infiltration sur l'ensemble du bassin

versant. Ces données relevées sur le terrain ont été complétées par l'acquisition d'images SPOT 5 du bassin versant en 2006 ainsi que par des images RADARSAT 1 durant la même période. Toutes ces données, de nature très diverse, doivent permettre de construire un modèle hydrologique dynamique du bassin versant.

Le modèle mis au point pourrait être ensuite applicable à l'ensemble de la sous-région et, pourquoi pas à l'ensemble du Sahel.

Chapitre I :

CONTEXTE PHYSIQUE ET CONDITIONS DU PEUPLEMENT

L'étude de la dynamique climatique et hydrologique du bassin versant du lac de Mâle doit impliquer une bonne connaissance géologique, hydrogéologique et humaine de cet espace ainsi que des espaces régionaux et nationaux qui l'englobent.

La Wilaya (région) du Brakna fait partie d'un des espaces principaux de la Mauritanie tant en terme de ressource hydrique (Ould Jiddou, 2005) que de densité de peuplement. C'est de plus un espace carrefour entre les territoires du nord du pays et l'espace sahélien proche du fleuve Sénégal au sud. Cette situation de carrefour ainsi que la diversité des ressources en eau et des milieux fait du Brakna un espace essentiel de la Mauritanie, et un espace d'étude privilégié.

L'étude des dynamiques entre les zones humides (Glémin et Royer 2002 ; Gassani, 2003) et le peuplement humain y est donc primordiale dans une optique de conservation des zones humides mais également dans celle d'optimiser la gestion des ressources en eau.

Pour atteindre l'objectif de la mise en concordance des ressources et des utilisateurs de l'espace il convient d'étudier en préambule les spécificités de cet espace et les différentes pratiques du territoire.

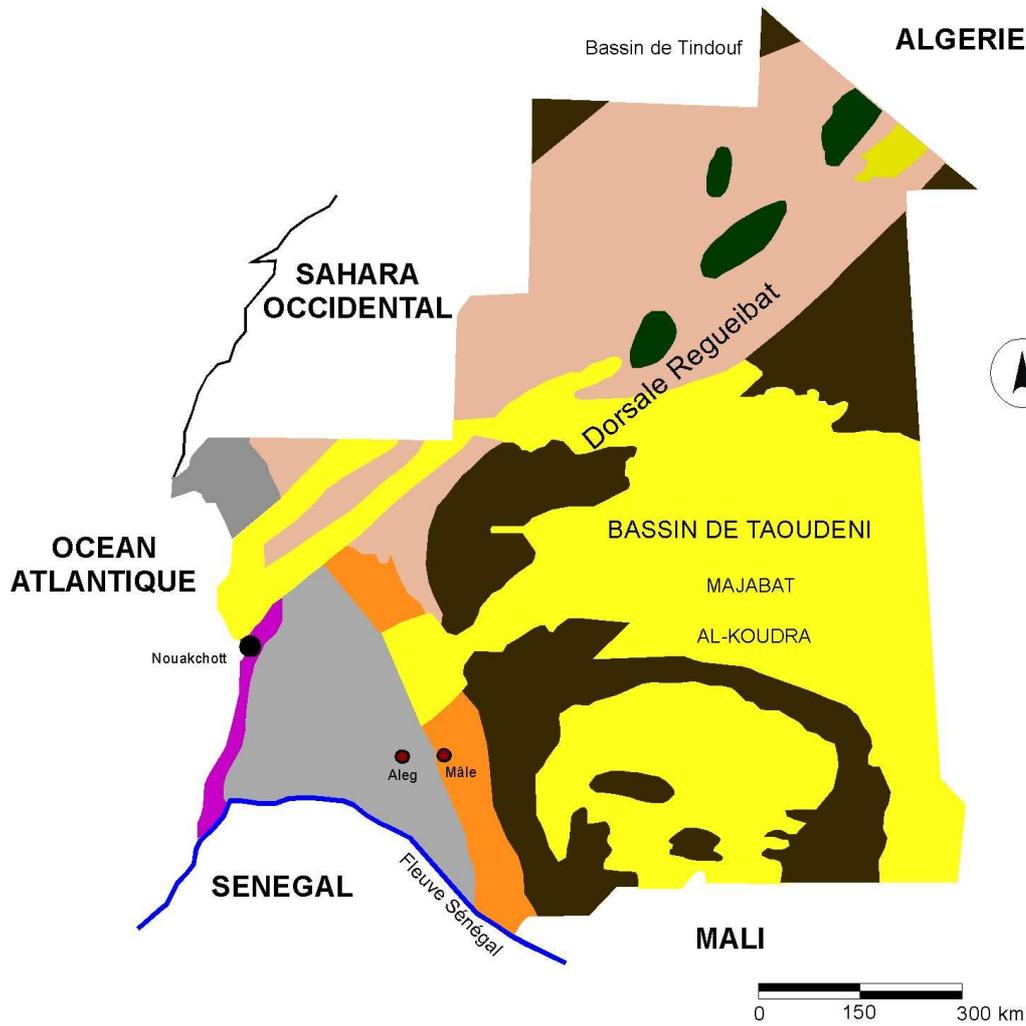
I. Contexte physique général de la Mauritanie

Le territoire mauritanien occupé par une grande partie du Sahara sud occidental se caractérise par de grands ensembles lithostratigraphiques (Toupet, 1977).

On distingue ainsi, du plus ancien au plus récent (Fig.2):

- La dorsale Regueibat au nord du pays qui date du Précambrien (530 millions d'année). Cette immense plate-forme est une antéclise du socle cristallin et métamorphique que l'érosion a réduit à l'état d'une pénéplaine.

Figure 2 : Géomorphologie de la Mauritanie



Légende :

	Plateaux sédimentaires		Chaîne des Mauritanides
	Bassin sénégalo-mauritanien		Sebkha
	Erg		Hamada
	Reg du socle précambrien		Fleuve

Source : Toupet & Pitte, 1977

Réalisation : Jean Gassani, 2007

- Le bassin de Taoudeni occupe la moitié de la superficie du pays. Il correspond à une vaste synéclise occupée principalement par l'erg Majabat Al Koubra. Les formations sédimentaires qui occupent le bassin vont du Précambrien supérieur à l'actuel. Ce bassin se prolonge jusqu'aux contreforts de l'Adrar à l'ouest.

- Le bassin de Tindouf est une vaste synéclise située au Nord et dont le remplissage sédimentaire va du Précambrien supérieur au Dévonien supérieur marin.

- La chaîne des Mauritanides s'étend à l'extrémité nord de la dorsale Regueibat, jusqu'au fleuve Sénégal au sud. Elle a une altitude moyenne de 60 à 150 mètres pour environ 100 kilomètres de large et correspond à des collines et des reliefs isolés de type (inselberg), composés essentiellement de roches métamorphiques et cristallines.

- Enfin, dans la partie occidentale du pays, on observe des terrains sédimentaires qui appartiennent au bassin méso-cénozoïque sénégal-mauritanien qui s'étend sur 340 000 km² du Cap blanc à la Guinée Bissau. Il couvre en Mauritanie une très vaste superficie de 100 000 km², allant de la côte atlantique à la chaîne des Mauritanides.

La série sédimentaire s'étend du Trias-Lias au Quaternaire, en liaison avec les multiples transgressions et régressions marines de cette période, mais regroupe surtout des formations essentiellement marines qui témoignent d'une grande continuité de l'évolution géologique depuis le Jurassique supérieur jusqu'à l'Eocène.

Sa structure poreuse et perméable a permis la formation de nombreux aquifères qui se terminent à l'ouest par un biseau sec à l'approche de la chaîne des Mauritanides.

II. Les ressources en eau

En Mauritanie, la maîtrise de l'eau est un enjeu de taille compte tenu d'une part de l'absence de ressources disponibles directement mobilisables, de la faiblesse et l'irrégularité des précipitations et, d'autre part, du développement urbain, qui exerce une pression importante sur les ressources. Les ressources en eau de surface, estimée à 6 Milliards de m³, sont constituées essentiellement par le Fleuve Sénégal et ses affluents et par les retenues de barrages disséminées dans la partie Sud et centrale du territoire.

Le pays recèle également d'importantes ressources en eau souterraines, caractérisées toutefois par de grandes disparités géographiques.

II.1. Les ressources souterraines

Le contexte apparaît favorable dans le Sud-Ouest, le Sud et le Sud-Est (grandes nappes continues du Trarza et de Taoudenni en formations sédimentaires, nappes de la Vallée du Fleuve. Les débits ponctuels y sont élevés, et les réserves estimées à près de 50 Milliards de m³. Il est moins favorable dans le reste du pays où les nappes sont discontinues et les ressources plus aléatoires.

Quand on s'intéresse au Sud-Ouest de la Mauritanie proprement dit, il recèle essentiellement trois grands ensembles aquifères dont deux intéressent directement notre secteur d'étude :

Le premier aquifère est celui de la vallée du fleuve Sénégal et de ses affluents. Le fleuve coule ici sur ses propres alluvions qui sont, selon les zones, plus ou moins perméables. Cet aquifère alluvial important touche le sud de notre région d'étude, le Brakna, mais il est éloigné et indépendant de la dynamique hydrologique du bassin versant du lac de Mâle (Jiddou, 2005).

Des puits peu profonds sont creusés dans la plaine alluviale et fournissent une eau abondante et de bonne qualité. La ville de Kaédi qui dispose par exemple depuis peu d'une station de pompage qui capte l'aquifère alluvial se situe au sud-ouest du Brakna. La dynamique de la nappe suit celle des fleuves et rivières en général : durant la période de crue le fleuve alimente ces alluvions qui forment un réservoir aquifère. Lors de la période de basses eaux la nappe restitue une partie des eaux au fleuve Sénégal.

La nappe du Trarza fait partie intégrante du bassin sénégalo-mauritanien. Dans cette zone on trouve presque partout de l'eau à différentes profondeurs. Ces ressources sont situées dans les formations argilo-sableuses du Continental Terminal et du Quaternaire (Ould Jiddou, 2005). La nappe est très largement exploitée car elle est située dans une région d'élevage intense et favorise l'installation de nombreux villages.

Cette nappe est faiblement réalimentée par les eaux de ruissellement. La présence de l'Océan atlantique limite en outre son extension à l'Ouest, par la présence du biseau salé qui s'enfoncé comme un coin dans le continent sous les eaux douces.

La nappe profonde du Brakna se situe à l'Est de celle du Trarza. Elle a été décelée grâce aux travaux d'Archambault, 1951. Cette nappe est située à 40-60m de profondeur en allant de l'Est à l'Ouest et du Sud et au Nord.

Les grès grossiers et sable à granulométries hétérogènes de l'Eocène constituent l'aquifère du Brakna (H. Paloc, 1962). Celui-ci est le principal aquifère de la région et se situe sur la bordure orientale du bassin sénégal-mauritanien cénozoïque. L'aquifère du Brakna est limité à l'Est par la chaîne des Mauritanides, les trente derniers kilomètres de terrain sédimentaires constituant un biseau sec.

Le niveau piézométrique de la nappe du Brakna, à proximité d'Aleg, est situé entre 3,5 et 5 mètres sous le niveau de la mer. Cet aquifère est principalement exploité au niveau d'Aleg par de nombreux puits ou forages d'une profondeur de 20 à 30 mètres.

En dehors de ces aquifères, on peut rencontrer quelques nappes superficielles, dites perchées, en relation avec les dépressions topographiques alimentées par les eaux de ruissellement.

Les roches du socle métamorphique, constitués de schistes et quartzites du Précambrien, sont peu perméables et ne contiennent donc pas d'aquifères. Mais on peut y trouver des nappes discontinues liées à la fracturation des roches constituant ainsi quelques réserves disparates

II.2. Les ressources en eau de surface

Si on excepte les ressources en eau liées au fleuve Sénégal, les principales ressources résultent de la présence de zones humides très particulières. Ces espaces humides sont parmi les écosystèmes les plus riches et les plus productifs de la planète en matière vivante après les forêts tropicales. Les interactions entre les éléments biotiques et abiotiques qui les constituent (sol, eau, plantes et animaux) se manifestent à travers le cycle des matières nutritives. L'échange d'eau se produit quant à lui entre la surface et la nappe souterraine et également entre la surface et l'atmosphère (Fustec et Lefevre, 2000).

Selon la Convention de Ramsar (Iran, 1971), sont considérées comme zones humides : « *des étendues de marais, de fagnes, de tourbières, d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur n'excède pas six mètres* ».

La Mauritanie, en dépit de son image de pays désertique, recèle de nombreuses zones humides d'importance aussi bien nationale qu'internationale. Elles sont situées principalement dans les régions du Sud-Ouest, en raison des apports pluviométriques plus importants et de la présence du fleuve Sénégal à l'extrême sud du pays. On peut citer quelques zones humides d'intérêt national comme les lacs d'Aleg, de R'kiz sans oublier notre zone d'étude le lac de Mâle et d'autres qui ont un label international, comme le PNBA et le Diawling. Elles sont donc un patrimoine précieux qu'il convient de préserver et de restaurer si nécessaire.

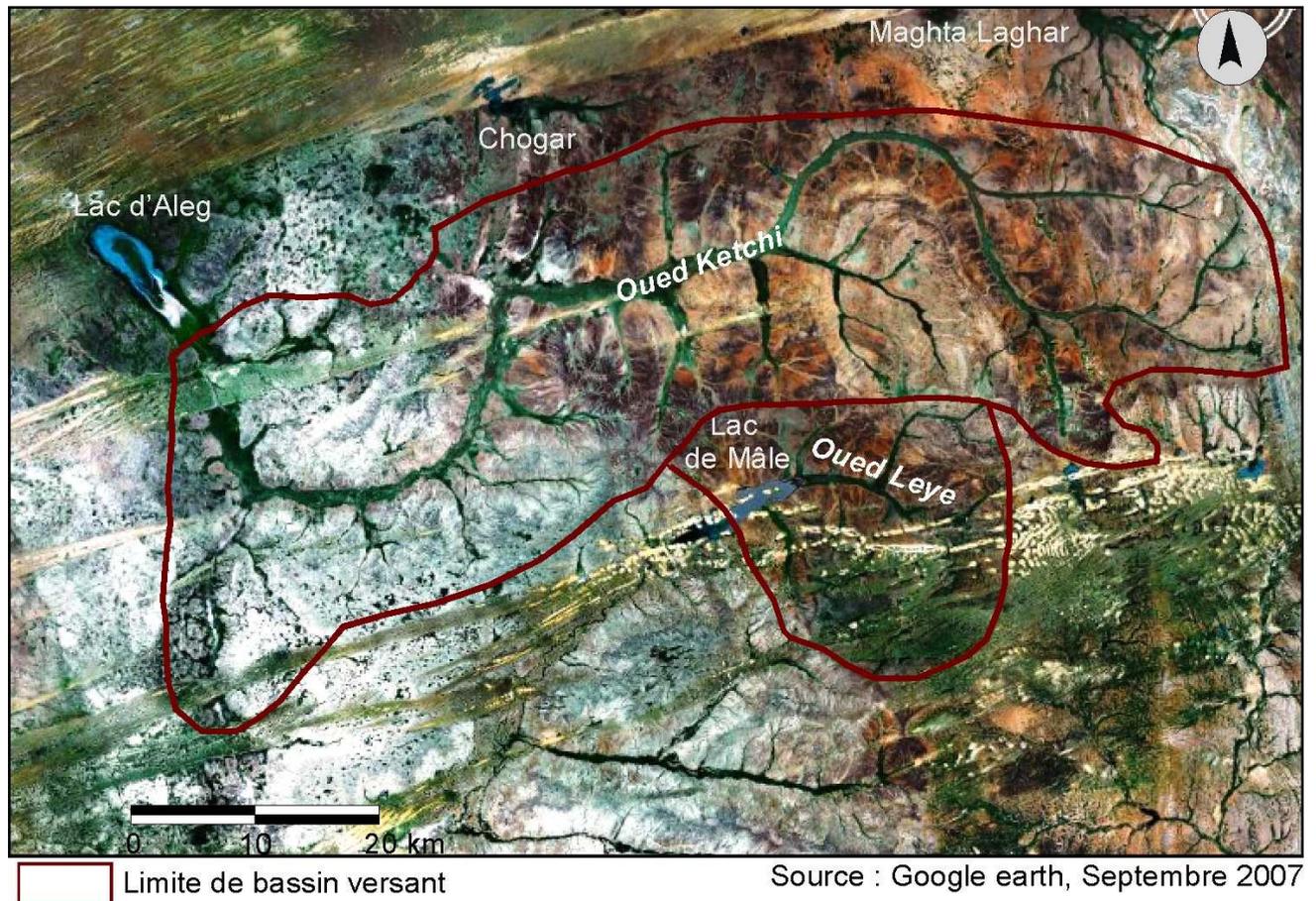
Traditionnellement exploitées par l'homme, ces zones humides remplissent de multiples fonctions à travers la pêche, l'agriculture de décrue, les pâturages de soudure, les cueillettes. Elles sont donc au cœur de l'économie rurale du Sahel et constituent également des écosystèmes d'une très grande valeur au niveau écologique. L'utilisation multifonctionnelle des ressources de ces zones humides permet de réduire les risques de famine et autres conséquences des sécheresses.

Pourtant ces zones humides figurent en tête des milieux naturels les plus menacés. La pression des activités anthropiques est à l'origine de leur dégradation et même parfois de leur disparition. Au cours des trois dernières décennies, on a enregistré une croissance rapide de la population mauritanienne qui s'est concentrée avec son cheptel autour de ces zones, ce qui s'est traduit par une accélération de la pression sur les ressources. Cette situation, corrélée à plusieurs années de sécheresse, a entraîné une forte baisse de la productivité végétale.

La diversité biologique dans ces milieux se trouve en général liée à leur stabilité. Les ruptures d'équilibre liées à la désertification à grande échelle ainsi que la déforestation ont donc de graves effets sur ces zones humides. Leur survie de ces différentes zones humides, suite à la forte sédentarisation des tribus nomades depuis 1970, dépend aujourd'hui des choix d'aménagement et de développement. Cela concerne les quatre principales zones humides du Brakna, les bassins versant d'Aleg, de Mâle, du Dionaba et de Maghta Laghar (Fig.3).

Sur cette carte, on peut apercevoir très nettement deux des zones humides évoquées ci-dessus : le lac d'Aleg au Nord-Ouest ainsi que les ramifications de l'oued Ketchi et le lac de Mâle au centre est de la figure avec l'oued Leye.

Figure 3 : Zones humides du Brakna (Mauritanie)



Les zones humides de la Mauritanie ne sont pas des écosystèmes vivant en vase clos hors de toute action humaine. C'est parce que les interactions homme-milieu existant avec ces zones humides sont nombreuses et qu'elles tendent à s'accroître que leur étude rigoureuse est nécessaire. Les contraintes climatiques et anthropiques mettent en péril la pérennité de ces zones humides et des activités qui y sont liées (agriculture de décrue, pâturage des prairies aquatiques, abreuvement du bétail, etc.) ainsi que leurs richesses floristiques et faunistiques remarquables. C'est pour cela qu'une étude approfondie de la dynamique de la population ainsi que l'analyse des pratiques agricoles autour de ces espaces a été réalisée.

III. Le cadre humain

L'étude de la répartition et de la dynamique de la population autour du lac s'avère nécessaire pour comprendre de quelle manière l'homme exploite les ressources naturelles du lac de Mâle et les différentes pressions qu'il y exerce.

La zone d'étude se situe dans la région du Brakna (Fig.4) qui est l'une des treize Wilayas qui composent la Mauritanie. Nous nous intéresserons principalement à la commune de Mâle qui englobe la majorité des populations qui habitent près du lac.

III.1. Population de la Mauritanie

Cette population de la Mauritanie est en 2007, selon la projection du scénario médian du département démographique de l'ONU, de 3 123 818 habitants¹. Si l'on se réfère aux chiffres de 2005 du département des affaires économiques et sociales de l'ONU² le pays est alors peuplé de 2 963 000 mauritaniens et la densité de population du pays est de 3 hab/km² (Tab.1).

Tableau 1 : Indicateurs de population des pays frontaliers de la Mauritanie

	Population 2005	Densité (hab/km ²)
Mauritanie	2 963 000	3
Algérie	32 854 000	14
Maroc	30 495 000	68
Mali	11 611 000	9
Sénégal	11 770 000	60

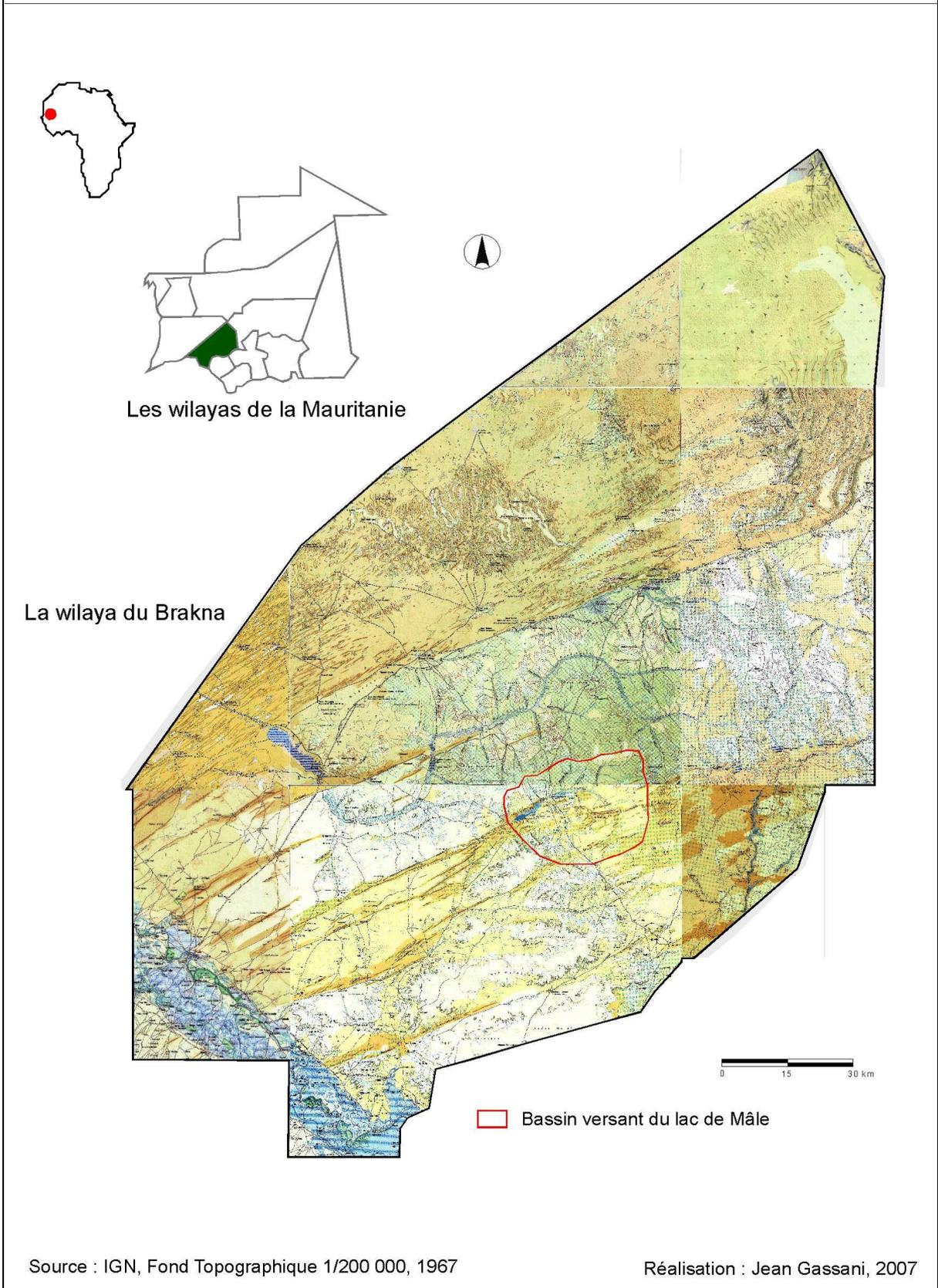
Source : <http://esa.un.org>

La Mauritanie est un pays atypique en Afrique de l'Ouest sur le plan du peuplement. Ce pays bien que très vaste est très peu peuplé et donc par voie de conséquence sa densité de population est très faible.

¹http://unstats.un.org/unsd/cdb/cdb_years_on_top.asp?srID=13660&Ct1ID=&crID=478&yrID=2007, 01/09/2007.

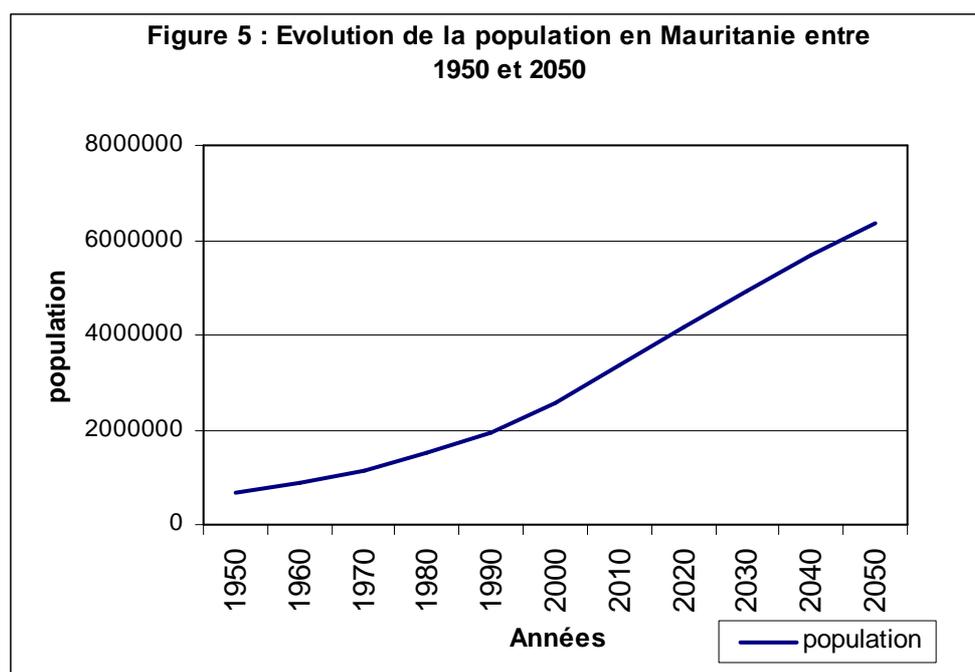
² <http://esa.un.org/unpp/p2k0data.asp>, 01/09/2007

Figure 4 : Espace d'étude régional, la Wilaya du Brakna



III.1.1. Evolution de la population nationale et de celle du Brakna

La population de la Mauritanie est en constante augmentation depuis les années 1950 et elle continuera de croître au moins jusqu'en 2050 si l'on se fie aux projections démographiques réalisées par l'ONU. On dénombrait successivement 692 382 mauritaniens en 1950, 2 566 152 en l'an 2000 et le pays devrait compter 6 364 093 habitants en 2050 d'après le scénario médian des démographes de l'ONU (Fig.5).



Source : unstats.un.org, 2007

Ces données obtenues sur le site Internet de l'ONU³, sont extraites des bases de données par pays⁴. La période de croissance maximale de la population est comprise entre la fin des années 1990 et le début des années 2020. Le pays est donc en pleine phase d'explosion démographique.

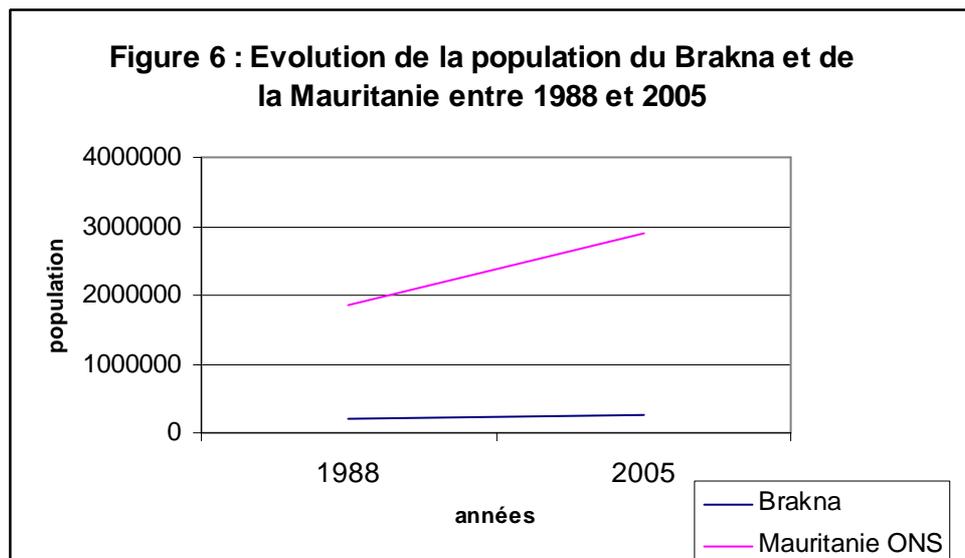
Si l'on compare maintenant l'évolution de la population de la Mauritanie et de celle de la Wilaya du Brakna entre 1988 et 2005 (Fig.6), on peut s'apercevoir que la croissance de la

³ <http://unstats.un.org>, 01/09/2007.

⁴ http://unstats.un.org/unsd/cdb/cdb_da_itypes_cr.asp?country_code=478, série :Population total (UN Population Division's annual estimates and projections), 01/09/2007.

population de l'ensemble de la Mauritanie est plus accentuée que celle du Brakna sur cette période. La Mauritanie est passée de 1 864 236 habitants en 1988 à 2 905 727 en 2005.

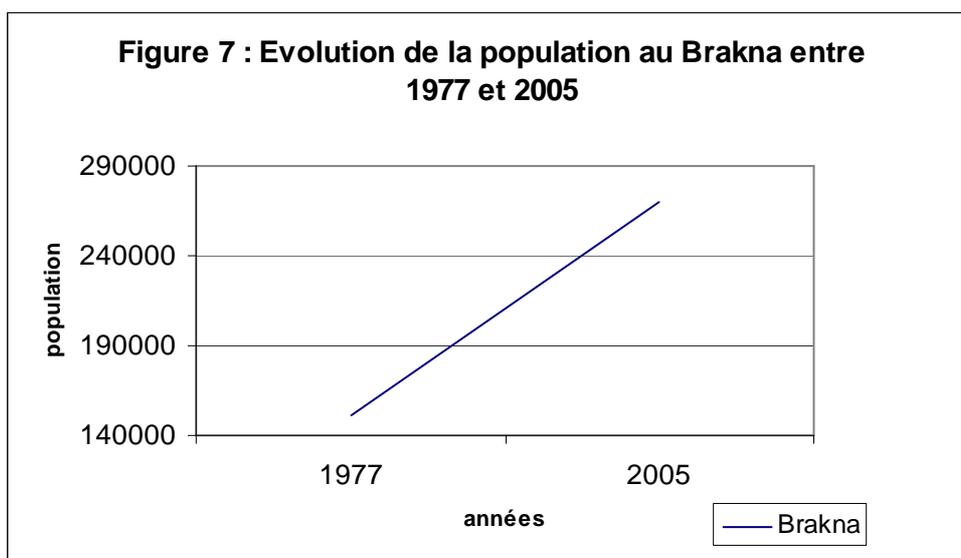
Dans les pays en développement, ce sont principalement les grandes villes qui connaissent un gain important de population. Le Brakna en est dépourvu, ce qui explique sa croissance plus modérée que celle du pays où le poids de la capitale représente près d'un tiers de la population.



Source : ONS 2007

Les dernières données démographiques sur le site internet de l'ONS (Office National de Statistique de Mauritanie), présentent des évaluations sur la population de la Wilaya du Brakna à trois dates 1988, 2000 et 2005. Nous avons pu également disposer de données provenant du recensement de la population et de l'habitat de 1977.

Si on analyse la population du Brakna seule avec une échelle adaptée (Fig.7), on peut se rendre compte de la forte augmentation de population qui est survenu en moins de vingt ans. Le Brakna a gagné 120 000 individus, passant de 6,5% de la population mauritanienne en 1998 à 9,3% en 2005. Sa population a presque doublé en un peu plus d'une génération. La région comptait en effet 151 000 habitants en 1977 et 270 269 en 2005.



Source : ONS, 2007

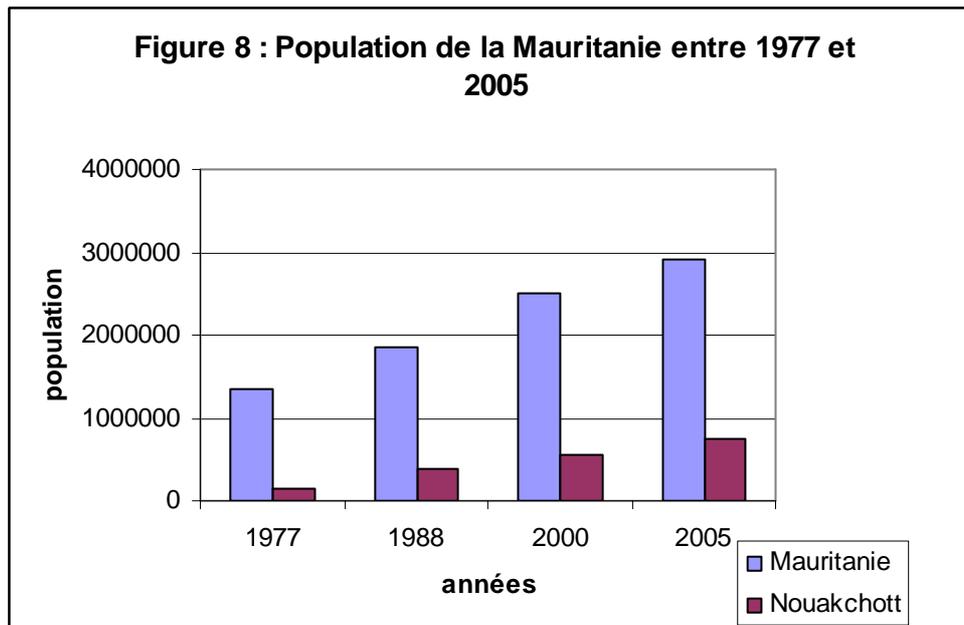
Entre 1977 et 2005 la population de la Wilaya du Brakna a augmenté de 79 %, une augmentation très forte en un peu plus d'une génération dans ce territoire rural de la Mauritanie.

La population mauritanienne est donc en constante augmentation depuis 30 ans. Malgré cela elle ne dépasse pas les 3 hab/km² (FAO, Aquastat 2005)⁵ sachant que la majorité du territoire qui couvre 1 030 00 km² reste inhabitée. Selon les producteurs de données on peut trouver des chiffres de densité fluctuant entre 2,4 et 3 hab/km². Nous nous sommes basés sur les tables Aquastat qui utilisent les données les plus récentes (2004). Dans tous les cas cette densité est très faible, car le pays est particulièrement vaste et les conditions de peuplement y sont difficiles.

III.1.2. Evolution de la répartition spatiale des populations du Brakna

On observe également une grande disparité de la répartition du peuplement en Mauritanie. La majorité de la population se regroupe dans les grandes villes comme Nouakchott (Fig.8). Ce modèle de l'exode rural vers les capitales est un modèle qui se répète dans la quasi-totalité des pays en développement, et la Mauritanie n'est pas donc en la matière une exception.

⁵ <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries/mauritania/tables.pdf#tab1>, 01/09/2007.

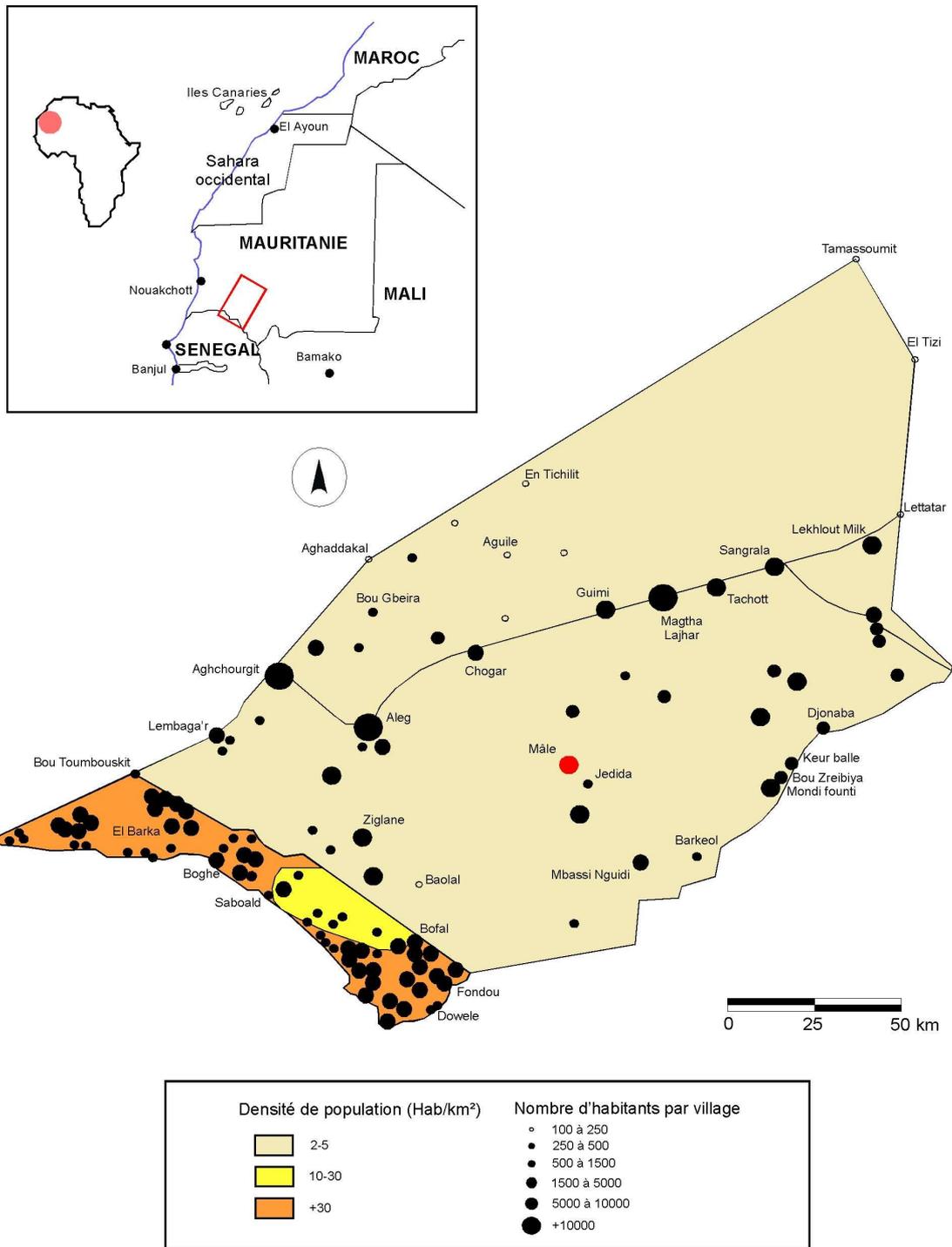


Source : ONS, 2007

Il convient de noter toutefois que le poids démographique de la capitale mauritanienne est passé de 10 % de la population totale du pays en 1977 à 25,6 % en 2005. La capitale, Nouakchott est en effet passée de 134 704 habitants en 1977 à 743 511 habitants en 2005 d'après les chiffres de l'ONS. Diverses sources évoquent que le cap du million d'habitants a été dépassé pour Nouakchott mais aucune estimation fiable ne permet de corroborer ces chiffres. Si l'on se réfère aux chiffres de 1960 la croissance de la ville est très spectaculaire car Nouakchott n'abritait que 8 000 habitants en 1960.

Si on observe une forte concentration de la population dans le Sud du pays et dans la capitale on observe également une inégalité de peuplement à l'échelle régionale, et notamment dans la Wilaya du Brakna (Fig.9).

Figure 9 : Distribution de la population dans la wilaya du Brakna



Source : Projet du Lac d'Aleg 1996

Réalisation : Jean Gassani, 2007

Dans le Brakna, on observe un fort taux de population dans la région du fleuve Sénégal où l'on compte plus de 30 hab/km². Cette densité est considérable car elle est dix fois supérieure à celle du pays sur un espace ne présentant pourtant aucune grande ville. La moughataa d'Aleg compte quant à elle une densité de 5 hab/km².

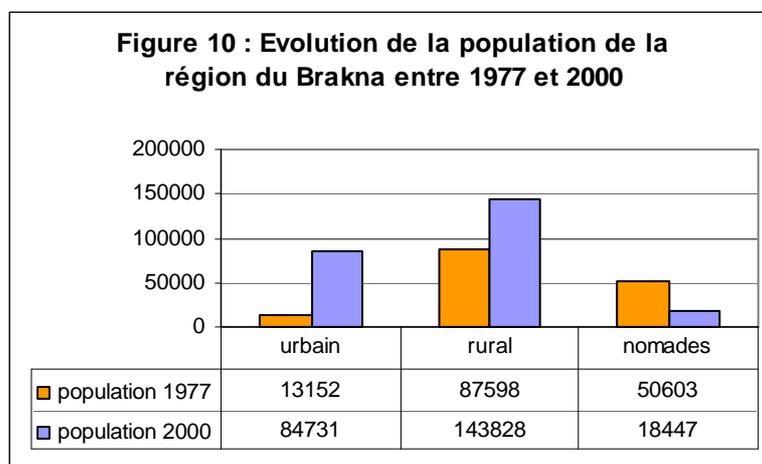
On peut observer sur la figure 9 que le Brakna a un peuplement très hétérogène. S'il y a de fortes concentrations de population au Sud-Ouest de la Wilaya, c'est en raison de la proximité du fleuve Sénégal qui assure notamment une bonne ressource en eau et qui permet donc un développement important des activités agricoles et des activités économiques en général.

Au Nord-Est du Brakna on peut s'apercevoir en revanche de l'absence quasi-totale de villages mis à part Tamassoumit à l'extrême Nord et El Tizi au Nord-Est. Les conditions de vie sont difficiles sur ces territoires des marges sahéliennes ne disposant que de très peu de ressources en eau. Entre ces deux extrêmes, on observe une zone intermédiaire où les ressources hydriques ne sont pas totalement absentes mais où elles ne sont pas réparties de façon homogène. Deux des plus importantes communes de ce territoire intermédiaire de la Wilaya du Brakna sont Aleg et Maghta Laghar, situées à proximité de zones humides remarquables.

On peut donc s'apercevoir du rôle des ressources en eau dans la localisation des populations dans le Brakna. Leur disponibilité n'est pourtant pas l'unique facteur explicatif de la répartition de la population, qui, pour une partie, est installée le long des principales voies de communication.

A titre d'exemple, on peut évoquer l'évolution démographique de la ville d'Aleg. Le taux d'accroissement de la population qui était de 4,3 % entre 1973 et 2000 peut être expliqué essentiellement par deux facteurs : la sédentarisation des tribus nomades maures en lien avec la phase de sécheresse débutée en 1968 mais aussi en raison d'un fort taux de natalité. Depuis 2002, et à l'image de l'ensemble de la Mauritanie, le taux d'accroissement de la population d'Aleg a encore augmenté et là c'est la natalité qui explique la totalité du phénomène même si on ne dispose pas de chiffres récents fiables.

La figure 10 montre parfaitement l'explosion démographique dans le Brakna, tant au niveau urbain que rural.



Source : (ONS, 2000)

La population urbaine a plus que sextuplé en moins de 25 ans. C'est la caractéristique démographique la plus remarquable en Mauritanie en général et au Brakna en particulier. Ceci va même bien au-delà et concerne le Sahel tout entier. P. OZER indiquait à ce sujet en 2000 « *L'évolution de la population urbaine des pays du Sahel, dont l'augmentation moyenne est de 571 % en 37 ans (ndrl : de 1961 à 1997), est due en grande part à l'exode rural massif des « victimes de la sécheresse » ou victimes de la pauvreté » ou « réfugiés environnementaux » ou encore « victimes de la désertification »*⁶.

La population rurale a, quant à elle, augmenté de 30 % ce qui est également considérable. En parallèle on peut observer une très large diminution du nombre de nomades ce qui concourt à la forte augmentation des populations urbaines et rurales comme nous l'avons évoqué plus haut. Pierre Ozer précise qu' « *On ne s'étonnera dès lors pas de noter que l'augmentation de la population urbaine dépasse les 2000 % de 1961 à 1997 en Mauritanie où, il y a moins de quarante ans, la population nomade représentait plus de 95 % de la population totale »*⁷.

⁶ OZER, P, 2000. *Les lithométéores en région sahéenne*, p. 25.

⁷ OZER, P, *ibid*, p. 25.

Nous ne possédons pas de chiffres précis concernant l'évolution des populations urbaines, rurales et nomades dans le Brakna depuis l'an 2000 mais une pratique régulière de cet espace depuis 2003 nous laisse à penser qu'il y'a une accentuation de ce phénomène.

III.2. L'agriculture

Les activités humaines en Mauritanie sont à dominante agricoles. Ce secteur occupe 52 % de la population active (FAO/Aquastat 2005). Ces activités se composent principalement de l'agriculture et de l'élevage. Du fait des contraintes climatiques et du manque de ressources naturelles.

III.2.1. Au niveau national

Comme l'indique un rapport du PNUD de 2000⁸, « *La part du secteur rural dans la formation du PIB a été en moyenne de l'ordre de 21 % sur la période 1990-1999. Sur cette période la progression de ce secteur a été relativement faible : 19,8 % en 1990 et 22,6 % en 1999* ».

D'après les données Aquastat de la FAO utilisant des données de 2003⁹, la valeur ajoutée du secteur agricole en pourcentage du PIB national n'était plus que de 19,3 %. Si une progression de l'activité agricole avait pu être enregistrée dans les années 1990 en Mauritanie, il semblerait qu'au début des années 2000 ce ne soit plus le cas, et on constate même un recul sensible de 22,6 % en 1999, à 19,3 % quatre ans plus tard. L'année 2003 a été affectée par un très large déficit pluviométrique¹⁰ ce qui peut expliquer ce fléchissement de l'apport du secteur agricole au PIB. Il convient de préciser que les chiffres de l'ONS (Office National de la Statistique de la Mauritanie) sont légèrement plus élevés que ceux de la FAO auxquels nous avons préféré nous référer.

Si l'on considère que la contribution du secteur agricole (élevage et agriculture) représente 20 % du PIB¹¹ de la Mauritanie, il convient de noter que l'agriculture au sens strict

⁸ PNUD/FAO, 2000. *Rapport de la consultation sur le thème: agriculture et lutte contre la pauvreté*. PNUD/FAO, 41 p.

⁹ FAO, 2005. *Tables Aquastat*, 3 p.

¹⁰ SAM, Société des Aéroports de Mauritanie, données pluviométriques, journalières, mensuelles et annuelles de 1940 à 2007.

¹¹ PNUD/FAO, *op cit*, p 6.

n'en représente que 5 % contre 15 % pour l'élevage. Dans un pays où 52 % de la population active travaille dans le secteur primaire, le fait que l'agriculture ne représente que 5 % du PIB souligne le manque criant de productivité et de rentabilité de ce secteur.

Le potentiel agricole est très inégalement réparti sur le territoire de la Mauritanie. Les quatre Wilaya du sud (Trarza, Brakna, Gorgol et Guidmakha) représentent 12 % de la superficie totale du territoire national, mais possèdent 59% des superficies cultivables du pays et la quasi totalité des terres irriguées¹².

Si la figure 11 ci-après prend en compte de manière assez précise les relations existant entre ressources hydrologiques et agriculture dans le sud de la Mauritanie, on peut s'étonner de la typologie du régime des pluies détaillée par D. Retailé (1998).

Celui-ci distingue en effet deux zones limites, l'une où l'agriculture est conduite sous pluie régulière et l'autre sous pluie aléatoire. Cette distinction est discutable selon nous pour deux raisons :

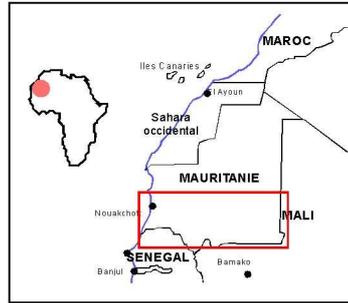
- En Mauritanie, toutes les pluies sont irrégulières parce que la saison des pluies est conditionnée à la remontée du front intertropical. Selon les années ce front remonte plus ou moins haut en latitude et conditionne différemment la pluviométrie.
- Après 1980, on observe une diminution accrue des jours de pluie et une augmentation des pluies extrêmes.

Nous développerons ces données lors du chapitre III car cela concerne une large partie du travail de cette thèse.

La distinction entre agriculture sous pluie régulière et agriculture sous pluie aléatoire n'a donc pas lieu d'être. On peut au contraire considérer qu'il n'existe qu'une seule zone où l'agriculture se développe sous pluie irrégulière.

¹² <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Counprof/Mauritania/mauritaniaFR.htm>, 01/09/2007.

Figure 11 : Répartition et typologie de l'agriculture et du pastoralisme dans le Sud mauritanien d'après Retailé 1995



III.3. L'agriculture au Brakna

En revanche si les limites sont sujettes à discussion, différentes catégories de types d'agriculture représentés nous paraissent assez juste et indiquent avec précision que la zone du bassin versant de Mâle et d'Aleg accueille une agriculture derrière barrages qui est principalement une agriculture de décrue.

Il existe également sur cet espace d'étude, de nombreuses dépressions naturelles servant de zone d'abreuvement du bétail durant la saison des pluies. Le mode de fonctionnement hydrologique des dépressions sera largement traité ultérieurement.

Le potentiel agricole du Brakna est très important à l'échelle de la Mauritanie puisque les terres agricoles couvrent 81,8 milliers d'hectares (Tab.2). Seule la Wilaya du Gorgol possède des surfaces agricoles très légèrement supérieures avec 88,3 milliers d'hectares contre 81,8 pour la Wilaya du Brakna.

Tableau 2 : Surfaces agricoles du Brakna et de la Mauritanie

Unité Administrative	Superficie Km ²	Surfaces (milliers d'hectares)				TOTAL (milliers d'hectares)
		Pluviale	Décrue	Oasis	Irriguée	
Brakna	33 000	13	19,1	0	49,7	81,8
Mauritanie	1 030 700	220	139,1	5,5	137,4	502

Source : Nation Unies 2001

Le Brakna possède 3,2 % de la superficie du pays et 16,3 % de ses surfaces agricoles. Ici, encore seul le Gorgol a un ratio supérieur. Ces chiffres montrent bien l'importance du Brakna dans la production agricole du pays, et celle des potentialités qu'il représente et donc la nécessité de comprendre le fonctionnement du territoire.

III.3.1. Les cultures de décrue derrière barrage

Le barrage est typique de cette forme d'agriculture. Celui de la photo 1 est situé dans la région du Brakna, sur le bassin versant du lac d'Aleg, à une vingtaine de kilomètres du lac de Mâle. Plusieurs de ces petits barrages ont été construits sur l'oued Ketchi, avec l'aide de l'Union Européenne qui a financé ces projets de développement. Sur le bassin versant du lac de Mâle, on ne trouve qu'un gros barrage en béton, celui de Mâle lui-même. Ces cultures sont

liées au régime hydrologique du lac d'Aleg et de Mâle. Au fur et à mesure de la décrue de la surface en eau, les sols limono-argileux très fertiles de la cuvette sont mis en culture.

Photo 1 : Barrage sur le bassin versant d'Aleg (31/08/06)



Source : J. GASSANI

Les barrages, qu'ils soient petits ou grands comme à Mâle ne sont pas destinés à constituer des retenues maintenues en eau et disposant de pompes. Le niveau d'eau est en fait géré pour la culture de décrue. En saison des pluies, les habitants laissent les terres recouvertes par l'eau s'imprégner suffisamment et ensuite ils vident la retenue pour pouvoir mettre les terres en culture. Le gaspillage de la ressource est donc à la base considérable.

Photo 2 : Barrage et lac de Mâle



Source : J. GASSANI

août 2006

Au fur et à mesure que les eaux se retirent (à partir du mois d'octobre), les agriculteurs commencent par enlever à la main la végétation aquatique qu'ils mettent en tas et qui servira de fourrage pour le bétail. Puis ils plantent, principalement du sorgho, et procèdent à la mise en défens en installant des clôtures pour protéger leurs cultures contre du bétail.

La production à l'intérieur de ces petits périmètres est très diversifiée. On y cultive le sorgho mais aussi des haricots, des pastèques, et du maïs, ainsi qu'aubergines, des tomates, des laitues et des carottes.

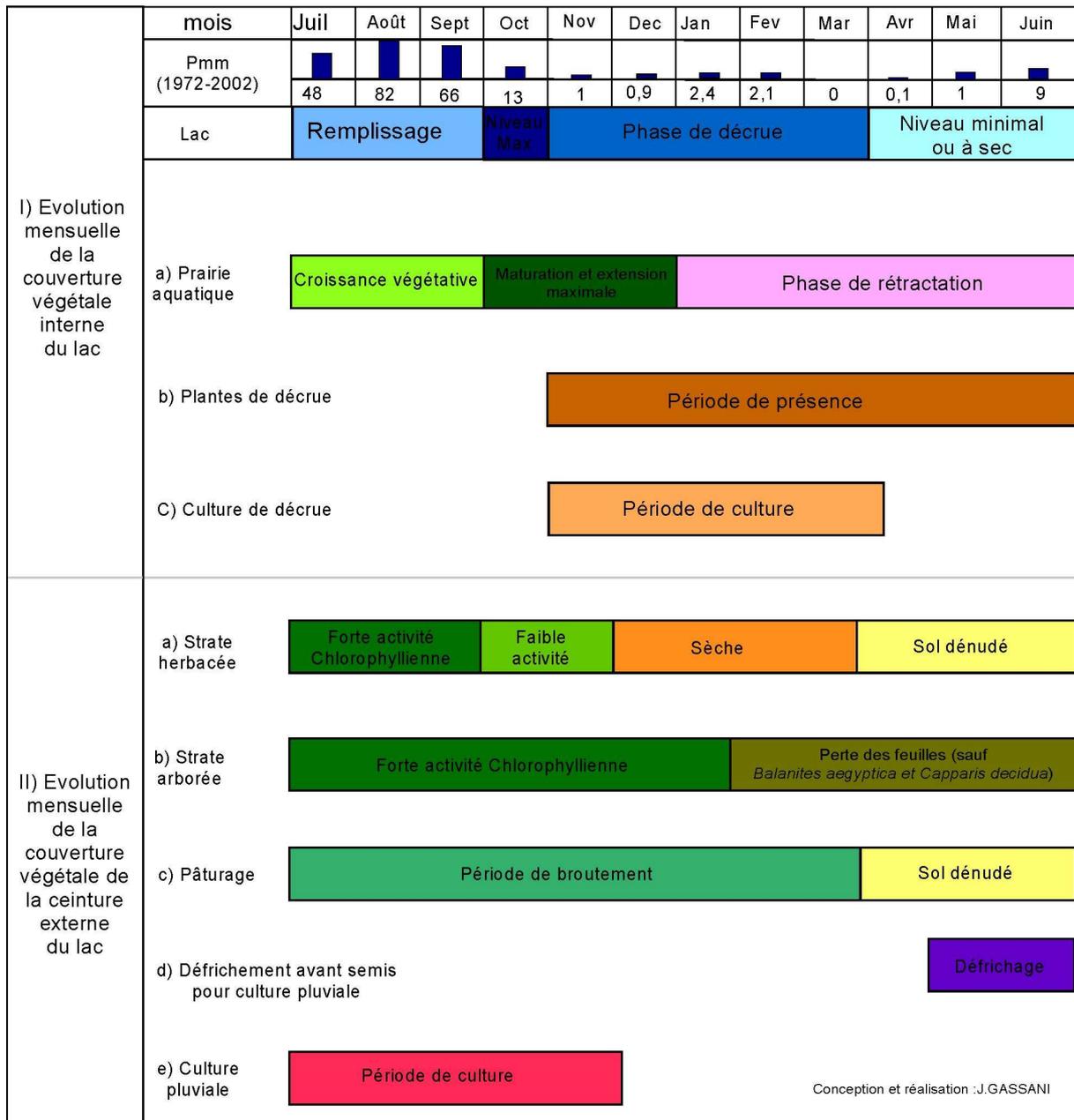
Les surfaces de culture sont toutefois très restreintes par rapport à celles que l'on peut observer au lac d'Aleg. Le lac de Mâle a seulement en effet, un volume de stockage de 13 650 000 m³ contre 66 millions de m³ pour le lac d'Aleg.

III.3.2. Dynamique saisonnière intra-annuelle de la végétation du lac d'Aleg

Le régime climatique de la zone du Brakna se résume à deux saisons : la saison humide (l'hivernage) qui dure environ trois mois, de juillet à septembre, et ensuite la saison sèche tout le reste de l'année.

La végétation évolue donc en fonction de ces rythmes saisonniers. Durant l'hivernage, la couverture végétale est en pleine expansion alors qu'elle se retrouve cantonnée principalement dans et sur le pourtour du lac et dans les lits des oueds durant la saison sèche.

Figure 12 : Schéma de la dynamique de l'eau et de la végétation des lacs du Brakna



III.3.2.1. Dynamique de la végétation des ceintures internes des lacs

Ces formations végétales sont localisées dans les secteurs inondables des cuvettes endoréiques des zones humides du Brakna (Aleg, Mâle, Maghta Lajhar, etc..). Elles évoluent dans le temps et dans l'espace, au cours d'un cycle annuel, depuis la mise en eau des lacs jusqu'à leur tarissement.

L'évolution de la couverture végétale dans ces dépressions est basée sur la hauteur de la lame d'eau et de ses variations durant l'année. Nous allons prendre ici l'exemple du lac d'Aleg qui est de très loin le plus vaste des lacs du Brakna (Fig.13).

Le remplissage commence dès les premières fortes pluies. La lame d'eau augmente régulièrement du fait des précipitations et des apports de la crue de l'oued Ketchi, la zone inondée atteignant son extension maximale en début octobre.

Cet apport d'eau contribue au démarrage de l'activité végétative des hydrophytes¹³ dont les tiges deviennent très épaisses et forment une ramification dense. Au maximum de l'inondation, les feuilles s'élèvent au dessus de l'eau et forment une couverture dense dominée par le *Nymphéa lotus* qui couvre de vastes superficies et l'*Ipomea aquatica* caractérisée par son épaisse biomasse verte.

Ces formations végétales créent une prairie aquatique couvrante et en pleine activité à partir d'octobre pendant les hautes eaux. Le maintien de la surface en eau permet donc au lac de garder une végétation verte toute l'année.

¹³ “Les Hydrophytes sont des plantes sous-ligneuses qui vivent dans des terrains inondés. Les hydrophytes sont flottants ou nageants. Les uns et les autres peuvent être fixés au fond ou bien libres d'enracinement” Encyclopaedia Universalis, 1999, *op cit*, p. 684-690.



Au fur et à mesure de la décrue, qui commence dès le mois de novembre (Fig.13), on observe une rétraction de cette prairie vers l'intérieur de la zone humide et il apparaît alors deux ceintures :

- La première est formée de plantes annuelles rarement inondées se compose de *Bergia suffruticosa*, *Alternanthera sessilis* et *Glinus lotoides* sur sol sablo-limoneux.
- La deuxième est composée de plantes d'émersion qui envahissent les rives argilo-limoneuses saturées en eau. On y retrouve ainsi le *Sesbania rostrata*, *Cynodon dactylon*, *Ammania senegalensis*.

Ces herbacées hygrophiles, une fois exondées, vont être broutées par les troupeaux de décembre à mars. Fin mars, il ne subsiste pratiquement rien de cette végétation qui se déplace en suivant la décrue. A la fin de mai-début juin, elle ne subsiste plus qu'autour des derniers points d'eau.

Au fur et à mesure du retrait de l'eau, la végétation dans cette ceinture s'assèche et il se forme alors une strate d'herbacées sèches.

III.3.2.2. Dynamique de la couverture végétale de la ceinture externe du lac

Cette partie exondée, rarement atteinte par les eaux du lac, est caractérisée par une savane sahélienne arborée dense.

Si l'on exclut toute intervention anthropique, les variations annuelles de ces formations herbacées et ligneuses dépendent de l'abondance et de la distribution temporelle des pluies qui détermine leur cycle végétatif (Courel, 1984). Un cycle d'années en fort déficit pluviométrique peut provoquer une forte mortalité des arbres et donc amener à un net appauvrissement de cette couverture végétale.

Les espèces herbacées comme *Cenchrus biflorus* ont un cycle végétatif très étroitement lié aux précipitations. Elles germent, croissent et fructifient en l'espace de deux mois et demi. Elles commencent à pousser à partir des premières pluies du mois de juillet (Figure, 13. a). Ce tapis herbacé vert a alors une forte activité chlorophyllienne jusqu'au mois d'octobre au moment de la floraison et de la fructification, après laquelle il commence à

sécher. En s'asséchant, cette strate herbacée prend au début du mois de décembre une teinte jaune pâle.

Elle disparaît pratiquement ensuite vers avril, à cause du surpâturage et du débroussaillage, qui s'effectue deux mois avant les semis.

Les espèces végétales de la ceinture externe sont donc peu hydromorphes et sont plus dépendantes du climat tandis qu'au niveau des ceintures internes du lac, le type et l'état de la végétation dépend plus de la hauteur de la crue annuelle.

III.3.3. Les cultures derrière diguettes

De nombreuses diguettes ont été aménagées en amont du lac de Mâle, sur le cours de l'oued Leye. Elles sont réparties de façon hétérogène sur l'ensemble du bassin versant, même si elles sont surtout concentrées au Nord-Est du bassin.

Photo 3 : Diguette (1 km à l'Est de Mâle)



le 10 juillet 2005 avant le début de la saison des pluies

Au moment de la décrue, les eaux ne sont retenues que peu de temps derrière ces ouvrages, un mois tout au plus. Ensuite, ces retenues sont vidangées pour mettre les semis, la période des cultures débutant en octobre et se poursuivant jusqu'en décembre.

La production à l'intérieur de ces petits périmètres est moins diversifiée que derrière les barrages. On y cultive des haricots, des pastèques, des carottes, du mil et du sorgho.

Photo 4 : Cultures derrière diguettes



Culture de pastèques, le 25 septembre 2005

Les populations riveraines du lac rendent la multiplication de ces diguettes responsable de la baisse du niveau du lac. Cependant, aucune indication chiffrée n'existe et ces assertions ne peuvent être vérifiées pour le moment. Ce point fera l'objet de développements ultérieurs dans le chapitre V car notre travail a permis de faire avancer les connaissances sur ce point.

Une cinquantaine de diguettes ont ainsi été aménagées dans les années 80 sur le bassin versant du lac de Mâle par des gens qui ont abandonné les cultures aux abords des lacs de Mâle et d'Aleg pour gagner en liberté et en autonomie.

Ces micro-retenues ont des volumes de stockage très variables allant de quelques milliers de m³ au minimum à 30 000 m³ au maximum. La moyenne de stockage y'est d'environ 11 000 m³. Ces données résultent d'observations personnelles, réalisées lors des missions sur le terrain et que nous développerons dans le chapitre IV.

III.3.4. Les dépressions naturelles

Les dépressions naturelles qui sont de deux types, les tamourts et tachourts sont une des originalités morphologiques et hydrologiques de la région. Elles constitueront dans les chapitres suivant le cœur de ce travail de recherche.

Le terme de tamourt désigne, en hassanya, une cuvette retenant un volume d'eau durant un laps de temps de quelques semaines à quelques mois après la fin de la saison des pluies. Il s'agit de dépressions de tailles variées, pouvant atteindre quelques centaines de

mètres de diamètre qui collectent les eaux de ruissellement en saison des pluies, ainsi que les matières en suspension fines qu'elles transportent (photo 5).

De la même façon que les oueds, les tamourts, qui concentrent l'humidité dans des sols argilo-limoneux, sont colonisées par des formations arborées constituées d'*Acacia nilotica*, de *Zizyphus mauritania* et secondairement de *Balanites aegyptica*, qui contrastent avec les espaces environnants à végétation clairsemée. Ces tamourts se reconnaissent également par leur forme plus ou moins circulaire.

Les tachourts sont quant à elles (photo 6) des micro-dépressions caractérisées par une profondeur de moins d'un mètre, une largeur pouvant atteindre quelques mètres, et une longueur pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres. Elles sont allongées dans le sens des écoulements. La tête des tachourts à l'amont, peut être abrupte ou à pente douce et elles peuvent s'interrompre tout aussi brutalement à l'aval. Les bords sont également très abrupts. Formées d'un chenal simple ou hiérarchisé, elles montrent également des irrégularités de profondeur, avec des seuils et des bas fonds. Elles sont donc beaucoup plus petites que les tamourts et ne concentrent pas de végétation arborée.

Les tachourts ont un fonctionnement saisonnier lié aux écoulements dans les oueds, conservant de l'eau libre quelques semaines après les crues de la saison des pluies alors qu'elles sont totalement à sec le reste de l'année. Observées que sur une période de 3 ans, elles semblent être relativement stables d'une année sur l'autre.

Les capacités de stockage des tamourts varient considérablement. La plus vaste est capable de stocker 300 000 m³ d'eau, les plus petites quelques milliers de m³ alors que le volume moyen stocké est de 15 000 m³.

La capacité de stockage des tachourts est relativement homogène, autour de 1000m³.

Photo 5 : Une *tachourt* à l'Est de Mâle



mars 2006



début août 2005

Source : J. GASSANI

Ces dépressions ne sont pas mises en culture. Elles constituent pourtant dans cet espace peu arrosé, de précieuses ressources en eau qui pourraient être utilisées ponctuellement pour une irrigation de proximité. Le bétail s’y abreuve un peu. Les dépressions naturelles représentent pourtant, à notre sens, un potentiel hydrologique considérable.

Photo 6 : Une *tamourt* à l’Est de Mâle



mars 2006



début septembre 2006

Source : J. GASSANI

III.3.5. Les cultures pluviales ou dièri

Elles se pratiquent pendant la période de l’hivernage quand les pluies tombent de juillet à octobre. Ce type d’agriculture n’est possible qu’à partir d’environ 200 mm de précipitations. Elles sont donc très dépendantes des conditions climatiques qui rendent très irrégulières et aléatoires les récoltes en arachide, niébé (*Vigna unguiculata*), pastèques (*Citrullus lanatus*), oseille de Guinée (*Hibiscus sabdariffa*) niabé, sorgho etc.

D’après la FAO (2007) : “*Prépondérantes dans la production nationale, les cultures pluviales ne couvrent cependant selon les années que 13 à 30 pour cent des besoins du pays. On estime que 80 % de cette production est auto-consommée. Sa contribution au PIB est insignifiante et tend à décroître*”¹⁴.

On peut observer sur la photo 7 des cultures pluviales de mil, assez rares dans ce type d’agriculture.

¹⁴ <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Counprof/Mauritania/mauritaniaFR.htm>, 01/00/2007

Photo 7 : Cultures sous pluie à l'ouest de Mâle



Source : J. GASSANI

Culture de mil, septembre 2006

A titre d'exemple, la culture sous pluie sur le bassin versant du lac de Mâle n'a été possible, au cours des cinq dernières années, qu'en 2002, 2005 et 2006, soit pratiquement une année sur deux seulement, du fait du déficit pluviométrique enregistré les autres années.

III.3.6. Les cultures maraîchères irriguées

Elles se situent à proximité du barrage de Mâle. Ces petits jardins sont entretenus principalement par les villageoises (des haratines de la tribu des Torkozs) de Jedida (Photo.8).

Photo 8 : Cultures maraîchères en aval du lac de *Mâle*



Source : J. GASSANI

mars 2006

Les cultures qui débutent au mois d'octobre et qui se terminent en avril, sont irriguées à partir de puisards creusés dans le lit de l'oued. On y produit surtout des aubergines, des tomates, des laitues et des carottes vendues sur le marché de Mâle.

III.3.7. L'élevage

L'élevage tient une place centrale dans l'économie agricole mauritanienne car il représente 55 % du PIB agricole en 2005¹⁵, le secteur primaire représentant quant à lui 25 % de l'ensemble du PIB mauritanien. Alors qu'en 1995 l'élevage représentait 41 % du secteur primaire, il en représentait plus de 57 % en 2000. Depuis l'an 2000 la part relative de l'élevage dans le secteur agricole a légèrement diminué, alors qu'en valeur absolue elle a notablement augmenté : 35 105 millions d'Ougiyas en 2000 contre 37 812 en 2005.

La présence de l'eau et de la végétation fait des différents lacs du Brakna en général, et du lac de Mâle en particulier, un espace propice au regroupement de nombreux troupeaux itinérants pendant la période d'hivernage. On observe aussi un élevage sédentaire à la périphérie du lac « imposée » par les conditions du milieu, trop difficiles pour l'agriculture.

III.3.7.1. L'élevage familial sédentaire

Cet élevage est pratiqué par les populations qui habitent à proximité du lac dans la ville de Mâle ou dans les villages situés aux alentours. Ce sont de petits troupeaux constitués de quelques têtes de bétail, composés essentiellement d'ovins et de caprins et de quelques bovins (Photo 9). Chaque jour au petit matin, ces troupeaux s'acheminent vers le lac, même si certains animaux restent près de la ville.

Photo 9 : *Elevage sédentaire près de Mâle*



juillet 2006



septembre 2006

Source : J. GASSANI

¹⁵ Office National de la Statistique de Mauritanie, Décembre 2006. *Annuaire Statistique 1995-2005*. ONS, 144 p.

Le développement de cet élevage de type familial ces dernières décennies, en liaison avec la sédentarisation, a accru la pression sur les pâturages qui se fait sentir principalement sur les peuplements d'herbacées les plus proches des zones d'habitations.

On observe ainsi un phénomène de dénudation auréolaire du sol dû au surpâturage autour des villages, laissant la place au seul *Calotropis procera*, plante qui n'est pas broutée par le bétail à cause de sa toxicité.

Certaines personnes qui ne sont pas de Mâle et qui viennent de l'ensemble du Brakna, amènent également leur troupeau dans le bassin.

III.3.7.2. La transhumance

C'est l'équivalent d'un nomadisme qui se fait sur de courtes distances. En effet, suite à la sédentarisation des anciens nomades, une part du troupeau est confiée à certains membres de la famille ou à des bergers qui les conduisent vers les pâturages pendant quelques mois sur des distances ne dépassant pas cinquante kilomètres. Dans ces troupeaux familiaux, on compte quelques têtes de bétail appartenant à des sédentaires d'Aleg.

III.3.7.3. Le nomadisme

La nécessité d'abreuvement fréquent des troupeaux et l'obligation d'utiliser des pâturages toujours verts amènent les éleveurs nomades et leurs familles à des déplacements fréquents. Ce mode de vie tend à disparaître pour laisser place à la sédentarisation des tribus. Cette migration, lorsqu'elle s'effectue encore, se déroule dans deux directions principales :

- Du Sud vers le Nord : pendant la saison des pluies, à partir de juillet, les nomades prennent la direction du Nord, pour profiter de l'important tapis herbacé de graminées annuelles qui prolifèrent pendant l'hivernage.

Photo 10 : *Nomade, à l'Est de Mâle*



Source : J. GASSANI

mars 2003

- Du Nord vers le Sud : à la fin de la saison des pluies, vers octobre, ils conduisent leur bétail vers les régions du sud (Brakna, Gorgol) où l'on trouve de meilleurs pâturages qui se sont développés après les importantes précipitations.

L'année 2006, qui a été très pauvre en précipitations, a vu la contraction des zones de pâturage disponibles. Le bétail des autres régions de Mauritanie ne s'est pas arrêté à Aleg et a traversé les frontières du Sénégal et du Mali à la recherche de meilleurs pâturages.

Conclusion partielle

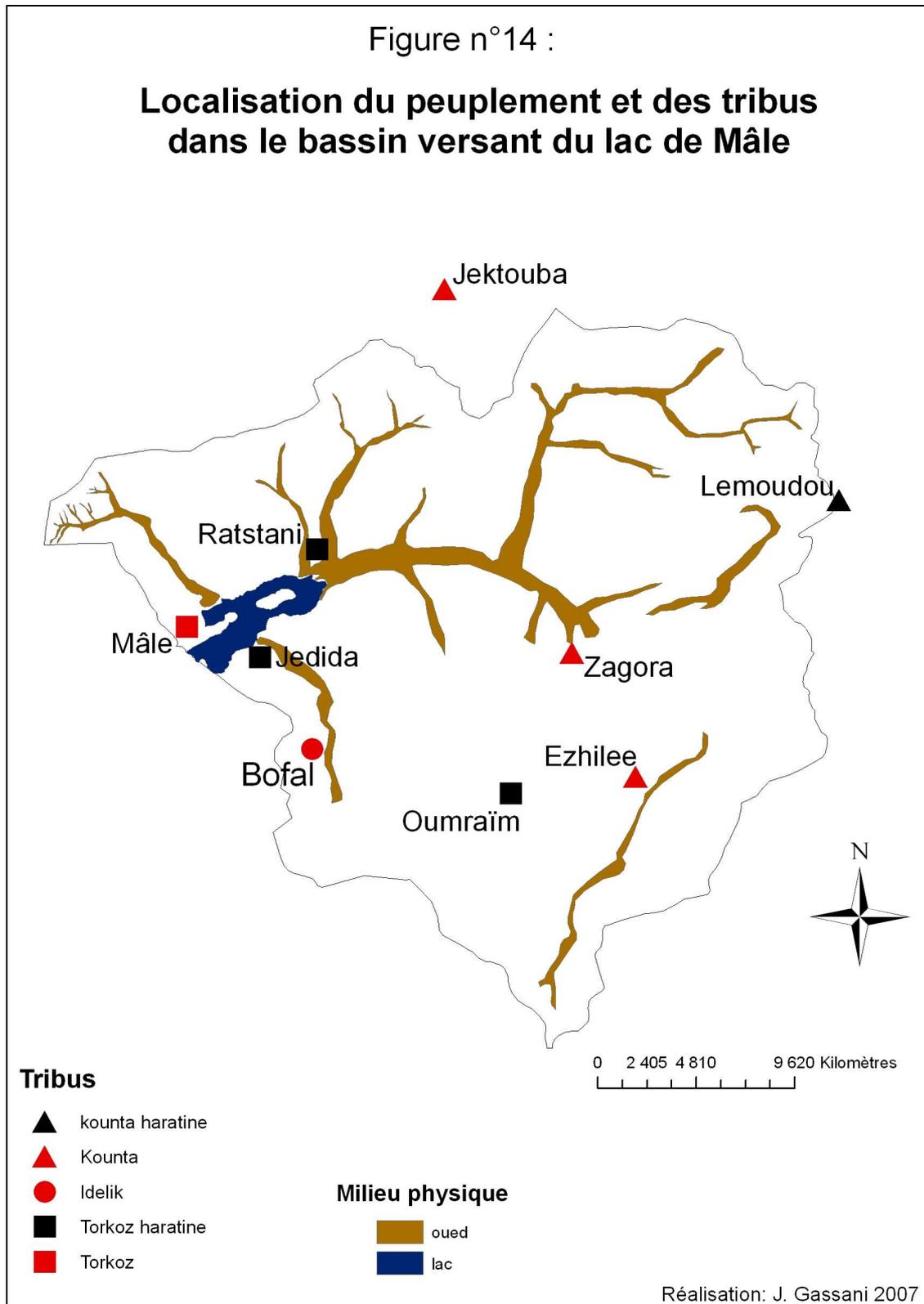
La présence de ces zones humides dans la région du Brakna, est un véritable enjeu vital dont on peine à apprécier l'ampleur. La forte croissance démographique associée à une importante pression du bétail sur le milieu, rend la gestion intégrée de ces ressources en eau primordial pour l'avenir.

On dénombre la présence de trois tribus différentes sur le bassin versant de Mâle (Fig.14). Les Torkoz qui sont des maures blancs implantés dans l'Ouest du territoire, en particulier autour du lac, les Kountas, des maures blancs également installés dans la partie orientale de l'espace d'étude et enfin les Ideliks, maures blancs, peu nombreux, installés au Sud du lac de Mâle.

Il existe de subtiles distinctions au sein même de ces tribus. Certains villages ont été construits par des anciens esclaves affranchis des tribus Torkoz et Kounta, les haratines, d'origine négro-africaine. Leur affranchissement est survenu il y a à peu près une vingtaine d'années. Ils ont bâti des villages à distance des villages originels de leur tribu pour se défaire de la domination de leurs anciens maîtres maures, même si de forts liens existent encore entre eux.

Depuis une vingtaine d'années, on enregistre des conflits générés par la gestion des ressources en eau sur le territoire de la Wilaya du Brakna et sur le bassin versant de Mâle. En 1987, un conflit a ainsi opposé la population de Zagora (située à 20 km à l'Est de la ville de Mâle) au gouvernement central de la Mauritanie, qui a dépêché des militaires pour résoudre une situation conflictuelle liée à la gestion de l'eau sur le bassin versant. Ces derniers étaient venus à la demande des habitants de Mâle (membres de la tribu des « Torkoz ») pour détruire la digue érigée par les habitants du village de Zagora (membres de la tribu des « Kountas ») sur un des bras des bras principaux de l'oued alimentant le lac. La digue permettait aux Kountas d'augmenter de façon notable les surfaces cultivées mais les Torkoz se sont plaints que le remplissage du lac de Mâle souffrait de l'aménagement de cet ouvrage situé en amont. Si la venue des militaires a permis la destruction de l'ouvrage au détriment des Kountas et au bénéfice des Torkoz, il subsiste toujours des tensions évidentes entre ces deux communautés.

Les Kountas utilisent toujours une grande tamourt et ont développé des cultures derrière diguettes sur l'oued Leye.



En 2003 deux jeunes agriculteurs¹⁶ ont été tués dans le Bassin du Magtha Laghar à cause d'un conflit lié à la gestion de l'eau dans la dépression. Le problème est loin d'être réglé et devrait être pris en compte plus efficacement par les autorités locales.

Sur le bassin versant du lac de Mâle il y'a encore d'autres problèmes, engendrés par les spécificités du droit du sol en Mauritanie actuellement.

Les Haratines, qui cultivaient pour le compte des maures blancs les grandes dépressions comme celle du lac de Mâle ou celle du lac d'Aleg, ont cessé leur activité au milieu des années 1980, à cause de la rudesse des conditions de vie et de travail. Ils ont créé leurs propres villages formés de campements situés à une dizaine de kilomètres. La conséquence de ces micro-migrations est que la tribu des Torkoz ne dispose maintenant plus de la totalité de sa main d'œuvre corvéable.

Les Haratines qui cultivent les bords du lac de Mâle sont tenus de reverser la moitié de leur production aux maures blancs de Mâle de la tribu des Torkozs. Cette survivance de pratiques anciennes, qui manquent notablement d'équité entre le travailleur de la terre et son propriétaire, engendre des situations si difficiles qu'elles ne peuvent se terminer que par une migration vers une partie éloignée du territoire du lac. C'est pour cela que les Haratines cherchent à se disperser sur le bassin versant pour exploiter des diguettes.

Les Haratines vivent uniquement de cultures maraîchères développées grâce aux diguettes. Leurs conditions de vie sont difficiles et directement liées à la pluviométrie annuelle. Ils sont donc considérablement exposés aux risques de sécheresse, alors qu'il existe une retenue d'eau stable à proximité mais dont le droit du sol rend difficile une gestion harmonieuse et partagée.

Il y a une vingtaine d'années, la Mauritanie dès 1986 et le Sénégal puis le Mali dans un second temps, ont mis en place des législations foncières afin de définir des nouvelles conditions d'accès à la terre. L'Etat est devenu à ce moment-là propriétaire du patrimoine foncier.

¹⁶ Entretien avec le Hakem (Préfet) de Mâle, juillet 2006.

Ces dispositions sont restées lettres mortes car il n'existe pas de volonté villageoise de partage de la propriété foncière. Les Maures blancs ne possèdent pas la pratique de l'agriculture. Ils ont en outre besoin de main d'œuvre et leur conception du système tribal les pousse à refuser le système classique d'emploi rémunéré d'une main d'œuvre agricole. Une partie de ces maures blancs sont sédentarisés sur ce territoire depuis les années 1950 et la construction du barrage en 1957. Une autre vague de sédentarisation est survenue lors de la grande sécheresse de 1969. En tant qu'anciens nomades leur culture les pousse vers l'élevage, alors que l'agriculture n'est pas pour eux une priorité.

Les problèmes rencontrés par l'agriculture ne sont donc pas liés directement à l'abondance de la ressource en eau, mais plutôt, à la non-optimisation ainsi qu'à la gestion chaotique de la main d'œuvre potentielle et à l'application du droit de propriété. La volonté politique de développer les périmètres irrigués collectifs au Brakna existe, l'appel d'offre ci-dessous en est la preuve,¹⁷ mais elle se heurte pour l'instant au manque de volonté des villageois, Maures blancs. Les Harratines pourraient développer la culture irriguée grâce à la réserve en eau du lac de Mâle, mais ils n'ont pas accès à la terre en périphérie immédiate du lac.

La situation est donc bloquée et seule une forte volonté politique et une restructuration de la gestion du bassin versant permettrait d'améliorer la situation de l'agriculture sur cet espace ainsi que la sécurisation alimentaire des populations qui y résident.

La Wilaya du Brakna et *a fortiori*, le bassin versant du lac de Mâle sont une importante zone de transition entre l'espace du fleuve Sénégal et le Sahara. Tant sur le plan géomorphologique qu'hydrologique, les spécificités sont fortes. En matière de peuplement et de dynamique de population, le bassin versant du lac de Mâle représente également une importante zone de transition. Les tribus installées sur notre espace d'étude sont d'anciennes tribus nomades sédentarisées depuis la grande sécheresse du début des années 1970 et leur mode de vie et de subsistance à fondamentalement changé en un peu plus d'une génération.

¹⁷ <http://www.appeldoffres-mauritanie.com/aointer.html#> le 01/09/2007

« **Fourniture et installation Equipements de pompes pour périmètres irrigués**

Le ministère de l'agriculture et de l'élevage de la République Islamique de Mauritanie représentée par la Société Nationale pour le Développement Rural (SONADER) lance dans le cadre du Projet PRPB un Avis d'Appel d'Offres International, limité au pays membres de la Banque Islamique de Développement, pour la fourniture et l'installation d'équipements de pompage pour les périmètres irrigués collectifs au Brakna.

Date de dépôt des dossiers : 06 sept 2007 »

Les difficiles questions de la propriété foncière et de la gestion des ressources en eau représentent d'importants enjeux économiques et sociaux. L'irrigation n'étant pas possible en l'état sur cet espace, la question de l'optimisation de l'utilisation de la ressource devient une thématique centrale. Afin d'aborder cette question il convient tout d'abord de caractériser de façon rigoureuse la pluviométrie passée et présente de ce territoire.

Chapitre II

LES PRECIPITATIONS

Ce chapitre est dédié à la répartition et à l'évolution des précipitations dans le Sahel septentrional, et tout particulièrement en Mauritanie. Ces phénomènes climatiques en Afrique de l'Ouest ont été très étudiés ces trente dernières années (Morel, 1995 ; Ozer, 2000). On observe cependant un manque de travaux en Mauritanie (Demarée, 1990 ; Nouaceur, 1995 ; Ballouche, 2004).

L'objectif de ce chapitre est de contribuer à l'amélioration des connaissances des caractéristiques des précipitations en Mauritanie, nécessaire à la compréhension des processus de fonctionnement hydrologique du bassin versant du lac de Mâle. Nous essayerons donc sur la base de travaux précédents, ceux notamment sur le Bénin, de Gil Mahé *et al.* (2005) sur le bassin versant du Nakambé au Burkina Faso, d'Honoré Dacosta *et al.* (2002) sur le Sénégal, et de Pierre Ozer et Yvon-Carmen Hountondji (2007), d'apporter de nouvelles informations par la réactualisation jusqu'en 2004 des données de pluies journalières à l'échelle nationale, puis à l'échelle locale par le traitement sur deux ans des relevés de ces dernières collectés, sur la zone du lac de Mâle.

I. Caractéristiques générales

Le cycle annuel des précipitations observées dans le Sahel se caractérise par une longue saison sèche de plus de huit mois (octobre à mai) et une période de pluie dite « hivernage » de juin à septembre. Pour le Sahel, c'est la seule période pluvieuse de l'année. Toutes les ressources en eau en dépendent.

Ce cycle saisonnier des pluies, appelé « *la mousson en Afrique de l'Ouest* » est caractérisée par le mouvement méridien de la zone de convergence intertropicale et de la circulation atmosphérique associée.

Le Sahel reçoit la plus grande partie de ses précipitations entre juillet et septembre. Lorsque le continent se réchauffe, en été, il attire l'air qui s'est chargé en humidité au dessus du golfe de Guinée. Ce flux d'air humide remonte vers le nord et, une fois au-dessus du continent, se transforme en systèmes orageux nommées lignes de grain (du fait de leur structure frontale linéaire).

La circulation atmosphérique de la zone d'étude est commandée par deux centres d'actions (Fig.15) :

Les masses d'air tropical boréales, proviennent de l'anticyclone des Açores et se caractérisent par l'établissement de vents chauds, secs et réguliers (l'Harmattan) en provenance du Sahara qui soufflent pendant la saison sèche et durent 8 à 10 mois. Ce vent

diminue l'hygrométrie de l'air à moins de 30 % de mars à juin, avec des conséquences sur la physiologie des êtres vivants.

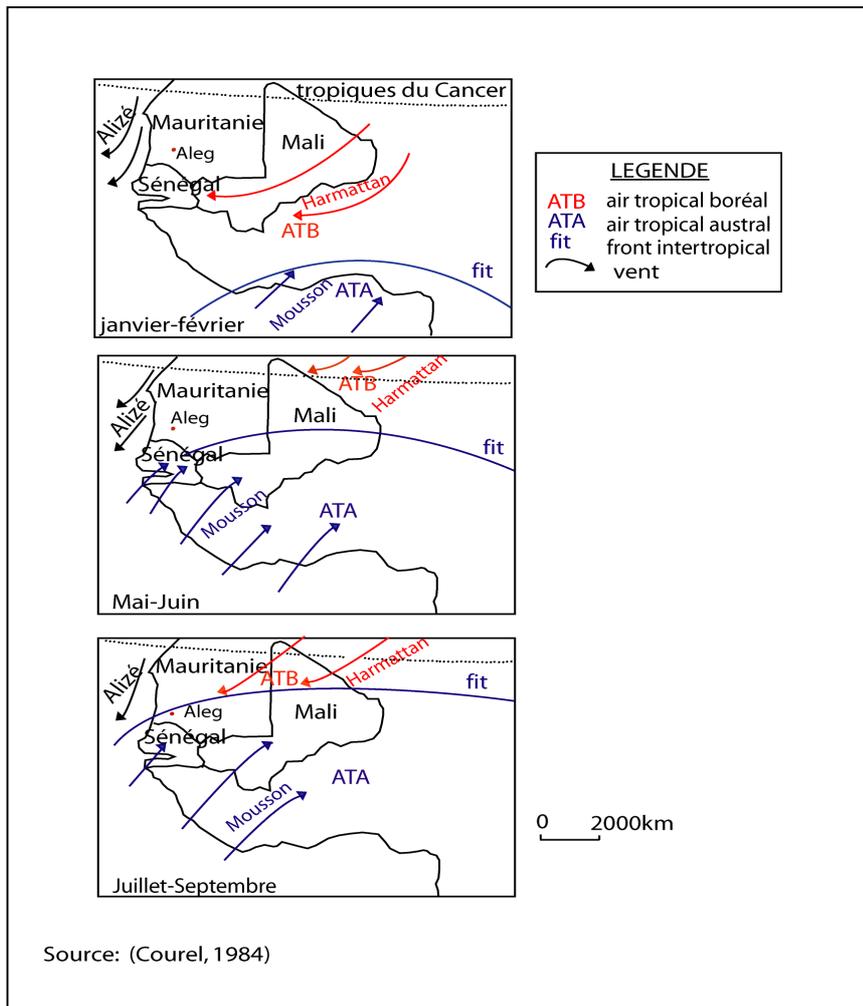
La mousson, chargée en humidité issue des masses d'air tropical australes provenant de l'anticyclone de Sainte- Hélène, souffle sur le Sud-Ouest mauritanien pendant trois mois (juillet, août et septembre). L'été, elle apporte des précipitations sur Aleg, en liaison avec la remontée du front intertropical. Puis d'octobre à février, la région est balayée à nouveau par des alizés boréaux secs et frais dus à la redescende du front intertropical.

De cela découle une forte variabilité interannuelle des pluies d'une année à l'autre selon l'ampleur de la remontée de la mousson provoquant des fortes sécheresses parfois désastreuses pour les éleveurs et leurs troupeaux.

Autour de l'équateur, l'air très échauffé est léger et s'élève, générant une zone de basse pression au sol et une zone de haute pression en altitude où l'air s'accumule et diverge en direction des tropiques. Là, il contribue à la formation des hautes pressions subtropicales (anticyclone des Mascareignes, par exemple) où l'air tend à s'affaisser. Au sol, cet air diverge en direction de la zone de basse pression équatoriale et constitue les alizés qui, déviés par la force de Coriolis, sont de secteur Nord-Est dans l'hémisphère Nord et Sud-Est dans l'hémisphère Sud. Les alizés des deux hémisphères convergent au niveau de la zone de convergence intertropicale (ZCIT). L'ascendance qui en découle entretient la zone de basses pressions équatoriales.

En matière de système de précipitation dans la zone sahélienne, la répartition totale annuelle des pluies se concentre sur cinq mois (juin à octobre). Cette période humide dite « hivernage » correspond à la remontée du front intertropical, caractérisée par des averses d'intensité variable.

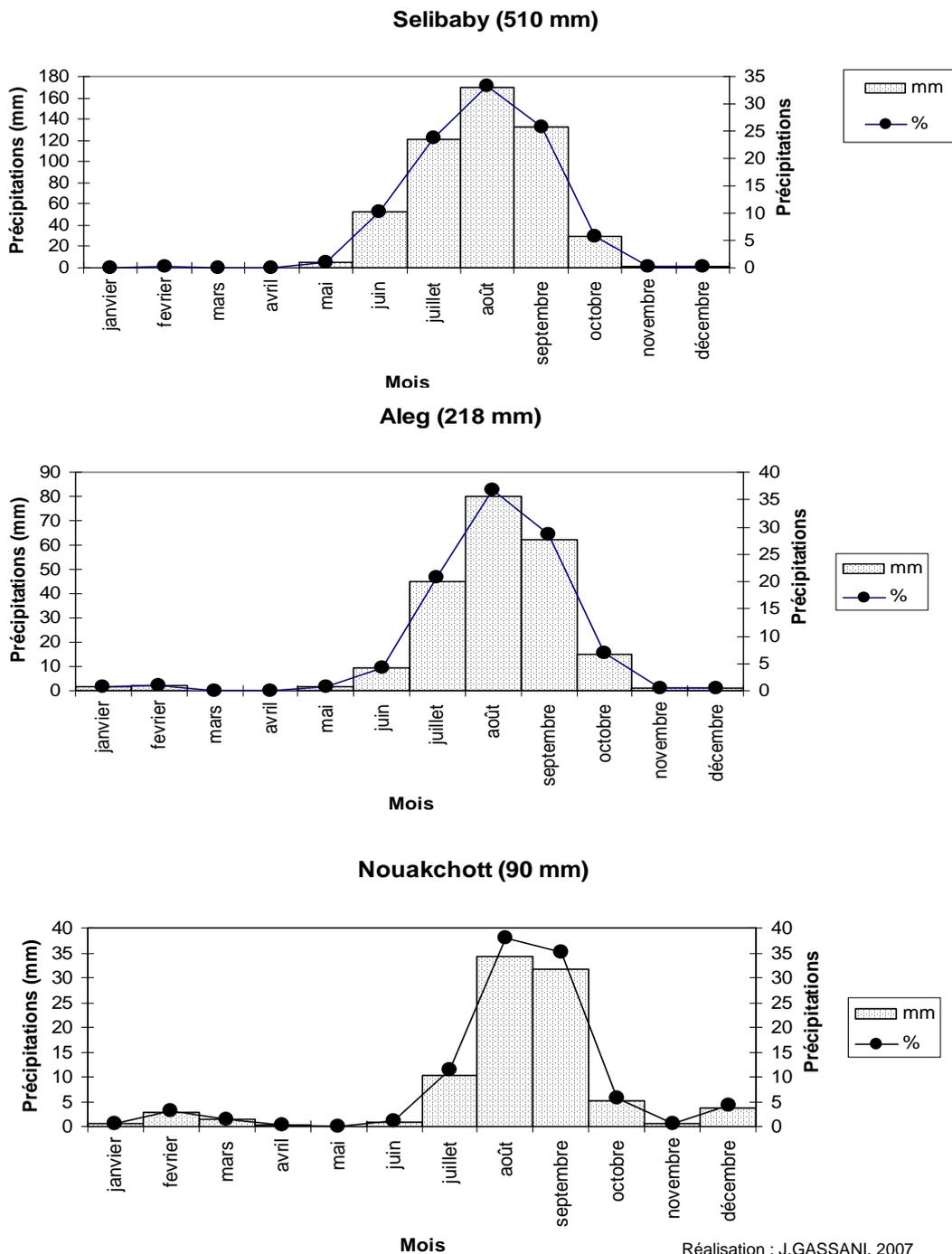
Figure 15 : Circulation atmosphérique saisonnière en Afrique de l'Ouest



La figure 16, montre la répartition des moyennes mensuelles de pluie de 1960 à 2005, dans trois stations pluviométriques mauritaniennes. Nous avons choisi ces stations afin de prendre en compte la pluviométrie consécutive à l'avancée du front intertropical lorsqu'il se déplace du Sud au Nord du pays. Les trois stations choisies sont toutefois localisées dans le Sud-Ouest du pays car le Nord et l'Est du territoire mauritanien sont peu équipés en stations pluviométriques. Ainsi, la station de Sélibaby (Fig.17) est celle située le plus au sud de la Mauritanie à la frontière avec le Sénégal. C'est la plus soumise aux précipitations avec une moyenne de 510 mm par an. Ensuite nous avons sélectionné la station d'Aleg localisée à 300 kilomètres au Nord-Ouest de Sélibaby et qui est très proche de notre terrain d'étude. Cette dernière enregistre une pluviométrie de 218 mm par an en moyenne durant la période étudiée. Enfin la dernière station choisie est celle de Nouakchott, la capitale, située au Nord-Ouest d'Aleg à une distance de 270 km. Elle reçoit 90 mm de pluie par an. Malgré la différence de

précipitations annuelles, la répartition mensuelle des pluies reste assez homogène dans les trois stations.

Figure 16 : Répartition mensuelle des précipitations de 1960 à 2005 (valeur absolue et en pourcentage)



Les stations enregistrent durant le premier mois de mousson, le mois de juin, 10 % du volume total annuel à Sélibaby, 5 % à Aleg et 1 % à Nouakchott. Le mois d'août est le mois le plus humide avec environ 35 % du volume total précipité dans l'année, et 80 % des pluies annuelles sont réparties entre juillet et septembre. En moyenne, un seul trimestre concentre la quasi-totalité de la pluviométrie annuelle dans ces trois stations.

Le mois d'octobre marque la fin de la saison humide avec en moyenne 5 % des précipitations annuelles. La césure est nette car le mois précédent enregistre en moyenne sur les trois stations 30 % de la pluviométrie alors que le mois de novembre est quasiment sec avec simplement quelques précipitations sporadiques très faibles sur l'ensemble des trois stations.

Après la saison des pluies, la Mauritanie entre dans une période sèche avec sept mois sans précipitation.

II. Analyse des variations interannuelles des précipitations à l'échelle nationale

La région de l'Afrique sub-saharienne est sans conteste la région au monde qui a connu dans son ensemble la plus forte diminution de précipitations durant les 50 dernières années, à la fois à l'échelle interannuelle et décennale, amenant à des changements sur le milieu physique notamment sur les sols et la végétation, et provoquant la sédentarisation massive des populations nomades. Cette péjoration climatique, qui a affecté la plus grande partie de l'Afrique de l'Ouest marquée par une forte irrégularité des précipitations et une tendance à la baisse du volume pluvieux a suscité de nombreuses recherches au niveau de l'Afrique de l'Ouest (Lamb, 1982 ; Nicholson, 1985, 1989 ; Demarée, 1990 ; Morel, 1995), que national comme en Mauritanie (Demarée, 1990 ; Nouarceur, 1995), au Sénégal (Olivry, 1983 ; Sagna 1994 ; Ndong, 1995), au Burkina Faso (Carbonnel et Hubert, 1985) au Mali (Fofana et Touré, 1994), au Niger (Adefofalu, 1986 ; Olaniran et Sumner, 1989, 1990 ; Ozer, 2000).

La région sahélienne a toujours connu une alternance de périodes humides et sèches (Ozer, 2000). L'étude des stations mauritaniennes (Fig.17, Tab.3), nous permet de nous focaliser sur les deux sécheresses qui ont extrêmement marqué cette zone au cours du dernier siècle.

Le réseau de mesures pluviométriques est caractérisé par deux facteurs limitant : la faible densité du réseau sur tout le territoire et les lacunes fréquentes dans certaines stations qui rendent parfois les données inutilisables. Pour cela dix stations seulement ont été retenues, toutes synoptiques gérées par la SAM (Société des Aéroports de Mauritanie).

Figure 17 : Localisation des stations pluviométriques de la Mauritanie

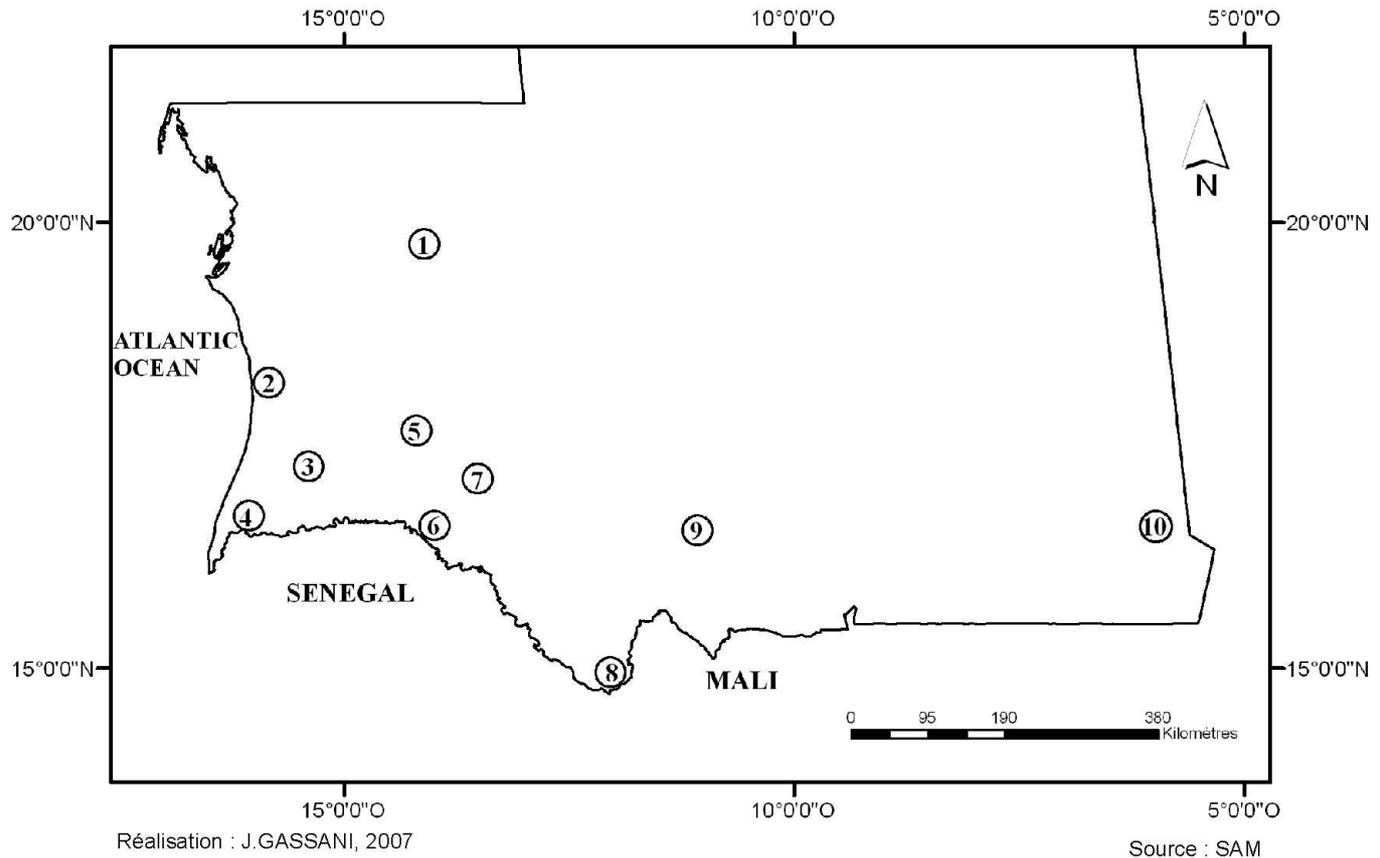


Tableau 3 : Localisation par coordonnée géographique des stations pluviométriques

Station ID	Nom de la station	Latitude	Longitude
1	Akjoujt	19,45	14,22 O
2	Nouakchott	18,06	15,57 O
3	Mederdra	16,55	15,40 O
4	Rosso	16,30	15,49 O
5	Boutilimit	17,32	14,41 O
6	Boghe	16,34	14,17 O
7	Aleg	17,03	13,55 O
8	Selibaby	15,14	12,10 O
9	Kiffa	16,38	11,24 O
10	Nema	16,36	7,16 O

Source : IGN 1958

Dans le but d'étudier les variations pluviométriques à l'échelle nationale, nous avons retenu la période 1935-2004. Ce choix est motivé par le fait que c'est la période la plus longue, commune aux dix stations.

Comme les paramètres climatiques sont contrastés à l'échelle temporelle et nationale, l'utilisation de l'indice de Lamb (1982) est un moyen efficace pour caractériser la variabilité des pluies. Il permet ainsi de mettre en évidence les années les plus humides et les plus sèches. La formule suivante est conçue pour permettre d'optimiser l'indice d'anomalie réduite de Lamb (1982) :

$$X_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \frac{r_{ij} - \bar{r}_i}{\sigma_i} \quad [Eq. 1]$$

où r_{ij} est la pluie mesurée en une année j à une station i , \bar{r}_i et σ_i sont les moyenne et écart-type des précipitations enregistrées à la station i et N_j est le nombre de stations présentant des valeurs pour l'année j .

L'analyse de l'indice d'anomalie pluviométrique (Fig.18) fait apparaître tout d'abord une très grande variabilité à la moyenne des dix stations. En outre, ce graphique met en évidence le caractère irrégulier des saisons des pluies, caractérisées par une alternance d'années excédentaires et d'années déficitaires.

La figure 18 présente l'évolution annuelle des précipitations exprimée en fonction de l'indice d'anomalie pluviométrique développé par Lamb (1982), à savoir la différence des dix stations mauritaniennes retenues entre la pluviométrie annuelle et la pluviométrie moyenne divisée par l'écart type de la série analysée (1935-2004). La période « humide » (1935-1969) rassemble cinq des six années à excédent pluviométrique (pluviosité > moyenne + σ). Aucune année sur les 35 que compte la période humide apparaît anormalement déficitaire (pluviosité < moyenne - σ) et seulement cinq années sur ces 35 présentent un léger déficit pluviométrique par rapport à la moyenne 1935-2004. Durant les 35 dernières années (1970-2004), ce rapport est totalement inversé puisque les 5 années affectées par une pluviométrie anormalement déficitaire y sont toutes observées. On observe que seules cinq années présentent des totaux pluviométrique supérieurs à la moyenne 1935-2004 (dont quatre depuis 1995), parmi lesquelles une année à excédent pluviométrique (pluviosité > moyenne + σ) en 2003.

La figure 18 présente ainsi une bonne représentation temporelle régionale des précipitations. Cependant, dans le but de rendre ce graphique plus facilement compréhensible,

l'écart-type a été converti en millimètres en 'dénormalisant' l'équation 1 de la manière suivante (JONES & HULME 1996) :

$$P_j = X_j \bar{\sigma} + \bar{P} \quad [Eq. 2]$$

où P_j est la pluviométrie régionale exprimée en mm en une année j , $\bar{\sigma}$ est l'écart-type moyen des séries pluviométriques et \bar{P} est la moyenne pluviométrique régionale.

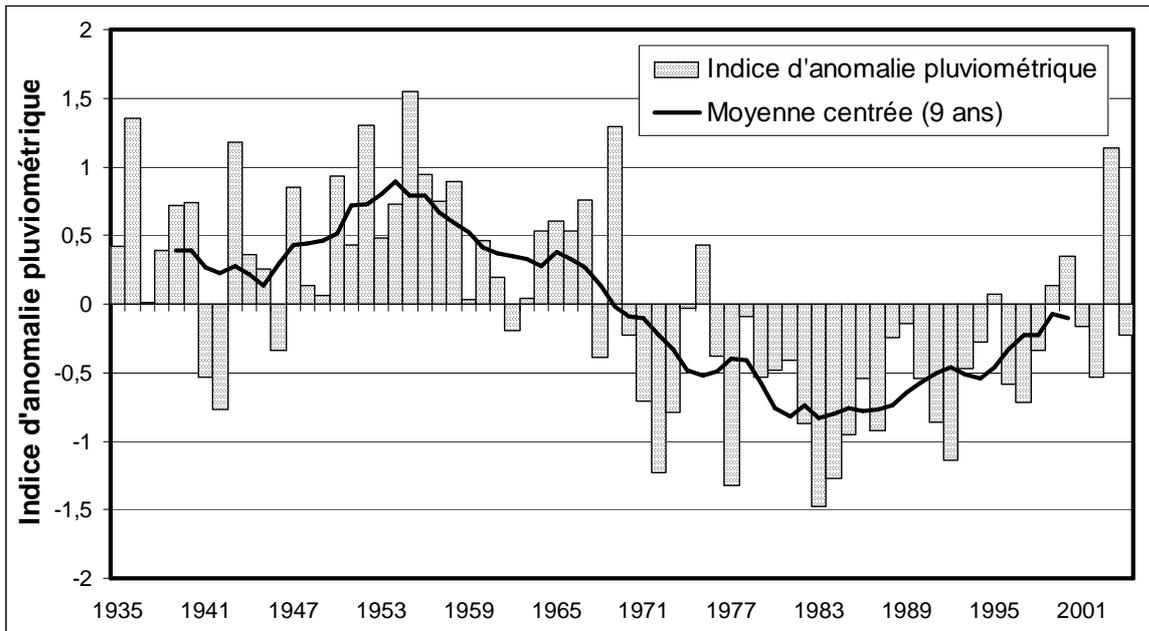


Figure 18 : Evolution des précipitations en Mauritanie de 1935 à 2004 exprimée en fonction de l'indice d'anomalie pluviométrique' calculé sur 10 stations (d'après la méthode de LAMB 1982).

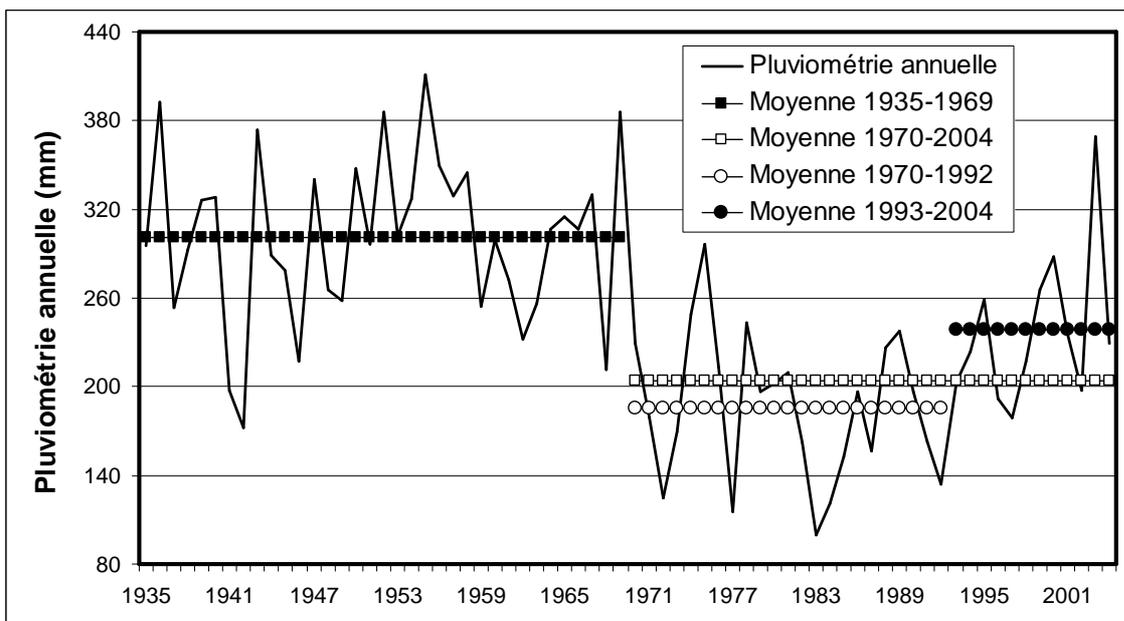


Figure 19 : Précipitations annuelles en Mauritanie (d'après la méthode de JONES & HULME 1996), moyennes des sous-séries pluviométriques avant et après le point de rupture de 1969, ainsi que pour les sous-séries 1970-1992 et 1993-2004 (données provenant de 10 stations).

A partir des données obtenues pour la Mauritanie (Figures 18 et 19), il est possible de mettre en évidence la non-stationnarité des séries pluviométriques survenue pendant la période 1935-2004. Cela revient à dire qu'il est possible d'isoler les périodes d'anomalies pluviométriques (périodes fortement pluvieuses ou de sécheresse). Pour ce faire, le test non-paramétrique de PETTIT (1979), capable d'estimer la position d'un changement de moyenne (point de rupture) dans une série, a été appliqué à cette série. Il ressort de l'application de ce test qu'un point de rupture principal est identifié en 1969 ($p < 0,0001$) et met en évidence le déficit pluviométrique de ces 35 dernières années contrastant de manière remarquable avec la période précédente beaucoup plus arrosée. Ceci est en accord avec les travaux similaires précédents relatifs à l'analyse des séries pluviométriques sahéliennes (Vannitsem & Demarée 1991 ; Morel 1998 ; Ozer 2000 ; Le Barbé, 1997 ; Perard, 2002). En Mauritanie, la comparaison des moyennes des sous-séries pluviométriques homogènes avant et après le point de rupture de 1969 montre l'ampleur de la transition brutale qui caractérise la 'grande sécheresse' (Fig.18). Ainsi, près de 100 mm séparent les périodes 1935-1969 et 1970-2004 dont la pluviométrie moyenne est respectivement de 301 mm et 204 mm, soit une diminution de la pluviométrie de plus de 32%. Notons que le changement pluviométrique est encore plus dramatique étant donné que les années cinquante ont constitué la décennie la plus arrosée du siècle comme en témoigne la moyenne centrée sur neuf ans (Fig. 18). En effet, près de 160 mm séparent les extrémités de la décennie des années cinquante et de celle des années quatre-vingts, soit un déficit approchant les 50%.

Cette péjoration climatique abrupte va entraîner d'énormes pertes au niveau du cheptel et des productions agricoles entraînant une profonde modification sociétale dont la sédentarisation massive des tribus nomades. La figure 20 a été réalisée à partir de plus de trente stations issues de notre réseau mauritanien de pluviomètres, ainsi que des données pluviométriques des stations riveraines du Sénégal et du Mali qui étaient disponibles pour la période 1950-1990. C'est pour cette raison que nous présentons la comparaison entre les vingt années avant et après la rupture pluviométrique identifiée en 1969. Pour réaliser cette carte, nous avons interpolé les valeurs ponctuelles (grâce à la méthode dite du « krigeage »²¹) pour reconstituer les isohyètes (courbes d'égalité pluviométrique). Ce type de méthode permet

²¹ Traitements réalisés au moyen du logiciel de SIG, ArcGis 9.1 et son extension spécifique Spatial Analyst. Différentes méthodes d'interpolation existent, le Krigeage est la méthode la plus performante en ce qui concerne ce type de données.

d'obtenir à partir de peu de points de référence de l'information homogène sur l'ensemble du territoire considéré.

Cette carte montre clairement l'ampleur de cette catastrophe au niveau spatio-temporel. Ainsi, la comparaison des isohyètes durant la période fortement humide de 1950 à 1969 et la période de sécheresse de 1970 à 1989 met en évidence la diminution généralisée des précipitations qui se marque par un retrait important des courbes isohyètes vers le Sud pouvant dépasser 150 kilomètres. Il est en effet marquant de constater que l'isohyète de 200 mm calculé pendant la période humide des années cinquante et soixante se retrouve remplacée par l'isohyète de 100 mm durant les deux décennies suivantes. Il en va de même pour l'isohyète de 300 mm, qui marque la limite de culture du mil, qui a été remplacée par l'isohyète de 200 mm durant les années soixante-dix et quatre-vingts. Ainsi, par exemple, sur une bande de 150 km de large traversant le territoire mauritanien, la culture du mil a été rendue impossible suite à ce déficit pluviométrique persistant.

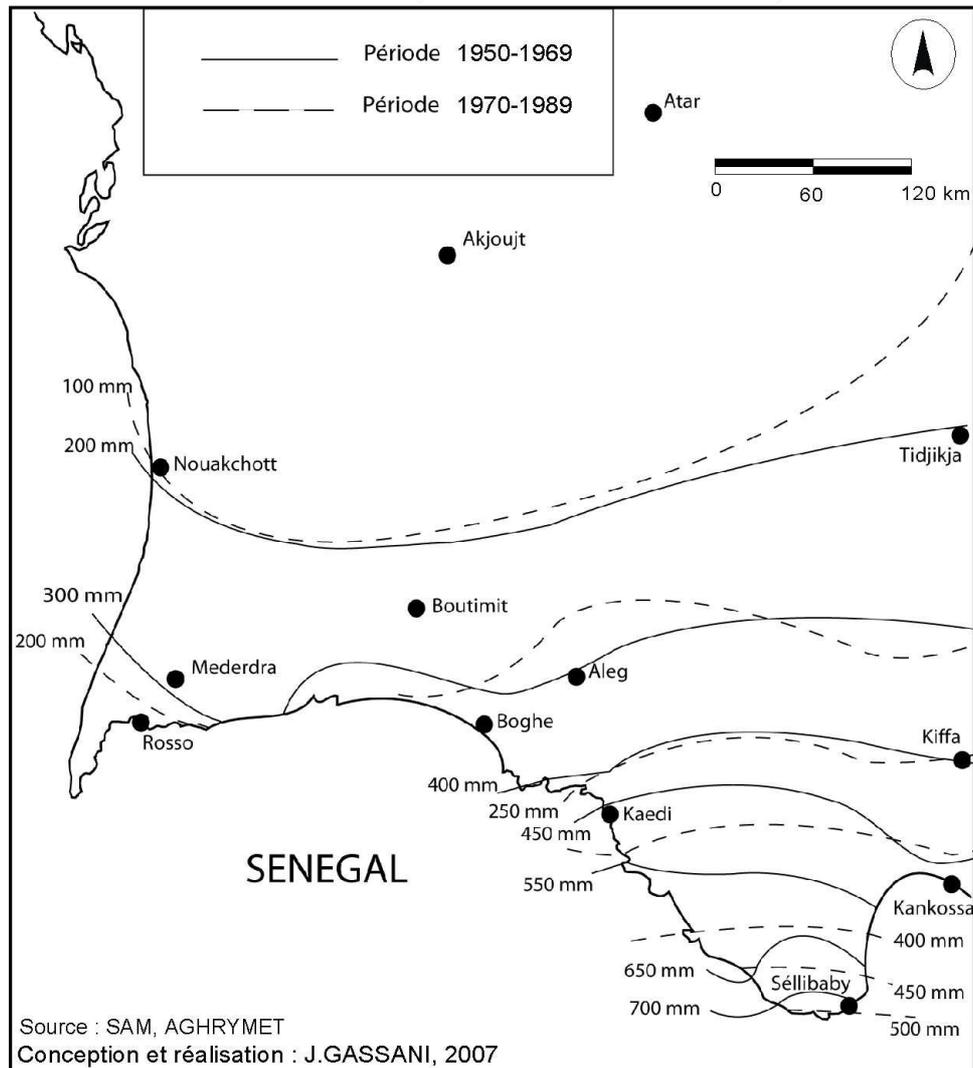
L'application du test de PETTITT (1979) aux sous-séries (1935-1969 et 1970-2004) détecte une récente rupture significative ($p < 0,03$) témoignant d'une certaine amélioration des précipitations observée depuis la rupture de 1970.

L'analyse de la figure 19 montre en effet que les années déficitaires enregistrées depuis 1993 ne s'écartent jamais plus de plus d'un écart-type de la moyenne (contre 5 années entre 1972 et 1992), et que ces dernières sont souvent contrebalancées par des années de pluviométrie excédentaires. La comparaison des pluviométries moyennes enregistrées durant les périodes 1970-1992 et 1993-2004 montre une différence de plus de 50 mm avec 185 mm et 238 mm respectivement, soit une augmentation de la pluviométrie de 28%. Bien sûr, cette dernière moyenne (1993-2004) reste bien largement inférieure à celle de la période 1935-1969 (301 mm), mais elle ne s'écarte que de quelques mm de la moyenne 1935-2004 (252 mm).

Ces dernières années, une polémique relative à la fin ou non de cette 'grande sécheresse' est apparue dans la littérature spécialisée. Certains auteurs considèrent que la sécheresse continue (L'HOTE *et al.*, 2002), alors que de plus en plus d'auteurs remarquent que la pluviométrie s'est véritablement améliorée durant les années 1990 (DAI *et al.* 2004 ; NICHOLSON 2005 ; HOUNTONDJI *et al.* 2005, 2006a, 2006b). En outre, OZER et ses collègues (2003) ont suggéré que la sécheresse sahélienne aurait pu se terminer durant les années 1990. Ozer et Ozer (2005) ont

déecté une ébauche de rupture en 1987 sur les données pluviométriques du Niger. Niang *et al.* (2007) ont démontré qu'un point de rupture s'était produit en 1990 dans le sud de la Mauritanie (Boutilimit). Nos résultats montrent également clairement, mais à l'échelle nationale cette fois, que ce retour à des conditions pluviométriques plus favorables est réellement effectif.

Figure 20 : Carte de l'évolution de la localisation des isohyètes en Mauritanie (1950-1969 et 1970-1989)



Selon Morel (1995)¹⁸, la majeure partie du déficit pluviométrique observé durant les années soixante-dix et quatre-vingts serait due à la réduction drastique des pluies du mois d'août. L'analyse mensuelle effectuée sur les données pluviométriques de la station synoptique de référence la plus proche de notre zone d'étude (Aleg) confirme les résultats

¹⁸ MOREL, R., 1995. La sécheresse en Afrique de l'Ouest. *Revue de Géographie de Lyon*, 70 : 215-222.

obtenus par Morel (1995) en ce qui concerne la comparaison entre la période 1935-1969 et 1970-1992. En effet, le mois d'août voit sa pluviométrie se réduire de 50% entre ces deux périodes. Le seul déficit du mois d'août (57 mm) explique 61% du déficit annuel (93 mm). Il est à noter que tous les mois pluvieux (juin à octobre) présentent alors un déficit systématiquement supérieur à 5%.

Par contre, et c'est intéressant pour la compréhension du système hydrologique des bassins de cette région, et plus particulièrement pour le bassin du lac de Mâle, le récent retour à une pluviométrie plus favorable s'explique uniquement par une augmentation des pluies durant les mois de juillet, août et septembre qui sont de 32%, 71% et 17% respectivement, et dépassent les moyennes de la période totale d'analyse (1935-2004), les mois 'périphériques' que sont juin et octobre continuent en revanche à se déprécier en termes pluviométriques. Ainsi, les précipitations semblent se concentrer dans le temps.

Tableau 4 : Evolution pluviométrique des mois de juin à octobre selon différentes périodes pluviométriques homogènes.

Aleg	1935-2004 (mm)	1935-1969 (mm)	1970-1992 (mm)	1993-2004 (mm)	Ecart (1935-1969)- (1970-1992)	Ecart (1970-1992)- (1993-2004)
Juin	11	13	10	8	-3	-2
Juillet	48	53	38	50	-15	+12
Août	94	115	58	99	-57	+41
Septembre	64	65	60	70	-5	+10
Octobre	20	28	14	10	-14	-4
Total	237	274	181	237	-93	+58

III. Analyse des tendances aux pluies extrêmes en Mauritanie (1935-2004)

Suite au réchauffement climatique observé au cours des dernières décennies, l'analyse des tendances des pluies extrêmes reçoit de plus en plus d'attention ces dernières années. En effet, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) estime qu'il est probable (certitude dans l'intervalle de 66 à 90 %) que les événements pluviométriques extrêmes soient de plus en plus fréquents dans le courant du 21^e siècle, et que cette tendance a déjà été observée durant la seconde moitié du 20^e siècle (GIEC, 2007).

De récentes études démontrent que, dans nombreuses zones du monde, on observe une augmentation des pluies extrêmes (Easterling *et al*, 2000).

En Europe, de récentes études démontrent une augmentation significative de la tendance à des évènements pluviométriques extrêmes dans le nord de l'Italie (Brunetti *et al.*, 2000 ; 2001) alors qu'aucune tendance n'est observée en Belgique (Vaes *et al.*, 2002), et qu'une tendance à la diminution est observée en Pologne (Bielec, 2001). En méditerranée, Alpert et ses collègues (2002), montrent une tendance significative à l'augmentation des pluies extrêmes en Espagne et en Italie malgré la diminution des totaux pluviométriques.

Dans le nord des Etats Unis, différentes analyses des pluies extrêmes indique une augmentation significative dans leurs fréquences depuis 1920-1930 (Groisman *et al.*, 2001, Kunkel, 2003) mais il n'y a pas de tendance claire à l'augmentation des tendances aux pluies extrêmes au Canada (Zhang, 2001, Kunkel, 2003).

De nombreuses études ont été menées sur d'autres continents mais l'Afrique reste peu étudiée, notamment à cause des difficultés rencontrées pour l'obtention de ces données pluviométriques quotidiennes. Ainsi, il n'existe actuellement que quelques résultats dans des études limitées qui montrent des tendances divergentes des extrêmes pluviométriques (Easterling *et al.*, 2000, Fauchereau *et al.*, 2003, Seleshi & Camberlin., 2006). L'unique étude globale réalisée sur le continent africain est très récente (New *et al.*, 2006) et n'aborde l'Afrique de l'Ouest que via l'analyse de quatre stations au Nigéria et deux en Guinée. Force est donc de constater que l'Afrique de l'Ouest sahélienne n'est toujours pas étudiée.

III.1. Données et méthodes

Dans le cadre de cette étude, seules les dix stations présentées précédemment à la figure 17 et au Tableau 3 ont été analysées puisqu'elles présentent des séries continues de précipitations journalières sur une période de soixante-dix ans, de 1935 à 2004. Cette étude est donc conduite dans l'intention de contribuer à l'amélioration de nos connaissances sur ces extrêmes pluviométriques en Mauritanie, thème encore totalement inexploré.

Neuf indices de pluies extrêmes ont été calculés annuellement (Tab.5). D'abord, les indices classiques comme le total annuel de précipitation (RTOT), le total annuel de jours humides (avec des pluies journalières ≥ 1 mm, Rd), et la lame d'eau moyenne précipitée par jour humide (*Simple day intensity index*, SDII) ont été calculés pour chaque station. Les six autres indices sont basés sur les 95ème et 99ème percentiles. Cette méthode d'analyse est communément utilisée et est la plus adéquate quand on étudie une vaste zone (Manton *et al.*,

2001 ; Griffiths *et al.*, 2003, Haylock *et al.*, 2006). Ces percentiles sont calculés à partir des données journalières sur une période de trente ans, ici 1961-1990, répondant de la sorte aux normes de l'OMM (Organisation météorologique mondiale). Le 95e percentile correspond à un événement pluviométrique intense alors que le 99e percentile représente un événement pluviométrique extrême. La fréquence de ces événements pluviométriques intense (R95) et extrême (R99) est exprimée en jours par an. L'intensité des pluies intense (R95T) et extrême (R99T) est définie comme étant la somme des pluies \geq au R95 ou \geq au R99 et est exprimée en mm ; elle donne une indication du volume pluviométrique précipité lors de ces événements. La proportion des jours des pluies intenses (R95P) et extrêmes (R99P) par rapport au total annuel est exprimée en % et est calculée également étant donné le caractère très irrégulier des pluies annuelles. Ainsi, l'impact d'une pluie de 80 mm sera différent lors d'une année humide ou sèche.

Tableau 5 : Typologie des différents indices pluviométriques

ACRONYME	NOM DE L'INDICE	DEFINITION	UNITE
RTOT	Précipitation totale	Précipitation totale annuelle	[mm]
Rd	Jour de pluie	Nombre total de jours humides (≥ 1 mm)	[jours]
SDII	Simple day intensity index	Lame d'eau moyenne précipitée par jour de pluie	[mm/jour]
R95	Fréquence des pluies intenses	Nombre de jours avec des précipitations \geq 95e percentile calculé sur la période 1961-1990	[jours]
R99	Fréquence des pluies extrêmes	Nombre de jours avec des précipitations \geq 99e percentile calculé sur la période 1961-1990	[jours]
R95T	Intensité des pluies intenses	Précipitations annuelles dues aux pluies \geq 95e percentile calculé sur la période 1961-1990	[mm]
R99T	Intensité des pluies extrêmes	Précipitations annuelles dues aux pluies \geq 99e percentile calculé sur la période 1961-1990	[mm]
R95P	Proportion des jours de pluies intenses	Pourcentage des pluies \geq 95e percentile calculé sur la période 1961-1990 par rapport au total pluviométrique annuel	[%]
R99P	Proportion des jours de pluies extrêmes	Pourcentage des pluies \geq 99e percentile calculé sur la période 1961-1990 par rapport au total pluviométrique annuel	[%]

Dans cette analyse les coefficients de tendance qui sont déterminés (utilisent une régression linéaire), lequel représente l'augmentation ou la baisse des index donnés durant 1960-2000. Les pentes de régression ont été enregistrées pour chaque station comme paramètre caractérisant la tendance globale pour l'indice des pluies. Chaque pente positive ou négative a été cartographiée en six classes indiquant une tendance significative, modérée ou non significative. La procédure de régression requiert le test de Student et ces résultats p-niveau pour analyser l'hypothèse que la pente est égale à 0. Ce p-niveau a été utilisé comme critère

pour définir les différentes classes. La tendance pour chaque index, a été symbolisée par « signifiant » si le niveau p excède 0,005, modéré si le niveau p est entre 0,005 et 0,1 et non signifiant si le niveau p est en dessus de 0,1.

L'analyse des tendances linéaires est réalisée pour les neuf indices. Pour chaque station, les tendances ont été estimées par régression linéaire entre les indices des précipitations et le temps (en années). Les pentes ainsi estimées ont été regroupées en six classes indiquant des tendances très significatives, significatives, et non significatives à la hausse ou à la baisse. La limite des six classes considérées est définie à partir de la statistique t de Student utilisée pour tester l'hypothèse d'une pente égale à 0. Dès lors, la tendance est qualifiée comme étant significative si la valeur t de la pente de la régression est inférieure à 0,05 ; et comme très significative si la valeur t de la pente de la régression est inférieure à 0,01. Lorsque ces valeurs t de la pente de la régression sont au-delà de ces limites, les tendances sont alors qualifiées de non significatives.

III.2. Résultats

Les spécificités (précipitations annuelles, nombre de jours de pluie, et limites caractérisant les événements pluviométriques intenses et extrêmes) des dix stations analysées sont présentées au tableau 6.

Les pluies annuelles moyennes enregistrées de 1935 à 2004 varient de 83 mm (Akjoujt) à 560 mm (Selibaby). Ces mêmes stations présentent les extrêmes relatifs au nombre de jours de pluie annuels variant entre 8 et 33.

Quant aux valeurs limites (calculées sur la période 1961-1990) définissant une pluie intense, elles varient de 29,1 mm à Akjoujt pour atteindre 46,8 mm à Selibaby. Notons que pour les huit autres stations, cette valeur limite est cloisonnée dans l'intervalle 33 mm – 43 mm.

Pour les événements extrêmes, la valeur limite minimale est mesurée à Akjoujt (43 mm) et la plus importante est observée à Boghe avec 75 mm.

Tableau 6 : Analyse des indices pluviométriques sur les dix stations

	RTOT	RD	R95	R99
AKJOUJT	83,1	8,4	29,1	43,0
NOUAKCHOTT	105,2	10,2	34,2	52,8
BOUTILIMIT	162,0	13,9	33,4	46,0
MEDERDRA	219,0	15,5	42,3	65,1
ALEG	237,7	17,9	38,9	58,5
ROSSO	254,4	19,1	41,4	59,5
NEMA	255,1	23,3	33,9	53,2
BOGHE	270,1	17,7	43,1	75,0
KIFFA	294,8	22,1	43,3	61,5
SELIBABY	559,6	33,1	46,8	69,0

Les résultats obtenus pour ces neuf indices sont présentés aux figures 21, 22 et 23. Ils sont par ailleurs résumés au tableau 7.

Tout d'abord, il faut remarquer que toutes les stations analysées ont enregistré une diminution généralisée des précipitations annuelles. A l'exception de la station de Mederdra, toutes ont connu une baisse significative (trois stations) ou très significative (six stations) des pluies annuelles (Fig. 21.A).

Cette baisse des précipitations annuelles s'est accompagnée d'une réduction, partout très significative, du nombre de jours humides (pluie recueillie sur 24 heures ≥ 1 mm) (Fig. 21.B).

Ceci a abouti à une augmentation de l'intensité pluviométrique moyenne par jour de pluie (SDII) dans huit stations sur les dix analysées. Cette augmentation est significative dans deux de ces stations (Fig. 21.C).

Pour ce qui concerne les événements pluviométriques intenses, aucune tendance ne se dégage clairement (Fig 22). Trois stations connaissent une augmentation non significative de la fréquence des événements pluviométriques intenses alors que six autres stations enregistrent une timide diminution de cette fréquence. Seule la station de Boghé présente une baisse significative de la fréquence des événements pluviométriques intenses (Fig. 22.A). Les résultats de cette analyse sont identiques pour ce qui concerne l'intensité des pluies intenses (Fig. 22.B). Quant à la tendance de la proportion des jours de pluies intenses par rapport au total pluviométrique annuel, elle est partout non significative, avec néanmoins six tendances à la hausse contre quatre à la baisse (Fig. 22.C).

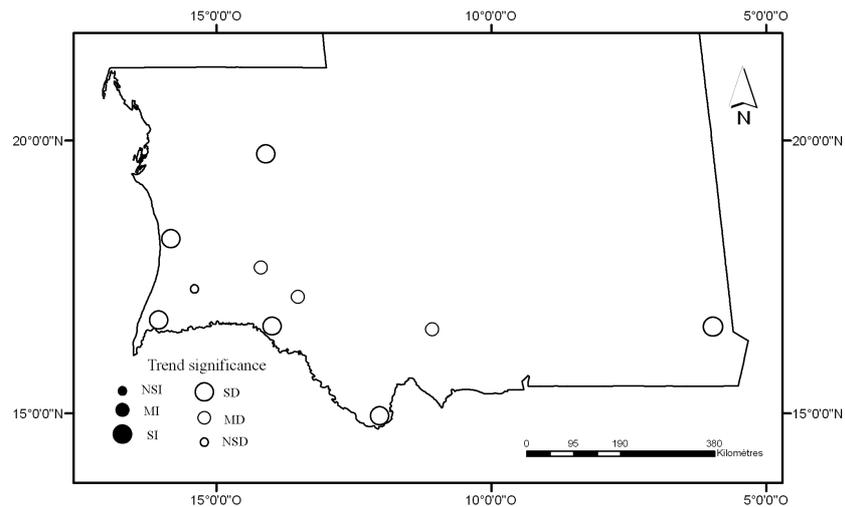
Finalement, de l'analyse des tendances des événements pluviométriques extrêmes, il ressort une quasi stabilité de ces trois indices (Fig. 23). Autrement dit, il apparaît que, malgré la réduction drastique des précipitations annuelles, les événements pluviométriques extrêmes n'ont pas ou peu varié au cours de ces soixante-dix dernières années.

Ceci est important à plus d'un titre, comme nous le verrons plus loin dans ce travail. Mais d'emblée, ce résultat est conforme aux récentes conclusions du GIEC (2007) selon lesquelles il est probable que la fréquence des événements pluviométriques extrêmes ne suive pas les tendances des précipitations annuelles. Nous sommes clairement ici dans ce cas de figure.

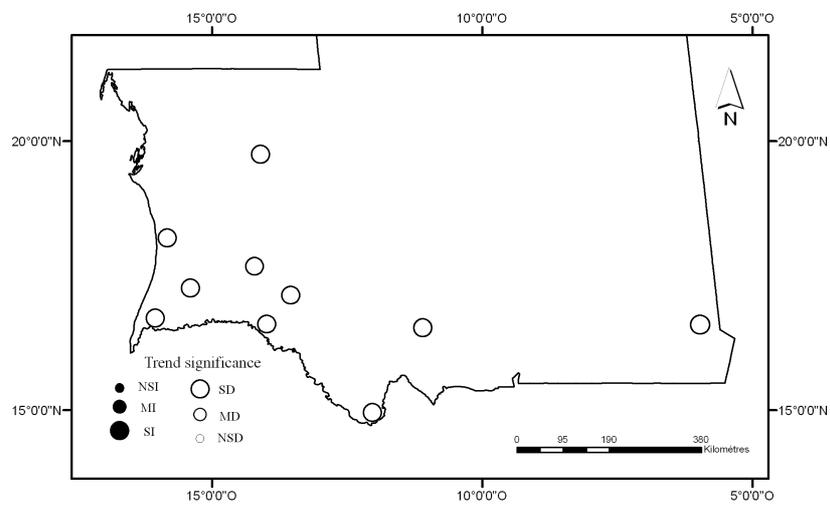
Tableau 7 : Tendances des neuf indices sur la période 1935-2004.

	Boutilimit	Aleg	Selibaby	Nouakchott	Mederdra	Kiffa	Rosso	Boghe	Nema	Akjoujt
RTOT	B*	B*	B**	B**	B	B*	B**	B**	B**	B**
Rd	B**	B**	B**	B**	B**	B**	B**	B**	B**	B**
SDII	A	A	B	A	A**	A	A	B	A*	A
R95	A	B	B	B	A	B	B	B*	A	B
R95T	A	B	B	B	A	B	B	B*	A	B
R95P	A	A	B	A	A	B	A	B	A	B
R99	B	B	B	A	A	B	B	B	A	B
R99T	B	B	B	A	A	B	B	B	A	B
R99P	B	B	B	A	A	B	B	B	A	B

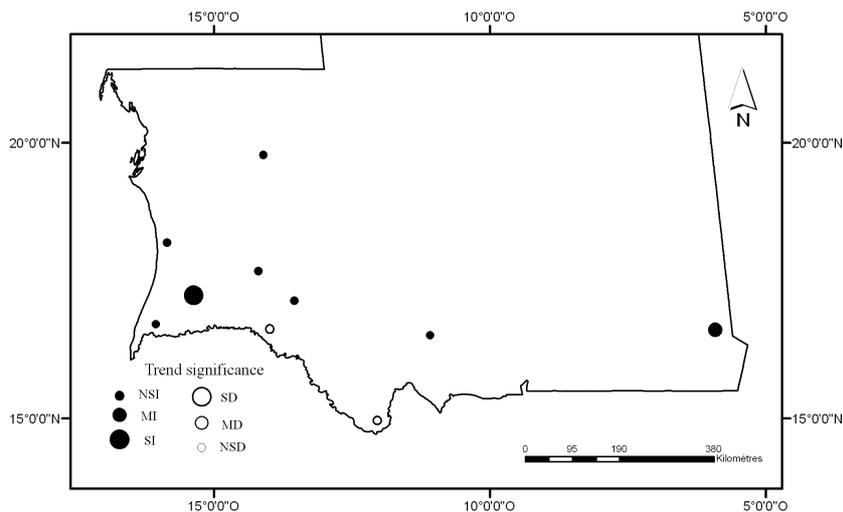
RTOT : Pluviométrie annuelle (mm) ; Rd : Nombre de jours de pluies ≥ 1 mm ; SDII : Intensité pluviométrique journalière (mm/jr) ; R95 : Fréquence des pluies intenses (jours) ; R95T : Intensité des pluies intenses (mm)[°]. R95P : Proportion des jours de pluies intenses (%) ; R99 : Fréquence des pluies extrêmes (jours) ; R99T : Intensité des pluies extrêmes (mm)[°]. R99P : Proportion des jours de pluies extrêmes (%) ; A : Tendence linéaire à la hausse ; B : Tendence linéaire à la baisse. (*) : Significatif ; (**): Hautement significatif



A

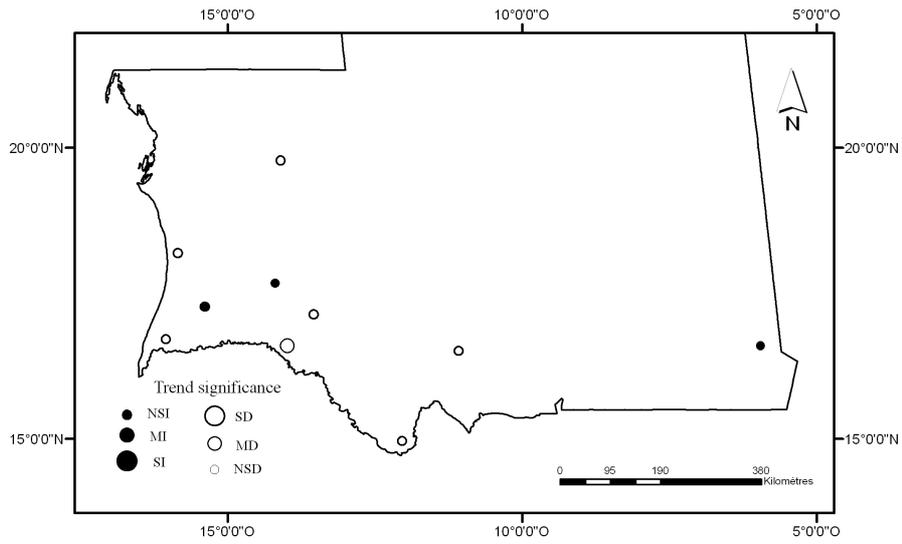


B

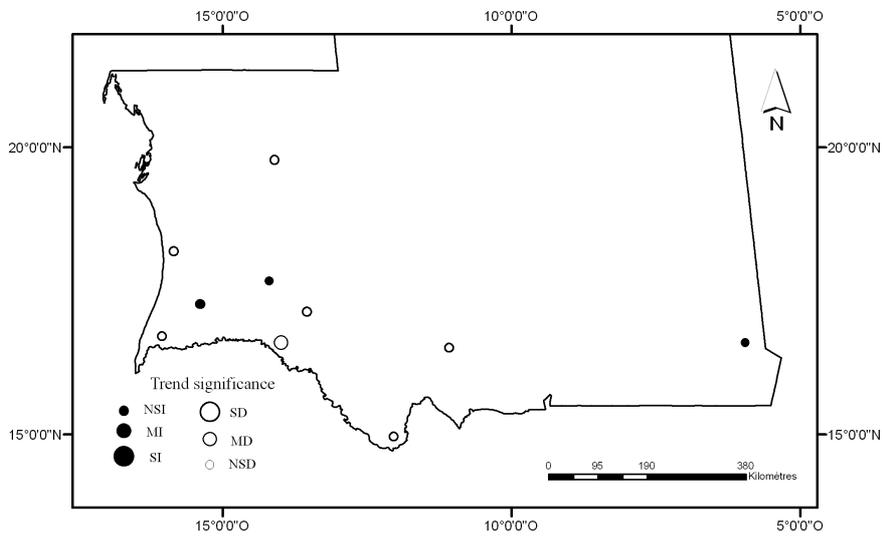


C

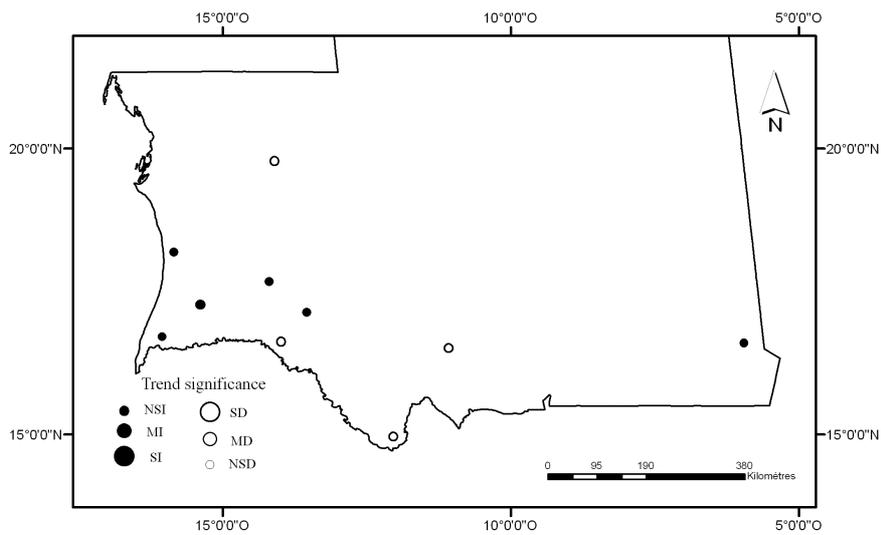
Figure 21 : Tendances de la pluviométrie annuelle (A), du nombre de jours de pluie (B), et de l'intensité pluviométrique moyenne par jour de pluie (C) en Mauritanie de 1935 à 2004. NSI : Augmentation non significative ; MI : Augmentation significative ; SI : Augmentation très significative ; SD : Diminution très significative ; MD : Diminution significative ; NSD : Diminution non significative.



A



B



C

Figure 22 fréquence des pluies intenses (A), l'intensité des pluies intenses (B), et la proportion des jours de pluies intenses (C) Cf. Figure 21 pour les tendances

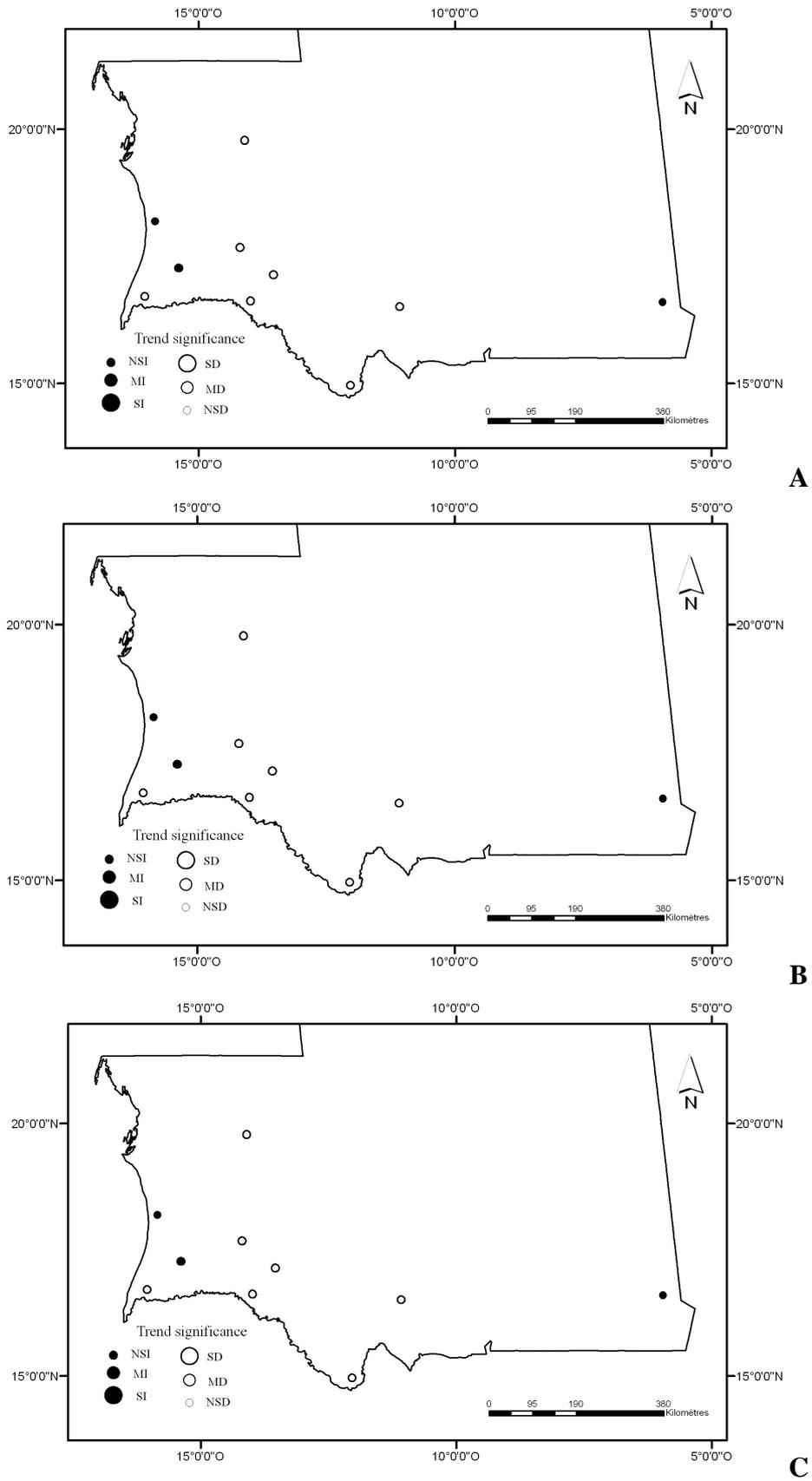


Figure 23 : fréquence des pluies extrêmes (A), l'intensité des pluies extrêmes (B), et la proportion des jours de pluies extrêmes (C) Cf. Figure 21 pour les tendances

IV. Caractéristiques climatiques de la zone d'étude (bassin versant du lac de Mâle)

IV.1. Introduction

Suite à l'analyse des précipitations à l'échelle nationale, nous terminons ici l'étude pluviométrique en nous focalisant sur le bassin versant de Mâle.

Pour réaliser cette étude, nous avons dû installer un réseau de pluviomètres dans notre zone d'intérêt et ceci pour plusieurs raisons:

1. la faible densité de stations de référence en Afrique de l'Ouest puisque seulement 28 stations synoptiques couvrent, de manière continue, le Sénégal, la Mauritanie, le Mali et le Niger (Ozer, 2000) ;
2. la station synoptique la plus proche du bassin versant de Mâle est celle d'Aleg, située à près de 60 km au Nord-Est ;
3. le fait que le bassin versant de Mâle ne dispose que d'un seul poste pluviométrique n'enregistrant les pluies que depuis 1998 (voir ci-après).
4. la très forte hétérogénéité spatiale de par leur caractère local orageux, une caractéristique des pluies sahéliennes est. Celle-ci a fait l'objet de plusieurs travaux en Afrique de l'Ouest (Sivakumar et Hatfield, 1990 ; Groten, 1993 ; Lebel *et al.*, 1996 ; Taupin *et al.*, 1998 ; Ozer, 2000). Ainsi, les différences entre les données pluviométriques enregistrées à Aleg sont tantôt largement supérieures à celles observées à Mâle (comme en 2003 où une différence de 138% est mesurée entre ces deux stations), ou peuvent également être significativement inférieures (34% en 2000) ;

Tous ces éléments font qu'il serait inapproprié de se baser sur la seule station d'Aleg pour réaliser la modélisation hydrologique sur le bassin versant de Mâle.

Dès lors, un réseau de cinq pluviomètres automatiques à augets basculeurs (dont la précision est de 0,2 mm) de modèle « Davis », complété par quatre pluviomètres manuels, a été installé dans et autour du bassin versant de Mâle pour deux années de mesures : 2005 et 2006. Les cinq pluviomètres automatiques ont été prêtés par le laboratoire GEOPHEN de l'université de Caen. Les pluviomètres manuels ont quant à eux été achetés par l'Institut National d'Horticulture d'Angers. Tous ont été acheminés par avion lors de nos missions de 2005 et 2006. Les pluviomètres automatiques ont été restitués à l'Université de Caen après la

saison des pluies 2006. Les autres sont toujours fonctionnels sur le terrain et les relevés sont encore effectués de juin à octobre.

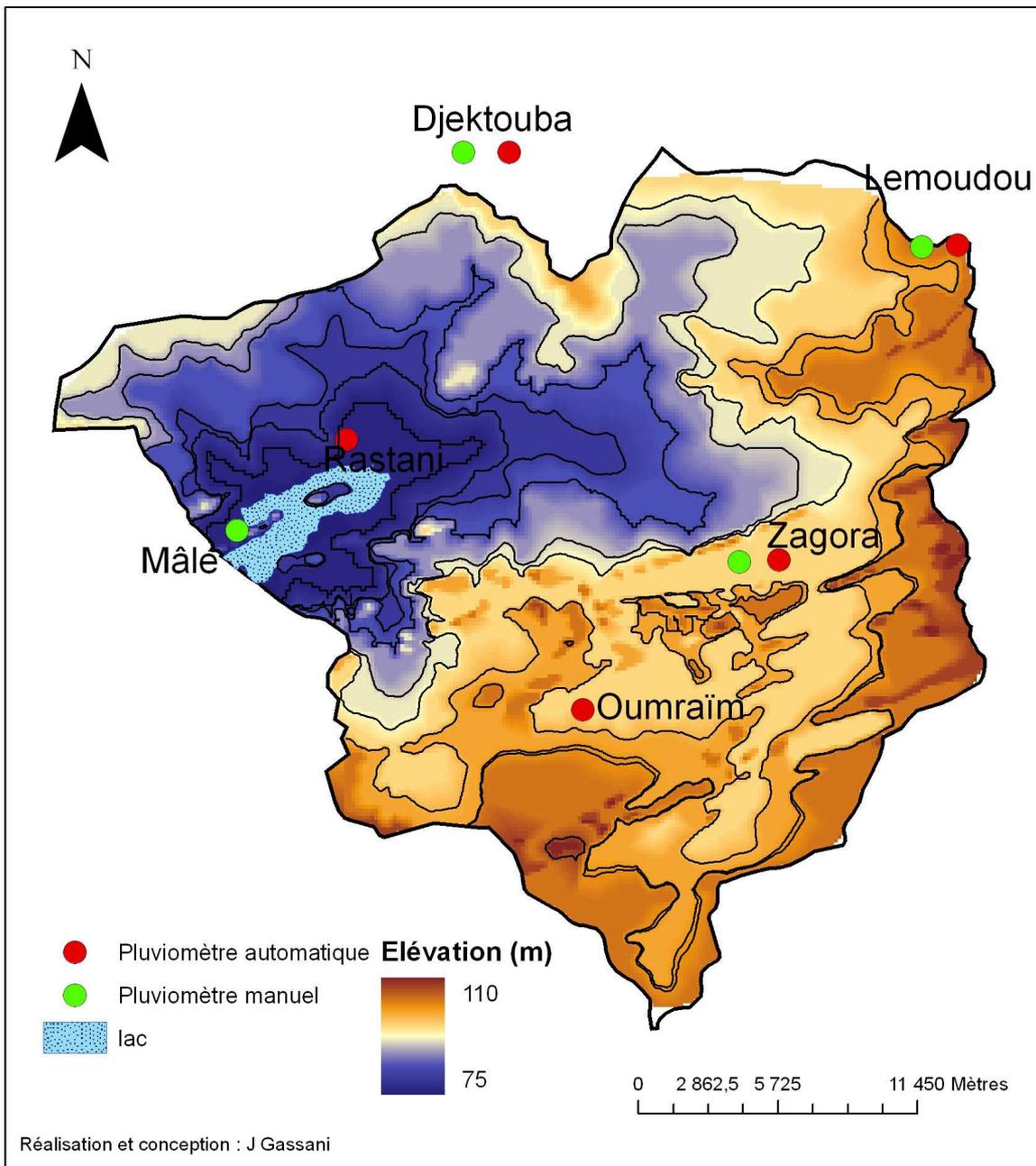
Pour la saison 2005, le dispositif était limité, pour des raisons logistiques, à trois pluviomètres automatiques (Djektouba, Lemoudou et Zagora) et quatre pluviomètres manuels (Mâle, Djektouba, Lemoudou et Zagora). Pour la saison 2006, le réseau était par contre totalement opérationnel.

La localisation de ces stations dans ce bassin versant à faible relief (entre 75 à 110 mètres) est présentée à la figure 24 et répond à divers critères. Ainsi, le matériel a été installé dans différents villages (condition nécessaire pour la protection de l'appareillage) à l'intérieur ou aux limites du bassin versant.

Si la mise en place de ce dispositif se voulait être la plus représentative possible, le choix de l'emplacement des pluviomètres a néanmoins été conditionné par la distribution spatiale des villages. Malgré cette contrainte, nous avons tenté d'obtenir une disposition du réseau de mesures la plus diffuse et la plus représentative possible du milieu.

Les habitants (souvent le chef de village) ont, après explications spécifiques, assuré les relevés des pluviomètres manuels et leur entretien. Les pluviomètres ont été installés dans une parcelle grillagée à cet effet pour éviter la dégradation éventuelle du matériel par les animaux ou par les enfants ou encore par les curieux.

Figure 24 : Localisation des stations pluviométriques sur le bassin versant de Mâle



Aux stations de Djektouba, Lemoudou et Zagora, les pluviomètres automatiques ont été systématiquement doublés d'un pluviomètre manuel pour pallier d'éventuelles pannes des instruments automatiques. La photographie n°11 présente les deux types de pluviomètres installés à la station de Zagora (pluviomètre manuel en blanc et pluviomètre automatique en noir).

Photo 11 : Station de Zagora avec les deux types de pluviomètres



Source : A. BALLEUCHE

Septembre 2006

La nécessité de disposer de cinq pluviomètres automatiques a pour objectif d'avoir une précision fine (0,2 mm) de l'intensité pluviométrique pour la modélisation hydrologique. De simples relevés quotidiens n'auraient pas permis une telle approche méthodologique.

Pour les pluviomètres automatiques, nous avons réalisé une collecte des données une fois par mois. Quant aux données des pluviomètres manuels, elles ont été notées dans un carnet et collectés à la fin de la saison des pluies.

Ces précieuses informations, couvrant les saisons des pluies de 2005 et 2006, nous serviront à la compréhension du remplissage du lac et à la caractérisation de la dynamique spatiale des pluies dans le bassin versant.

IV.2. Analyse des pluies journalières

Avant d'analyser les résultats obtenus pour les deux années de mesures, l'étude des neuf années d'enregistrement des pluies à Mâle est brièvement abordée. Depuis janvier 1998, le village de Mâle est doté d'un pluviomètre manuel implanté par l'Agrhymet mauritanien dans l'objectif de densifier son réseau d'observation terrestre de précipitations.

L'évolution des précipitations annuelles sur cette courte période est présentée à la figure 14. La moyenne pluviométrique est de 220 mm et, comme dans toutes les zones arides, une forte

variabilité interannuelle se dégage de ce petit échantillon de données puisque les totaux annuels peuvent varier de 145 mm (en 2002) à 340 mm (en 2000).

De l'analyse des données quotidiennes (Fig. 26), il ressort que le nombre moyen de jours de pluie est 13,2, avec une variabilité (écart-type) de 2,4 jours en moyenne. Par ailleurs, on constate en moyenne qu'il y'a 8,6 ($\pm 1,9$) averses par an supérieures ou égales à 10 mm. Pour des précipitations plus importantes, une très forte variabilité est observée. Ainsi, les pluies quotidiennes supérieures ou égales à 20 mm s'observent en moyenne 3,8 ($\pm 1,9$) par an mais avec une forte disparité interannuelle (7 événements en 2000 contre un seul en 2003). Quant aux précipitations supérieures à 40 mm, elles sont peu fréquentes ($1 \pm 0,9$) et sont tantôt absentes, tantôt observées à deux reprises sur une seule saison des pluies.

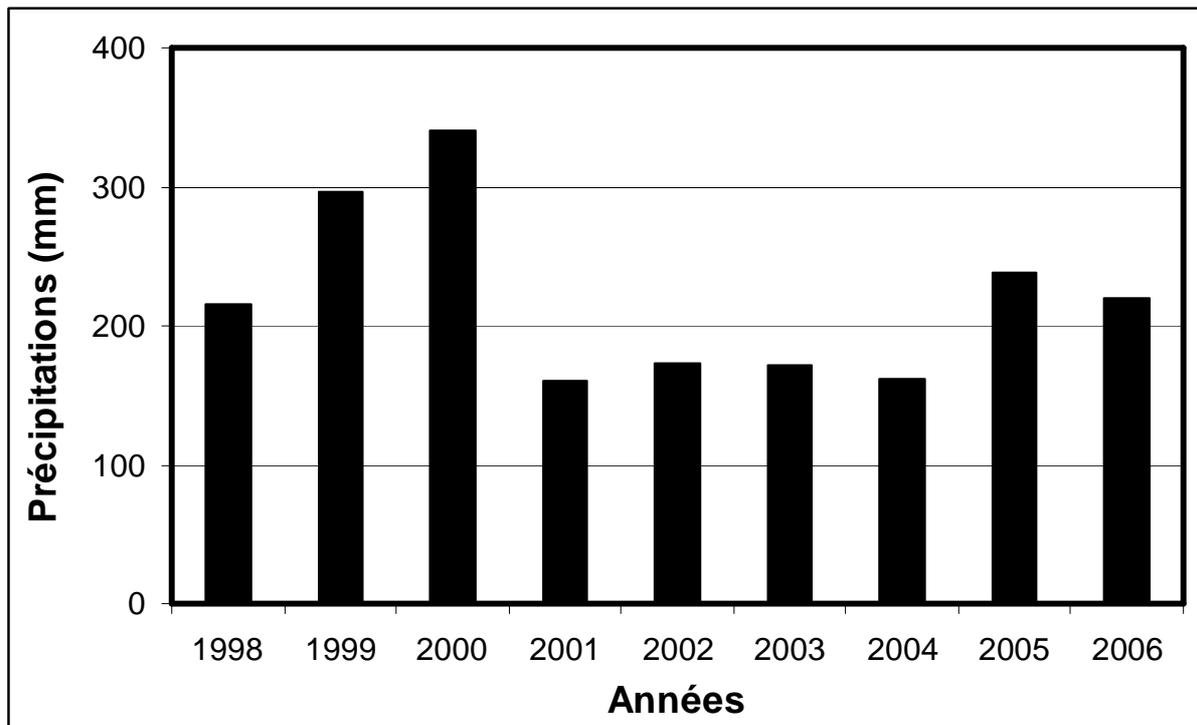


Figure 25 : Précipitations annuelles à la station de Mâle de 1998 à 2006

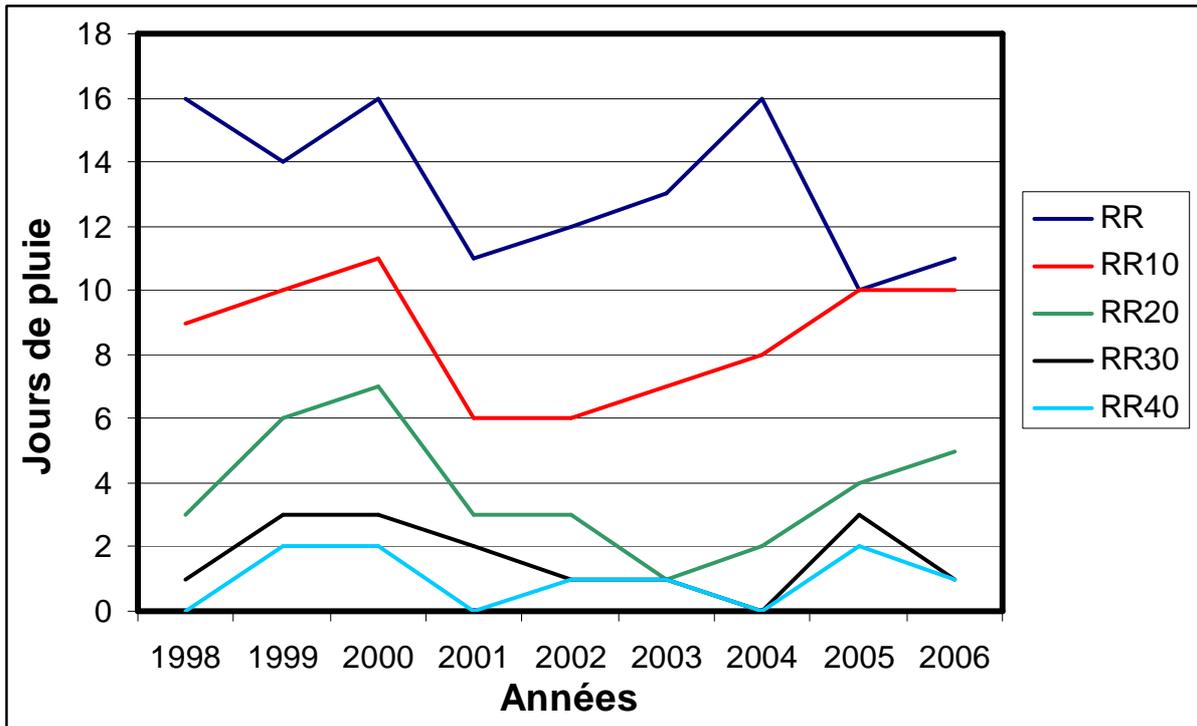


Fig. 26 : Evolution du nombre de jours de pluie à la station de Mâle de 1998 à 2006. Nombre total (RR), nombre de jours de pluie ≥ 10 mm (RR10), 20 mm (RR20), 30 mm (RR30) et 40 mm (RR40)

IV.3. Analyse des intensités

IV.3.1. Définition

On définit une averse comme un épisode pluvieux continu, dont la durée peut varier de quelques minutes à une centaine d'heures et intéresser une superficie allant de quelques kilomètres carrés (orages) à plusieurs milliers de kilomètres carrés (pluies cycloniques). Elle est caractérisée à la fois par sa hauteur et sa durée, c'est-à-dire son intensité.

L'intensité des précipitations varie à chaque instant au cours d'une même averse suivant ses caractéristiques météorologiques. Plusieurs pointes d'intensité peuvent avoir lieu au cours d'une même averse.

L'intensité moyenne (i_m) d'une averse s'exprime par le rapport entre la hauteur de pluie totale (h) observée durant la durée (t) de l'averse :

$$i_m = \frac{h}{t}$$

Où im est l'intensité moyenne de la pluie [mm/h, mm/min], h est la hauteur de pluie de l'averse [mm], et t est la durée de l'averse [h ou min].

Pour améliorer nos critères de discrimination des pluies, nous nous intéressons aux deux années de relevés (2005-2006) par pluviomètres automatiques, en choisissant un critère d'individualisation de nos pluies, à savoir un minimum de 10 mm pendant 60 minutes, ne considérant ainsi que les averses de forte intensité. Toutes les petites averses (total inférieur à 10 mm, ou moins de 10 mm pendant 60 minutes) sont donc rejetées.

Au total, 68 pluies répondant à ce critère ont été ainsi retenues. Elles représentent 80 % de l'échantillon total des averses enregistrées. En moyenne, ces averses sont de 25 mm et une durée d'environ 1h20 (80 minutes).

IV.3.2. Analyse des données des pluviomètres

A partir du dépouillement d'un pluviographe d'une station du bassin versant, on détermine, pour chaque averse, les intensités moyennes maxima correspondant à des intervalles de référence (t) croissants (une minute, puis échelonnées de 10 en 10 minutes jusqu'à 60 minutes).

Le tableau 8, reprend l'analyse d'une averse tombée à la station de Zagora, qui a fourni une lame d'eau de 14 mm en 1 heure.

Tableau 8 : Analyse d'une averse à la station de Zagora

Heure	Lame d'eau recueillie (mm)	t	Im (mm/h)
6h39 - 6h40	0,4	1'	24
6h40 - 6h44	3,6	5'	43,2
6h44 - 6h49	6,4	10	38,4
6h49 - 7h09	9	30'	3,2
7h09 - 7h39	1	60'	1

On classe l'intensité Im par ordre décroissant en utilisant toutes les valeurs résultant du dépouillement de 68 averses tombées entre 2005 et 2006 sans tenir compte de leurs

chronologies. La plus grande intensité observée en 30 minutes est de 80 mm/h, et environ 65% des averses atteignent sur les trente premières minutes une intensité supérieur à 25 mm.

Tableau 9: Classement des intensités maximum atteintes pour t = 30 min
(Stations du bv, 2 ans d'observations)

Nombre d'averses	1	2	5	6	13	17	17	7
Hauteur brute (médiane)	40	32,5	27,5	22,5	17,5	12,5	7,5	2,5
Intensité moyenne de la pluie (lm)	80	65	55	45	35	25	15	5

La majorité de nos pluies comportent donc un caractère intensif, très court dans le temps avec de fortes intensités.

IV.4. Les formes de pluies

Les résultats présentés sur les figures (27, 28 et 29) montrent une forte variabilité des intensités de pluies selon le temps.

Ces relevés ont été faits sur trois pluviomètres automatiques du bassin versant (Zagora, Mâle et Djektouba entre 2005 et 2006).

On observe une intensité moyenne d'environ 50 à 60 mm/h dans les cinq à 10 premières minutes de l'averse, puis l'on passe à de très faibles intensités, inférieure à 5 mm/h après vingt minutes.

La majeure partie des fortes intensités se concentrent dans les 15 premières minutes de l'orage. On peut caractériser alors l'averse par un corps d'averse de très courte durée enregistrant la majeure partie du volume précipité, suivi d'une queue d'averse qui peut durer plusieurs heures avec de très faibles précipitations.

Figure 27 : Répartition des intensités de l'averse du 15/07/2005 à la station de Zagora

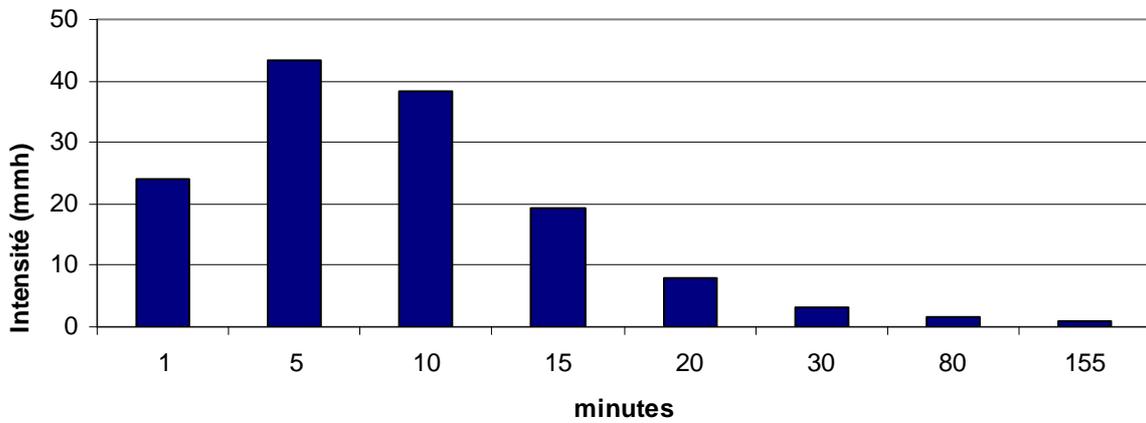


Figure 28 : Répartition des intensités de l'averse du 15/07/2005 à la station de Mâle

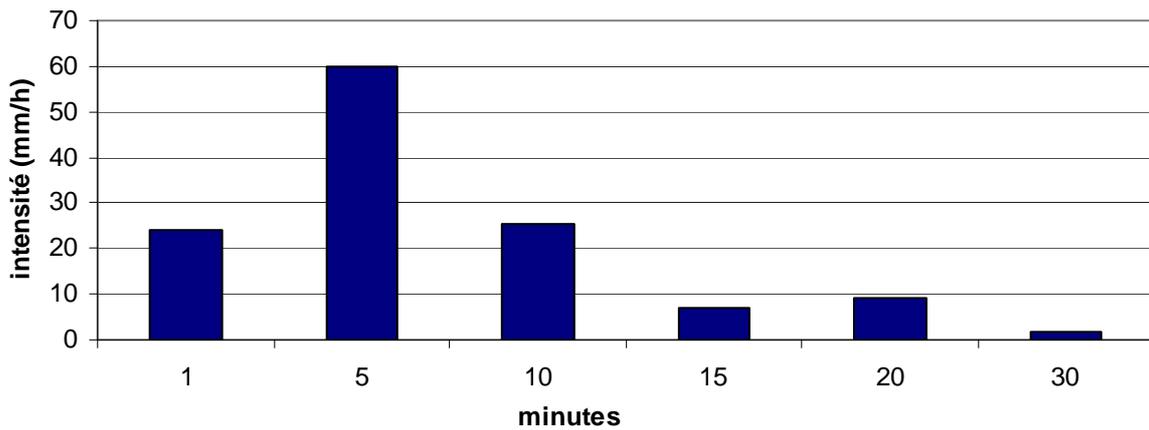
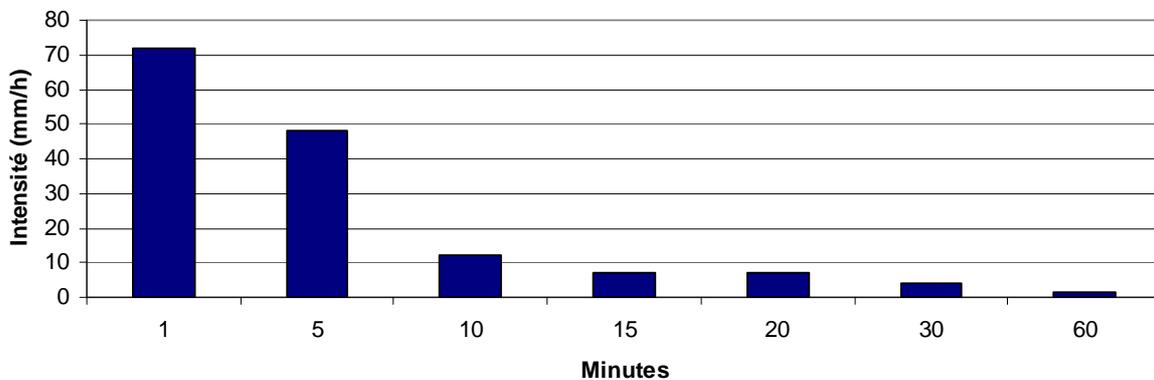


Figure 29 : Répartition des intensités durant l'averse du 5/09/2006 à la station de Djektouba



Pour confirmer ce schéma sur les intensités, nous avons utilisé cette fois-ci les volumes précipités nous servant du mode de représentations proposé par Huff en 1967.

Selon la méthode nous pouvons diviser notre échantillon d'averses en 4 types de pluie suivant que la partie intense se situe dans le 1, 2, 3 ou 4^{ème} quartile de la période pluvieuse, (Fig.30).

Cela démontre bien que la partie intense se situe dans la première moitié de la période pluvieuse, près de 60% du volume cumulé se situent dans les vingt premières minutes (Fig.31). Ribenstein, 1990, a trouvé sur 108 averses à Niamey dans les quatre quartiles (76%, 17%, 6%, 1%) et à Ouagadougou sur 129 averses (64%, 21%, 9%,6%). Nous, sur 60 averses, nous trouvons une moyenne de (40%,20%,10%) ce qui indique que 60% du volume d'eau précipité tombe dans les vingt premiers pourcents du temps des averses (début de l'averse).

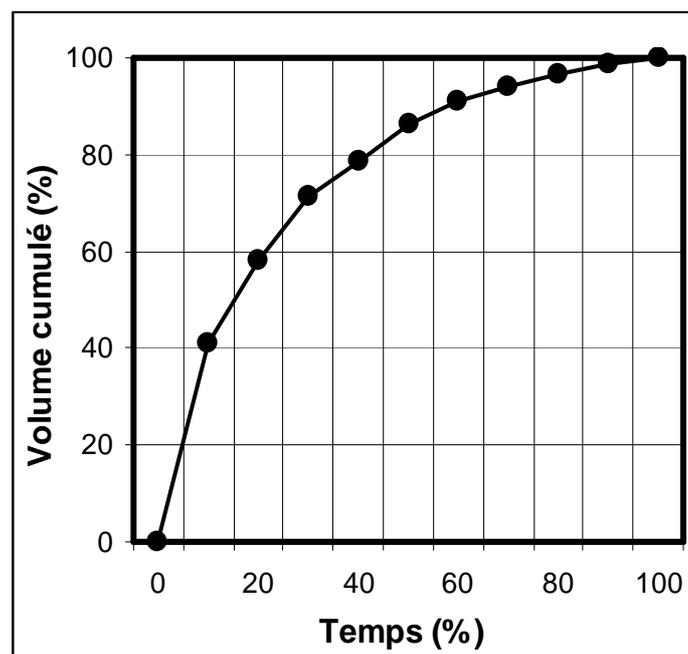
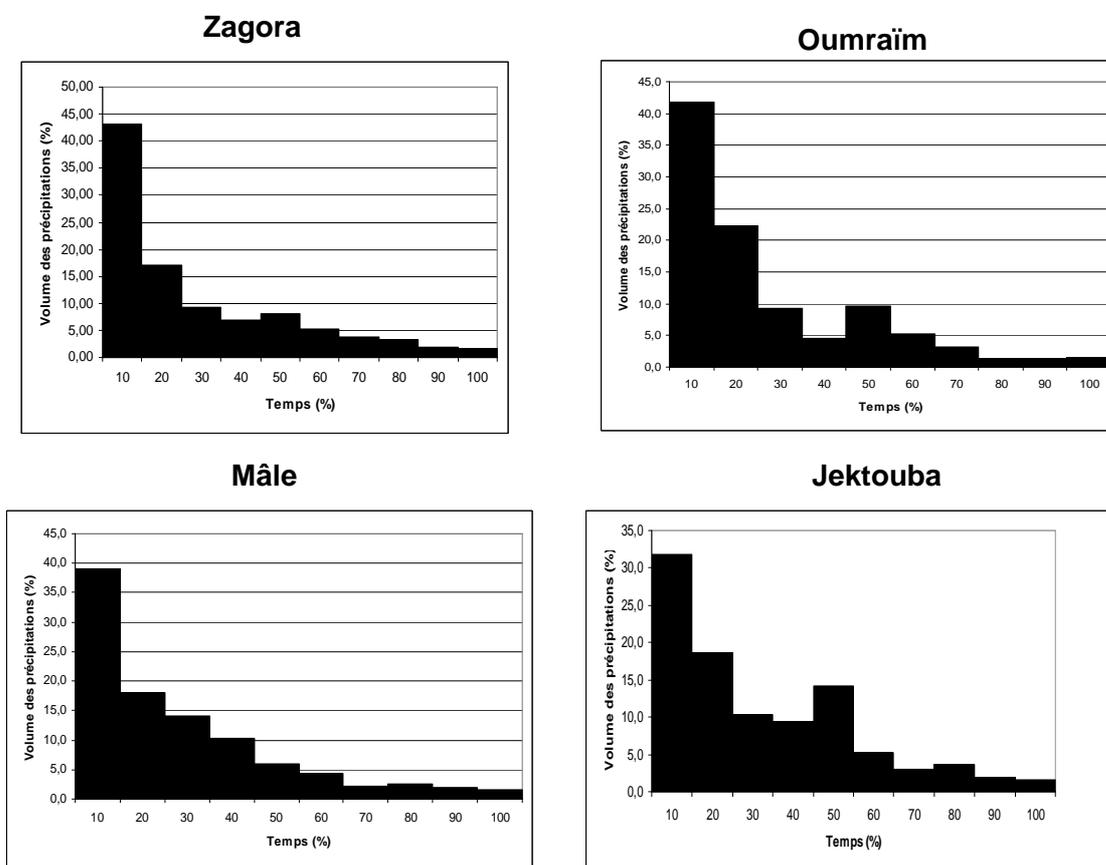


Figure 31 : Volume précipité par rapport au temps

Les fortes pluies sahéliennes formées avec deux parties bien distinctes (corps et traîne d'averse) possèdent donc une forme assez homogène.

Figure 30 : Distribution des volumes précipités entre 2005-2006 en fonction du temps (diagrammes de Huff) pour les fortes pluies de Mâle, Zagora, Oumraïm et Djektouba



Réalisation : J.GASSANI, 2007

IV.5. Analyse de la répartition spatiale des averses entre 2005 et 2006

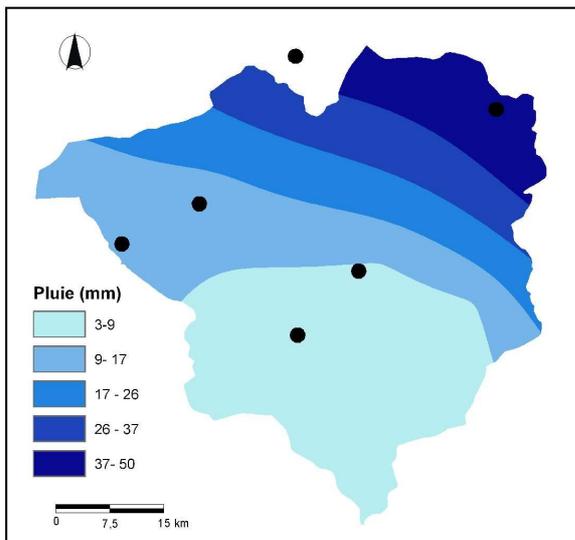
La variabilité de la répartition spatiale des pluies en région aride n'est plus à démontrer. Sivakumar et Hatfield 1990, trouvent des différences de 2 à 62% sur la moyenne pluviométrique d'une averse sur 500 hectares équipés de 18 pluviomètres enregistreurs. Linsley et Kohler (1951) ont utilisé quant à eux un réseau de 55 pluviomètres enregistreurs sur 570 km².

Les traitements des pluies journalières, que nous avons réalisés à partir des données collectées sur les pluviomètres automatiques de notre bassin versant, nous amènent à constater cette très grande hétérogénéité de la répartition de ces pluies, malgré un espace assez

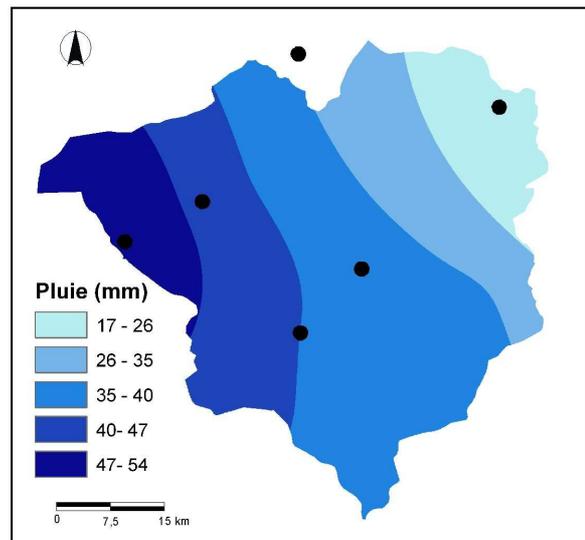
homogène au niveau de sa morphologie, principalement caractérisée par un très faible relief (cf fig 24).

Le premier orage de mousson du 16/07/2006 (Figure 32, carte a), comprend une répartition spatiale des pluies très hétérogène, avec une différence de plus de 50 mm sur un espace de moins de 20 km. Ici les isohyètes sont orientés nord-ouest sud-est

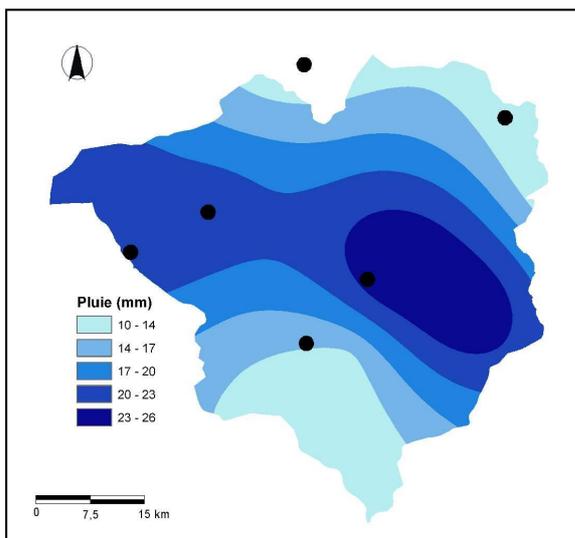
Figure 32 : Répartition spatiale journalière des pluies après quatre évènements pluvieux durant la saison humide 2006



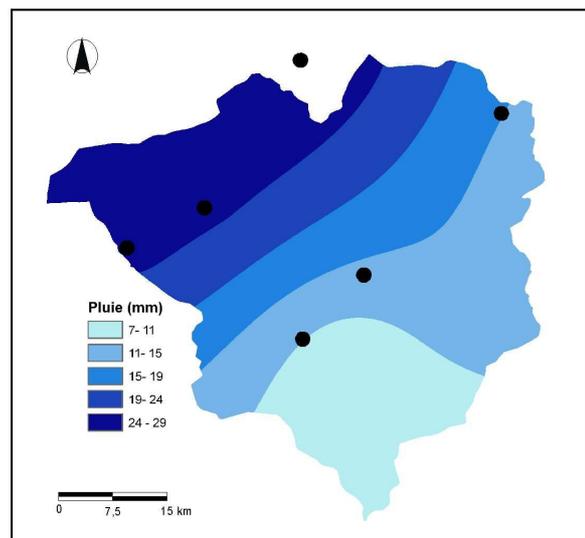
Carte a. 16/07/2006



Carte b. 08/07/2006



Carte c. 13/08/06



Carte d. 27/08/2006

● Localisation pluviomètre

Conception et réalisation : J.GASSANI, 2007

Source : Données J.GASSANI, 2006

Sur la carte a de la Figure 32 on peut observer ce phénomène entre la partie centre et centre sud qui enregistre une faible pluviométrie et la partie nord-est où la pluviométrie est beaucoup plus prononcée. Les stations de Lemoudou et de Zagora situées au nord est on reçoit une très forte quantité de pluie (environ 50mm) quand au sud du bassin versant il totalise environ 5mm, soit une différence de 100 %.

La seconde carte (b) quant à elle illustre également la distribution très hétérogène et hasardeuse des pluies. Dans le cas présent c'est l'ouest qui est le plus touché par l'averse, avec une moyenne de 50 mm. Quant au nord-est il collecte seulement 20 mm soit une différence de plus de 60 %. Les isohyètes de la ligne de grain sont orientées nord-sud, ce qui semble correspondre à l'influence des vents dominants, la ligne de grain s'affaiblissant d'est en ouest.

En trois semaines les maximums pluviométriques se sont localisés aux extrémités ouest et est du bassin versant.

La carte c qui illustre la pluviométrie de l'orage de mousson du 13 août 2006, propose une nouvelle distribution des pluies. Cette fois-ci, le maximum pluviométrique se situe au centre-est du territoire d'étude. Dans ce cas la pluviométrie diminue vers le nord et vers le sud.

La dernière carte (d), du 27 août 2006 propose une pluviométrie sensiblement identique à la carte a mais en symétrique. Le minimum pluviométrique est toujours au sud du bassin versant mais le maximum est enregistré, non plus au nord-ouest mais au nord-est.

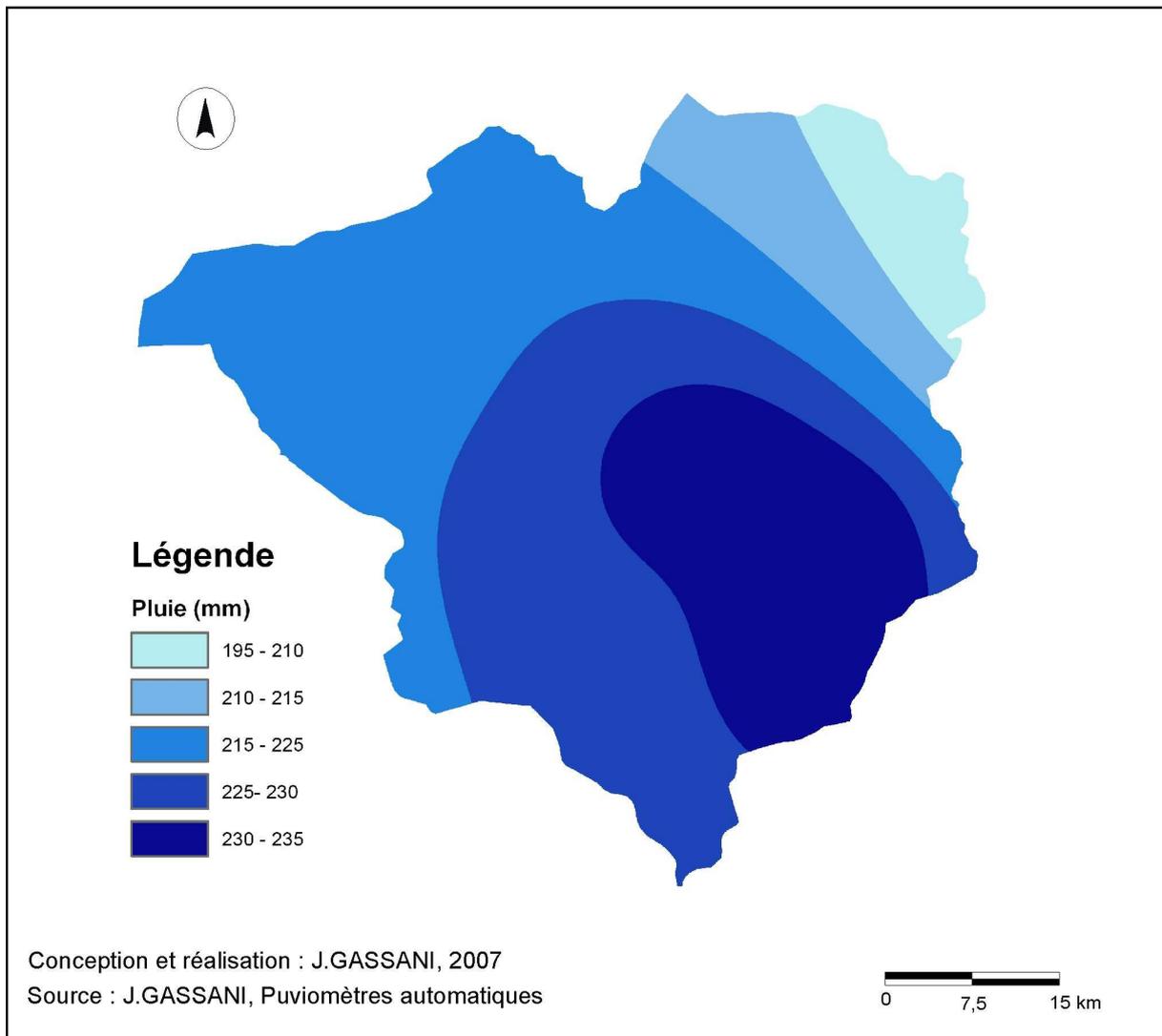
La pluviométrie qui s'exerce sur le bassin versant du lac de Mâle durant la saison humide ne semble pas suivre une tendance régulière. Elle ne paraît pas par exemple conditionnée par l'influence des vents dominants soufflant d'est vers l'ouest en cette saison. D'après nos enregistrements effectués durant la saison humide 2006 seule la carte b pourrait correspondre à ce schéma.

L'hétérogénéité de la pluviométrie est le caractère dominant sur cet espace mais également de l'ensemble des bassins versants sahéliens. Les données recueillies sur le territoire de Mâle vont donc dans le sens des travaux préexistants (Sivakumar, Hatfield 1990).

Une moyenne des pluies mensuelles de 2005 et 2006 a été élaborée afin de préciser les lieux recevant le plus de pluie. Une tendance se dessine et fait apparaître une localisation des fortes précipitations au nord du bassin versant et une plus faible au sud, avec des écarts d'environ 20 mm.

Nous avons également élaboré une carte (Fig. 33) de la pluviométrie sur l'ensemble de la saison humide 2006 sur le bassin versant du lac de Mâle. Cette carte réalisée sur une seule saison des pluies va à l'encontre des résultats de la moyenne sur deux ans. Dans le cas présent le maximum pluviométrique est situé dans la partie Est-sud-est du territoire alors que le minimum est situé au nord-est, très proche, du maximum, tout au plus à une dizaine de kilomètres.

Figure 33 : Répartition spatiale saisonnière de la pluviométrie (juillet-octobre 2006)



Ces cartes illustrent parfaitement bien à la fois la variabilité intra-annuelle des précipitations mais également la variabilité interannuelle tant sur le plan de la quantité de pluie que sur la localisation de ces pluies.

Les déficits ou les excédents de précipitation s'observent donc sur la majeure partie du bassin versant et leurs distributions spatiales ont, semble t'il, peu de rapports avec le relief de la zone. La variabilité spatiale et temporelle des pluies est permanente quel que soit le caractère de la période considérée.

Cette variabilité des totaux pluviométriques, sur une averse, peut causer de nombreux problèmes dans les modélisations hydrologiques, de nombreuses études hydrologiques se servant uniquement d'un seul pluviomètre enregistreur pour prendre en compte les pluies sur un bassin versant. On retiendra que pour améliorer la robustesse d'un modèle on doit jouer sur le nombre de pluviomètres enregistreurs dans le bassin versant pour se rapprocher le plus possible de la réalité climatique.

Conclusion partielle

Les précipitations représentent un processus hydrologique extrêmement variable. D'une part, elles sont caractérisées par une grande variabilité dans l'espace, quel que soit l'échelle spatiale prise en compte (régionale, nationale ou locale). D'autre part, les précipitations sont caractérisées par une grande variabilité dans le temps, aussi bien à l'échelle annuelle qu'à celle d'un événement pluvieux.

Pour la première fois, grâce à une série complète de données pluviométriques annuelles sur soixante-dix ans (1935-2004) pour dix stations, nous avons pu démontrer que la « grande sécheresse » qui s'est installée en Mauritanie dès 1970 s'est terminée en 1992. Depuis, un retour à une pluviométrie plus favorable est bien marqué.

Cependant, les tendances linéaires calculées sur la période 1935-2004 présentent une diminution statistiquement significative de la pluviosité annuelle et, à plus forte raison encore, du nombre de jours de pluie observés en Mauritanie.

Par contre, sur la même période, les pluies les plus intenses, et donc les plus favorables au ruissellement, n'ont pas connu la même raréfaction, mais plutôt une certaine stabilisation du nombre de pluies extrêmes dans le temps.

Sachant que près de 60% de l'intensité pluviométrique se manifeste lors des 20 premiers pourcents des averses, il nous paraît intéressant au niveau du bassin versant de corréler ces informations avec les différentes unités de paysage du bassin versant.

Chapitre III
DYNAMIQUE DES UNITES DE PAYSAGE

Le relief du bassin versant de Mâle avec ses versants à très faible pente (inférieure à 2 %) est très peu marqué. Mais tout comme dans le cadre de la mare d'Oursi au Burkina Faso (Claude et Chevallier, 1985), ce paysage d'apparence monotone renferme en fait une étonnante diversité de milieux et de faciès écologiques. « *Le nombre trop élevé de combinaisons possibles entre les différents types de surface impose pour caractériser le milieu et analyser les processus hydrologiques, de nouveaux concepts : celui d'unités de paysage et d'états de surface* » (Casenave.1989).

Ces concepts ont été souvent utilisés par les hydrologues de l'IRD, ex ORSTOM, pour définir un nouveau mode de représentation cartographique (Valentin, 1986) des bassins versants, ou ne sont prises en compte que les variables conditionnant l'infiltration et le ruissellement.

Les unités de paysage ainsi définies répondent alors à des critères d'homogénéité. Leurs descriptions simplificatrices et celle des états de surface les composant qui correspondent « *à la composition et l'organisation de la surface du sol à un instant donné* » Girard (1999), permettront de rendre compte de la dynamique de ces surfaces et de la perception qu'en fait la télédétection satellitaire.

Nous pouvons citer plusieurs études faites dans ce domaine, par exemple la cartographie des états de surface de la mare d'Oursi au Nord du Burkina Faso (Valentin 1981) et celles réalisées sur le bassin versant de Gargara (Albergel *et al*, 1987).

I. Caractérisation des unités de paysage

La zone de Mâle est caractérisée par trois unités de paysage qui compartimentent cet ensemble :

I.1. Le système dunaire

La région est en grande partie recouverte par les formations dunaires orientées NE-SO, mises en place essentiellement lors des phases arides du Quaternaire, notamment lors de la période dite ogolienne (entre 20 000 et 12 000 ans BP). Il est à noter que d'autres couvertures sableuses ont été mises en place lors d'un épisode aride antérieur, comme le signalent certains auteurs dont Beaudet et al. (1976) ou Barbey (1989).

Ce système se compose de deux sous-unités de dunes :

- Des dunes vives, dites rouges à cause du phénomène d'oxydation opéré lors du pluvial tchadien (période humide entre 12 000 et 7500 BP), qui peuvent avoir une hauteur de 40 à 60 mètres. Elles sont agencées en de longs alignements de direction constante (NE-SO) pouvant s'étendre sur 1 à 3 km et se prolonger jusqu'à 10 ou 15 km à certains endroits.

Photo 12 : Dunes vives et dunes pédogénéisées (Sept 2006)



a. Dunes vives

b. Dunes pédogénéisées

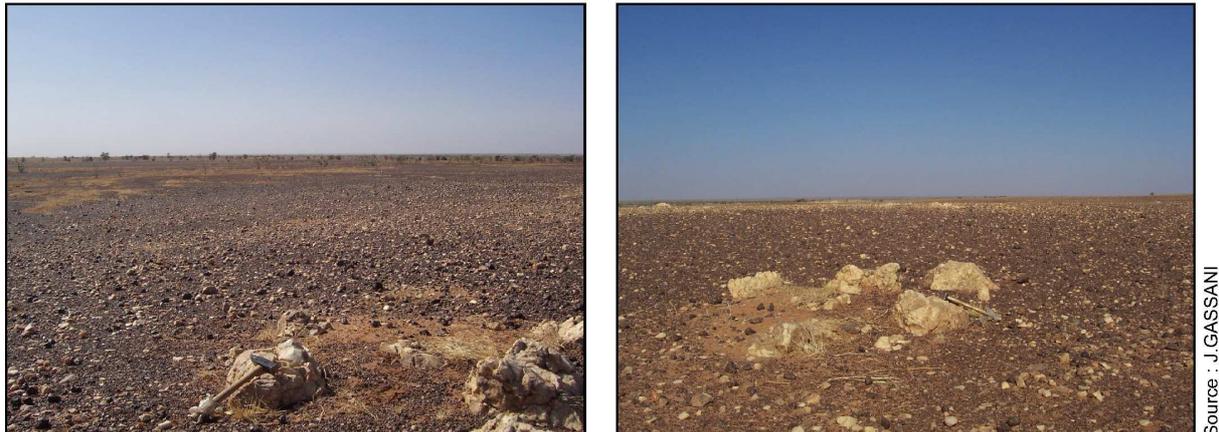
Clichés : ABALLOUCHE

- Des dunes pédogénéisées (sables fixés) localisées dans la continuité immédiate des dunes vives ; elles les prolongent en longs placages sableux de faible altitude.

I.2. Les reg des plateaux et les glacis

Le secteur est du lac est dominé de plateaux grés-quartzitiques démantelés, d'une quarantaine de mètres d'altitude, couvert par un reg à matériel plus ou moins grossier composé de pisolites d'hydroxydes issus du démantèlement des cuirasses ferralitiques et de quartz.

Photo 13 : Plateau et glacis, Est de Mâle



Mars 2005

Source : J. GASSANI

Ils se raccordent au niveau de base des oueds par de très longs glacis recouverts de formations gravillonnaires colluvionnaires, à faible pente. Ces deux unités de paysage ayant les mêmes caractéristiques spectrales, nous les avons regroupées pour ne pas faire de confusions lors de l'analyse par télédétection.

I.3. Les bas-fonds

Les bas-fonds qui concentrent tous les écoulements, représentent une "unité de milieu" spécifique et essentielle au sein des paysages tropicaux. Ces zones de bas-fond sont les axes de convergence préférentielle des eaux de surface, des écoulements hypodermiques et des nappes. Ils reçoivent également les transports solides des versants. On y distingue trois sous-unités, les oueds qui sont des cours d'eau temporaires, les tachourts et les tamourts (Cf, Chap II).

Photo 14 : Tachourt en eau, Est de Mâle



26 août 2006

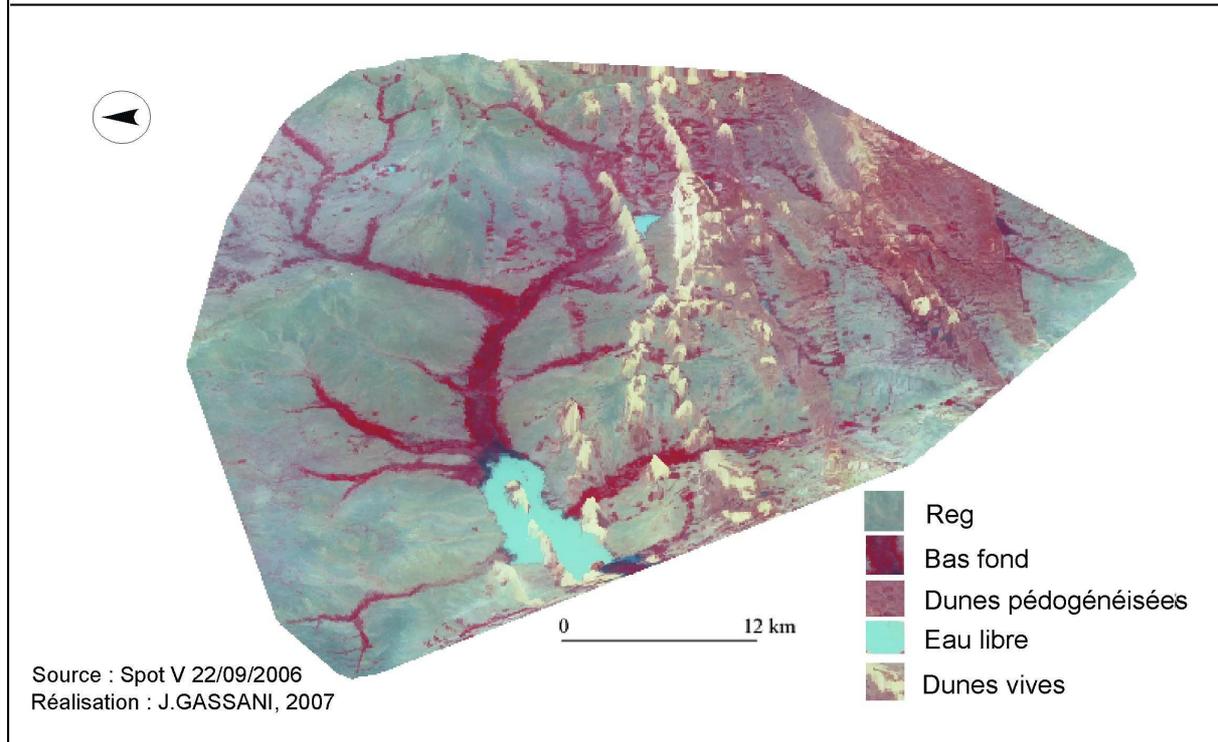
Les écoulements dans ces bas-fonds, sont sporadiques et cessent avec la fin de la pluie qui leur a donné naissance. Il peut néanmoins y subsister de l'eau dans les parties les plus basses du fait de leurs sols très riches en argiles gonflantes (montmorillonite). Dans ces vertisols brun foncés ou noirs, le drainage est très faible. En saison humide, ils sont meubles et collants. Par contre en saison sèche, ces sols sont très durs et montrent de larges fissures correspondant à des fentes de retrait. Au fur et à mesure que l'on remonte vers les berges, les sols deviennent de plus en plus limono-sableux permettant une infiltration plus importante.

Les surfaces de plateaux et de glacis à reg sont particulièrement représentées sur le bassin versant de Mâle, surtout dans sa partie nord (Fig.34).

Les systèmes dunaires, se distinguent en dunes vives au centre du bassin et les dunes pédogénéisées au sud du bassin. Les zones de bas-fond s'articulent autour de l'oued Leye, d'axe est-ouest, qui aboutit à la grande dépression du lac de Mâle.

La caractérisation terrain de ces différentes unités a été complétée par l'apport de la télédétection.

Figure 34 : Modèle numérique de terrain du bassin versant du lac de Mâle



II. La télédétection passive et active comme outil de discrimination des unités de paysage et leurs états de surface

Nous avons utilisé des images Spot 5 à résolution fine (2,5 mètres) et Radarsat (7,5 mètres) de la saison des pluies 2006 pour discriminer et caractériser ces différentes unités ; conjointement à des missions terrain en hivernage et saison sèche de 2005 et 2006.

II.1. Principes physiques de la télédétection

La télédétection suppose l'acquisition d'informations à distance, sans contact direct avec l'objet détecté (Bonn, Rochon, 1992).

Sa définition officielle est « l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objet par mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (Comitas, 1988).

II.1.1. Le rayonnement électromagnétique

La télédétection aérospatiale utilise le pouvoir des corps à émettre et réfléchir des radiations électromagnétiques. Tout corps qui reçoit une certaine quantité d'énergie d'une source extérieure peut en réfléchir ou absorber une partie.

Ce rayonnement électromagnétique, ensemble de deux champs magnétique et électrique, se propage sous forme d'ondes à la vitesse de la lumière. Il est capté par un radiomètre, embarqué dans un satellite et transformé en un signal électrique par un détecteur. Puis ce signal est retransmis au sol lors du passage du satellite au dessus d'une station de réception qui numérise ces données sur des bandes magnétiques qui par la suite sont traitées afin de créer une image (Bonn & Rochon, 1992).

II.1.2. Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique représente les différents types de rayonnement qui sont classés selon leur longueur d'onde et leur fréquence (Bonn & Rochon, 1992).

Ils sont classés en domaines spectraux, depuis les hautes fréquences correspondant aux petites longueurs d'onde (rayon gamma), jusqu'aux plus basses fréquences correspondant aux plus grandes longueurs d'onde. Pour la télédétection nous nous intéresserons aux deux domaines spectraux du visible et de l'infrarouge et aux hyperfréquences pour les images radars (Fig.35).

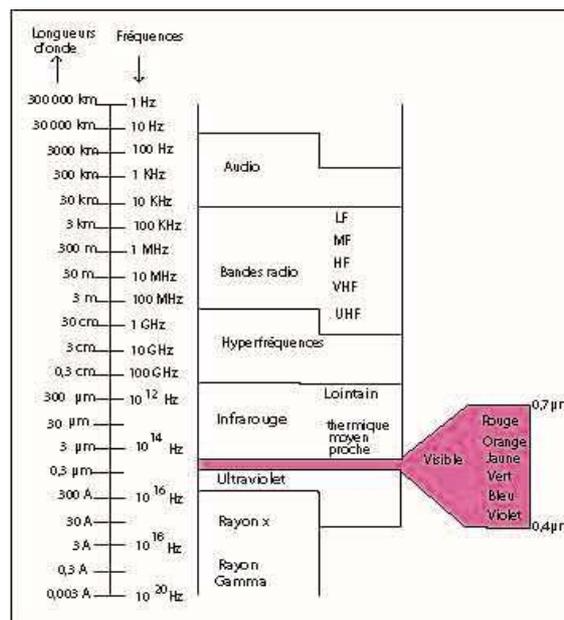


Figure 35: Le spectre électromagnétique Source : (Robin M, 1995)

II.1.3. Propriétés spectrales des objets

La connaissance des propriétés spectrales des surfaces naturelles est un préalable indispensable à l'interprétation des données satellites (Guyot, 1989). L'étude des signatures spectrales s'appuie sur celle des termes du bilan de l'énergie (réflexion, absorption et transmission) dans les différents domaines de longueur d'onde (Fig.39).

II. 1.3.1. La végétation

Le comportement spectral de la végétation chlorophyllienne se caractérise par une forte absorption dans le visible, notamment dans les longueurs d'onde du rouge. La majeure partie du rayonnement reçu est absorbée par les pigments foliaires (Guyot, 1989). En revanche on observe une réflectance élevée dans le proche infrarouge (750 à 1500 nm). Dans ce domaine, les pigments foliaires sont transparents et de plus l'eau contenue dans les feuilles ne présente pas de bandes d'absorption intense (Guyot, 1989). La quantité de rayonnement absorbé par les feuilles est donc très faible.

Ces caractères se traduisent pour les données SPOT par des valeurs de luminance moyennes dans le canal XS1 (bleu vert), plus faibles dans XS2 (Rouge) et élevée dans XS3 (PIR) (Fig.36).

Cette réponse spectrale varie selon l'état sanitaire et la teneur en eau des plantes.

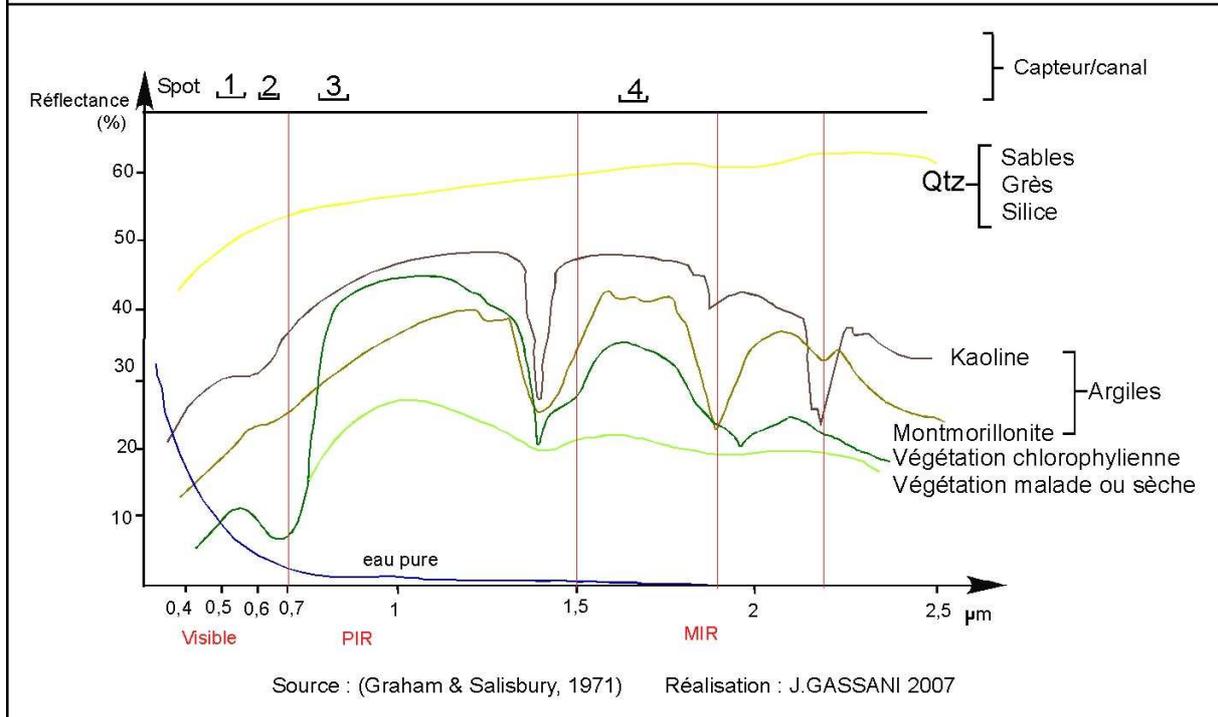
II. 1.3.2. L'eau

La réflectance de l'eau est toujours décroissante entre le visible (réponse moyenne) et le proche infrarouge (réponse très faible). Elle peut être modifiée par la turbidité, car la réflectance de l'eau turbide est toujours plus élevée que celle de l'eau claire.

II.1.3.3. Les objets minéralisés

Ils se caractérisent en théorie par une croissance progressive de la réflectance depuis le visible (400 nm) jusqu'au PIR (1300nm). Mais il est fréquent qu'en réalité les objets fortement minéralisés aient une réponse beaucoup plus faible dans le PIR.

Figure 36 : Réponses spectrales des éléments naturels les plus communs de la surface terrestre



II.2. Principes de l'imagerie radar

Le satellite à capteur radar (radio detection and ranging) est un système actif imageur ; la même antenne sert à la fois à l'émission et à la réception de micro-ondes. Les impulsions émises à une certaine fréquence se réfléchissent sur la cible après un temps de propagation proportionnel à la distance entre l'antenne et la cible (ou portée). Par rapport au système fonctionnant dans le visible et l'infrarouge, un des grands avantages du radar est qu'il peut être utilisé de jour comme de nuit, indépendamment du couvert nuageux, car il utilise une partie du spectre électromagnétique (spectre des hyperfréquences) où l'atmosphère n'atténue que très faiblement les signaux (Polidori, 1997).

L'image radar est le résultat de l'interaction de l'onde émise avec l'ensemble des points du sol (ou cibles) qui jouent alors le rôle de diffuseurs. Elle enregistre le signal émis par le capteur puis rétrodiffusé par les cibles. Les valeurs enregistrées sont donc proportionnelles au coefficient de rétrodiffusion de la surface. L'image radar permet ainsi de mesurer certaines propriétés du sol et du sous-sol ainsi que celles de couverture (Fig.37).

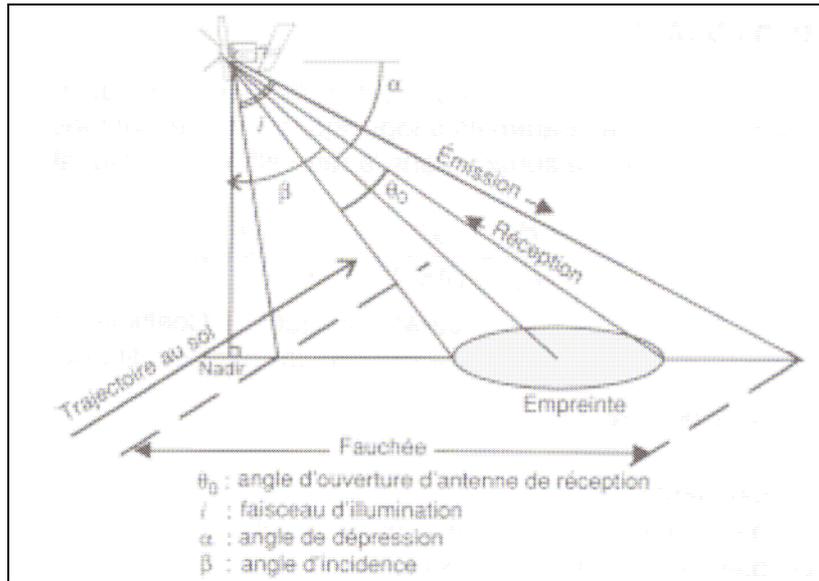


Figure 37 : Principe de l'imagerie radar (Polidori, 1997)

Le capteur est en mouvement et les échos qui caractérisent la réflectivité de la surface sont localisés en fonction de leur distance à l'antenne.

Le coefficient de rétrodiffusion dépend essentiellement des caractéristiques de la surface et de celle de l'onde, ces dernières étant fixées par le système:

- Fréquence de l'onde Radar
- Polarisation (verticale ou horizontale) en émission et réception
- Angle d'incidence de l'onde Radar
 - . caractéristiques électromagnétique du milieu (permittivité, conductivité,..) qui dépendent surtout de l'humidité des surfaces et du sous sol.
 - . géométrie de la surface: rugosité et pente de la surface par rapport au rayonnement (orientation et inclinaison).

Dans le cadre de notre étude où nous avons utilisé des images Radarsat1, la rugosité des surfaces définie par les irrégularités de la surface du sol à l'échelle de l'onde radar nous semble être un paramètre essentiel à la discrimination des différents états de surface. C'est le facteur qui influence le plus l'amplitude du coefficient de rétrodiffusion.

Lorsque les irrégularités sont de dimension supérieure à la longueur d'onde utilisée (5,6 cm pour Radarsat1), la façon dont l'onde va être réfléchi par la surface dépend de la rugosité et plus précisément de la hauteur des irrégularités du sol par rapport à leur longueur d'onde.

II.2.1. L'image radar SAR

Nous avons réalisé durant le mois de février 2007, un stage de recherche au laboratoire de géophysique de l'Université de Miami en Floride afin de nous perfectionner dans le traitement des images radar SAR. Ce type de traitement d'image, très peu employé sur l'Afrique, peut permettre d'apporter de nouvelles informations sur les caractéristiques des états de surface.

L'image SAR (Synthetic Aperture Radar, ou radar imageur à ouverture synthétique) est une image radar à haute résolution obtenue au moyen d'un radar à ouverture de synthèse. Il s'agit d'un radar à antenne virtuelle, caractérisée par une antenne courte tirant parti du mouvement de l'avion ou du satellite porteur (utilisation de l'effet doppler). L'antenne virtuelle est beaucoup plus longue que ce que pourrait être une antenne réelle et permet ainsi une nette amélioration de la résolution longitudinale (résolution en azimut). Plusieurs satellites sont dédiés à l'imagerie SAR. Dans l'ordre chronologique, de mise en orbite, on peut citer SEASAT (juin 1978), ERS-1 (juillet 1991), JERS 1 (février 1992), ERS-2 (avril 1995) et Envisat (Mars 2002).

Au sens mathématique, l'image Radar SAR est une image complexe avec une information d'amplitude et une information de phase du signal rétrodiffusé. L'amplitude, qui correspond à la racine carrée de l'intensité de l'image, dépend de la réflectivité et de la géométrie de la surface.

La phase contient deux étapes:

- Le premier est relatif au chemin optique parcouru par l'onde radar entre le capteur et la cible, c'est la phase de transport du signal.

- Le second concerne la rétrodiffusion, c'est la phase de reconstruction résultant des réponses de chacun des diffuseurs au sein du pixel considéré, elle est donc très aléatoire et varie d'un pixel à l'autre.

II.2.2. Traitement des états de surface par SAR

La télédétection par SAR est une technique très fiable pour suivre les changements des états de surface. L'analyse des images SAR produit deux traitements indépendants :

La rétrodiffusion des intensités et la rétrodiffusion du signal de phase. Ces images peuvent couvrir une zone de 50-400 km avec une résolution de pixel de 10 à 100 mètres, selon les paramètres d'acquisition du satellite.

La première, la rétrodiffusion de l'intensité est souvent représentée par des images comprenant un dégradé de gris, très sensible à la propriété des états de surface. L'amplitude des images est généralement utilisée pour la classification des états de surface, l'humidité des sols, etc.

La seconde mesure la rétrodiffusion du signal de phase ; elle mesure la fraction de la longueur d'onde qui retourne à l'antenne du satellite. Ce signal très sensible détecte tout changement de surface.

Le signal radar envoyé par chaque satellite SAR est réglé à une longueur d'onde spécifique, avec laquelle on détermine l'interaction du signal radar avec le sol. (Fig.38).

Les données collectées par la bande C des satellites (ERS-1, ERS-2, RADARSAT-1, and ENVISAT) ont ainsi été reconnues très utiles pour le suivi des états de surface des zones humides (Bourgeau-Chavez et al. 1996; 2005, Kasischke and Bourgeau-Chavez 1997, Kasischke *et al.* 2003)

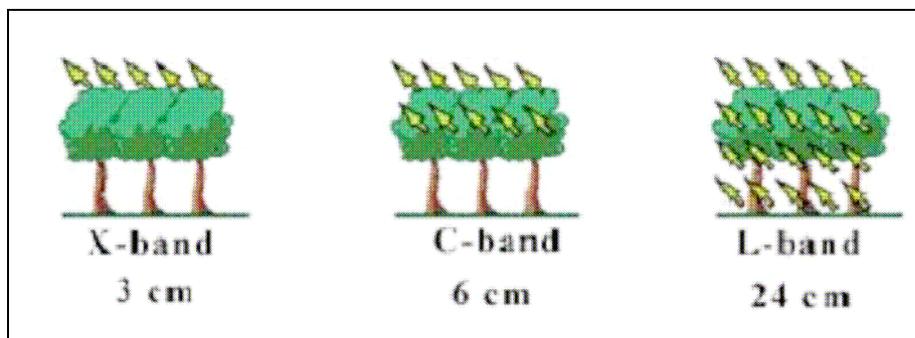


Figure 38 : Niveau de pénétration du signal SAR sur la végétation en fonction des longueurs d'onde

II.2.3. Analyse du changement du signal de rétrodiffusion des états de surface

Le signal de rétrodiffusion SAR, est très sensible aux propriétés des états de surface, lesquelles peuvent changer dans le temps. Il peut être affecté par l'humidité des sols, par la présence d'eau en saison humide, et par la végétation (Fig.39).

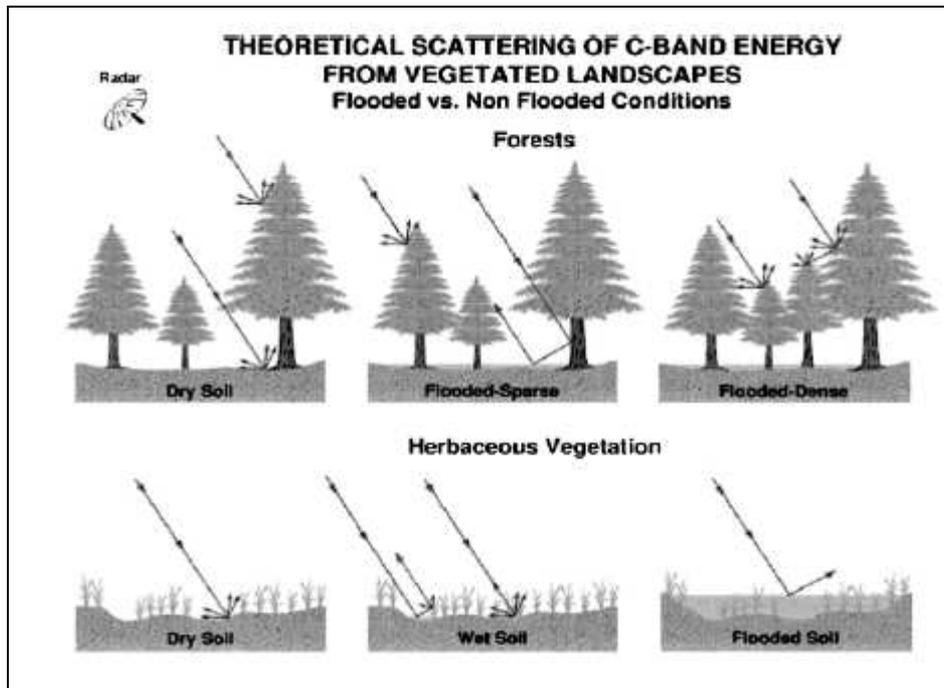


Figure 39. Influence des états de surfaces sur la diffusion des ondes radar SAR (Bourgeau-Chavez et al, 2005)

De nombreuses études ont montré que la rétrodiffusion du signal SAR est fortement corrélée avec la teneur en humidité des sols sur les dix premiers centimètres (Haider *et al.*, 2004; Kasischke *et al.* 2003; Leconte *et al.*, 2004; Le Hégarat *et al.*, 2002).

Le signal SAR est aussi très sensible à la présence d'eau en surface. Des études ont montré l'utilisation de données SAR pour le suivi saisonnier des zones humides (Kasischke *et al.* 2003; Bourgeau-Chavez et al. 2000, 2005) et pour la cartographie des inondations (Imhoff et al. 1987; Blyth, 1997; Moeremans *et al.*, 1998; Pellizzeri et al., 2003; Kiage et al. 2005). La technique basée sur la rétrodiffusion du signal a été utilisée pour détecter les zones d'inondations (Imhoff *et al.*, 1987; Pellizzeri et al., 2003), ou la variation temporelle de rétrodiffusion des images acquises à différentes dates (Moeremans et al., 1998, Kiage et al, 2005).

La rétrodiffusion du signal connaît aussi des limites : elle peut être influencée par le vent sur les surfaces d'eau libre. Le vent peut causer des ondulations sur les surfaces en eau augmentant la rétrodiffusion (Geudtner *et al.*, IGARSS 1996; Marinelli *et al.*, 1997) et l'intensité du signal peut changer selon le type de végétation.

II.3. Cartographie des états de surface par télédétection passive

La discrimination des unités de paysage s'appuie donc sur la réalisation d'une carte de leur répartition sur le bassin versant, carte réalisée à l'aide de la télédétection passive.

II.3.1. Les traitements d'images Spot pour la cartographie des unités de paysage du bassin versant

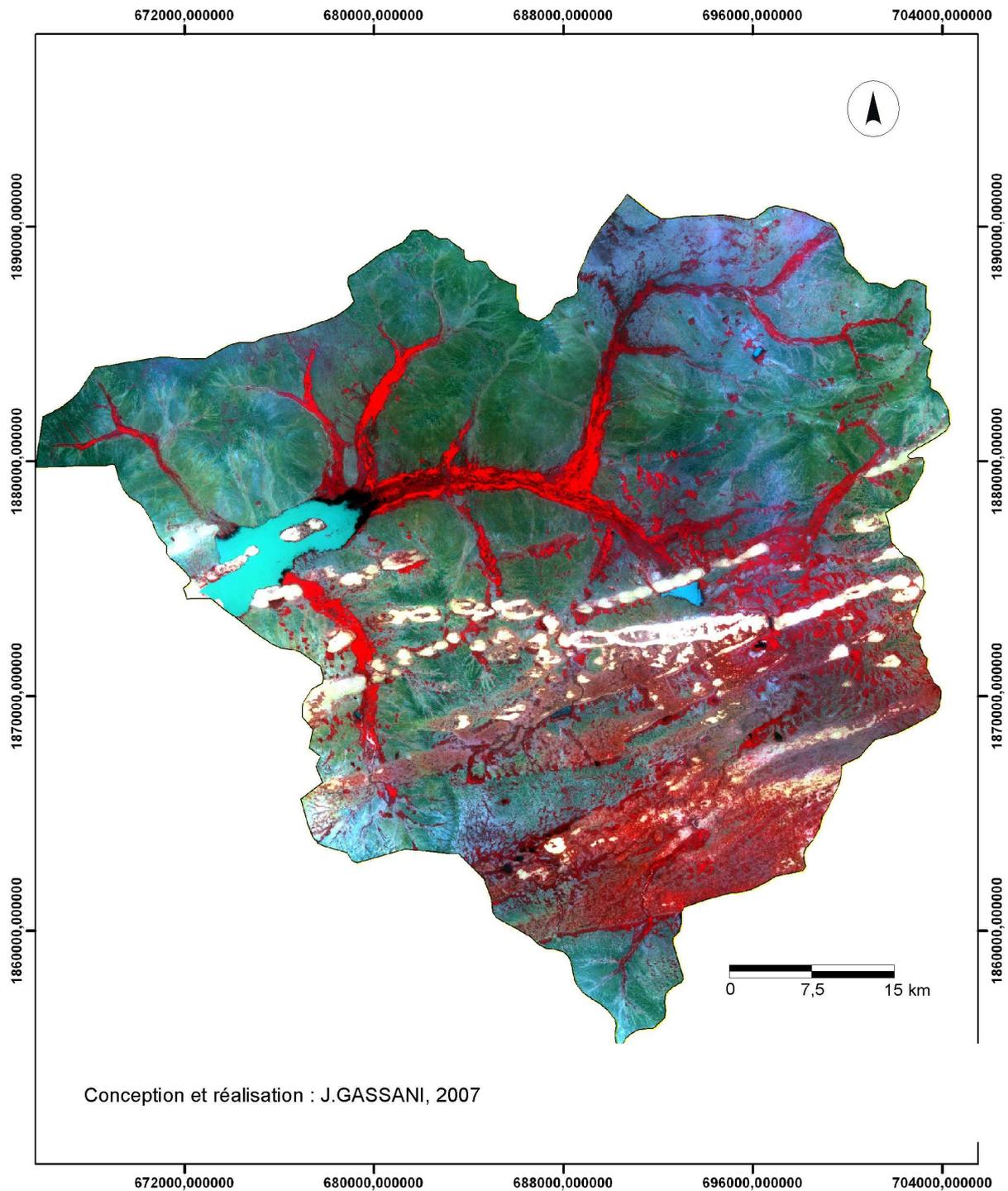
La caractérisation des états de surface du terrain d'étude, passe dans un premier temps par la création de néo-images comme l'indice de minéralisation, les compositions colorées, de différents canaux bruts. Seuls les traitements apportant des informations qualitatives concernant ces états de surface sont présentés ici.

II.3.1.1. La composition colorée

C'est la combinaison de trois canaux auxquels on affecte la couleur bleue, verte et rouge, qui correspond à une amélioration visuelle de l'image, chaque canal apporte une information spécifique sur la nature des objets observés.

La composition colorée la plus illustrative des images Spot du 25 septembre 2006, se caractérise par le canal XS 1 en bleu, le canal XS2 en vert et le canal XS3 en rouge (Fig.40). On observe que la végétation chlorophyllienne qui est représentée par la couleur rouge, se concentre principalement dans les bas-fonds. Les cordons dunaires vifs d'orientation Est Ouest se discriminent également au centre du bassin versant.

Figure 40 : Composition colorée du bassin versant du lac de Mâle
25 septembre 2006, Spot V (2,5 m)



II.3.1.2. Les indices

Ce sont des néo-canaux résultant d'opérations arithmétiques à partir de combinaisons entre deux ou trois canaux (BV, R, PIR, MIR), choisis en fonction des objectifs thématiques recherchés.

On les utilise visuellement ou en composition colorée pour aider à l'interprétation d'images, ou pour en extraire des masques qui seront utilisés pour améliorer des classifications. L'indice NDVI (indice de végétation) est le plus connu, il sert à visualiser la répartition de la végétation chlorophyllienne.

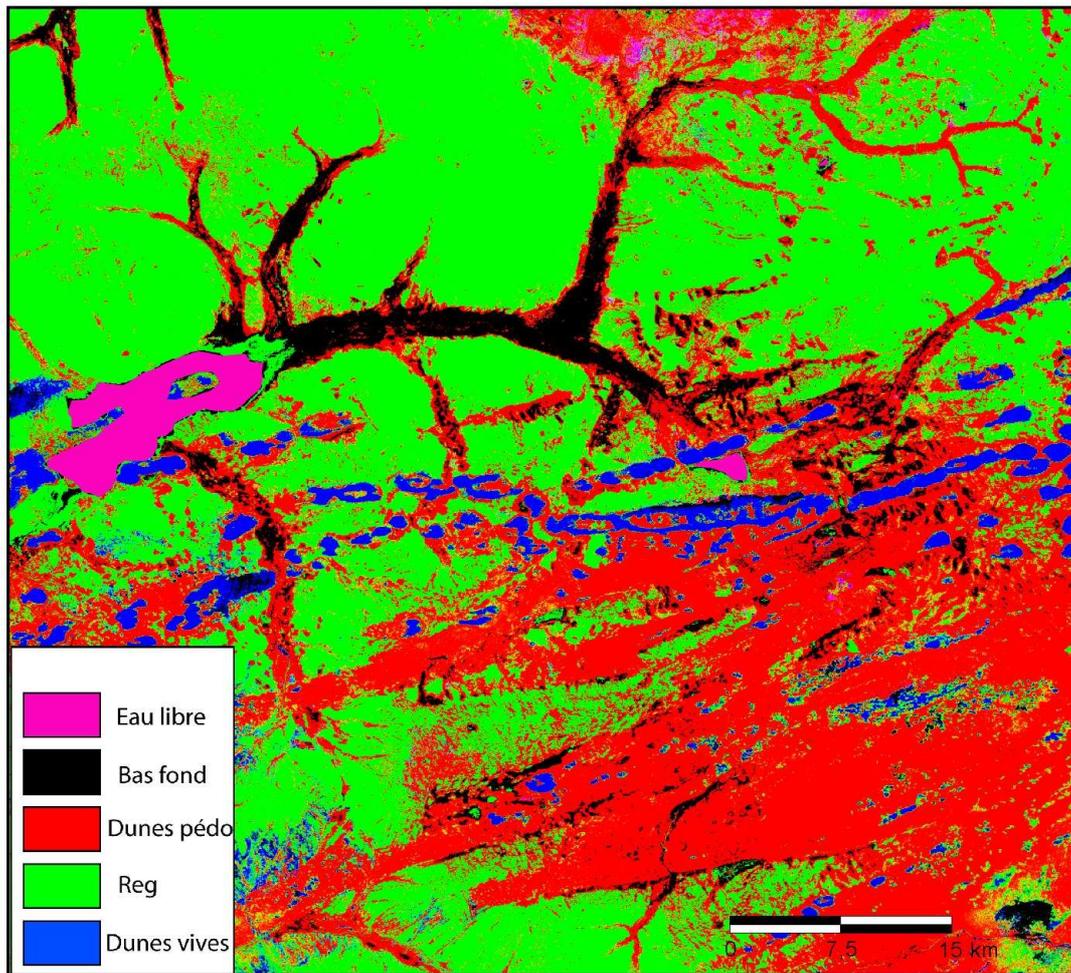
II.3.1.3. La classification supervisée

Classer une image consiste à rassembler l'ensemble des pixels de l'image en un nombre limité de classes correspondant aux grands éléments thématiques de l'image, ceci en s'appuyant notamment sur les valeurs radiométriques de ces pixels (Fig.41).

Les classifications supervisées s'appuient sur l'identification d'objets appelés "sites témoins" qui serviront de référence pour les autres pixels de l'image.

Nous avons élaboré une classification supervisée sur les trois canaux d'une image Spot 5 (10 m) du 22/09/2006 au moyen du logiciel *Erdas Imagine 8.4*. On y discrimine clairement les cinq unités de paysage définies précédemment. L'image différencie également bien les zones de dunes vives en bleu et les dunes pédogénéisées, qui occupent une très grande superficie au sud-ouest du bassin versant. Les reg des plateaux et glacis occupent aussi de vastes zones au nord du bassin versant. Les zones de bas fond, représentées par la couleur noire, regroupent les oueds, les tachourts et les tamourts. La résolution de l'image empêche par contre de discriminer les dépressions de trop petite taille.

Figure 41 : Classification supervisée par les canaux BV,R et PIR de Spot V,
22septembre 2005

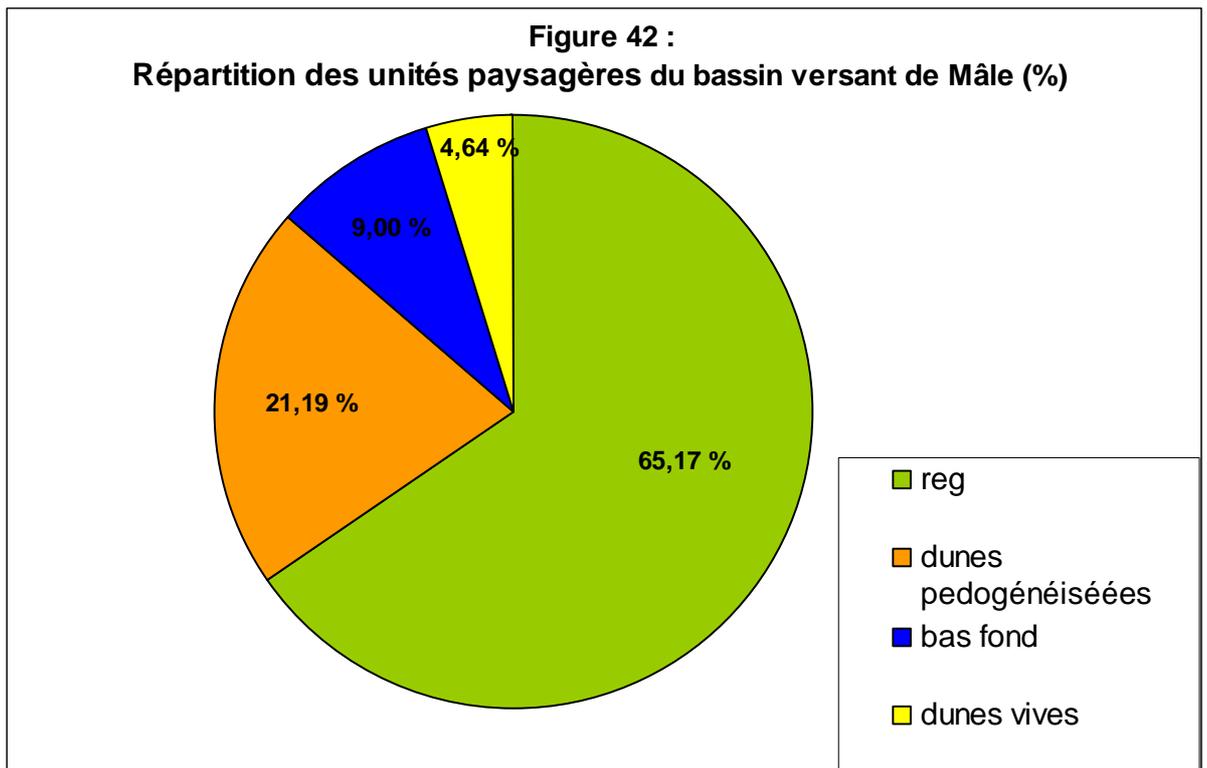


Réalisation : J.GASSANI, 2007

Source: Spot V

Cette classification, réalisée sur des images acquises en septembre, comprend de nombreuses confusions entre différents objets, notamment entre les dunes pédogénéisées et les bas fonds, en raison de l'importance de la couverture végétale chlorophyllienne, en ce mois de septembre, à la fin de la saison humide.

A partir de cette cartographie, nous pouvons quantifier en pourcentage les superficies couvertes par chacune des unités de paysage définies sur le bassin versant du lac de Mâle (nous avons regroupé la classe eau libre dans l'unité bas-fond). Les opérations de calcul des superficies ont été réalisées à l'aide des fonctions d'analyse spatiale du logiciel Arc Gis, en vectorisant les images satellites sur SIG, (Fig.42).

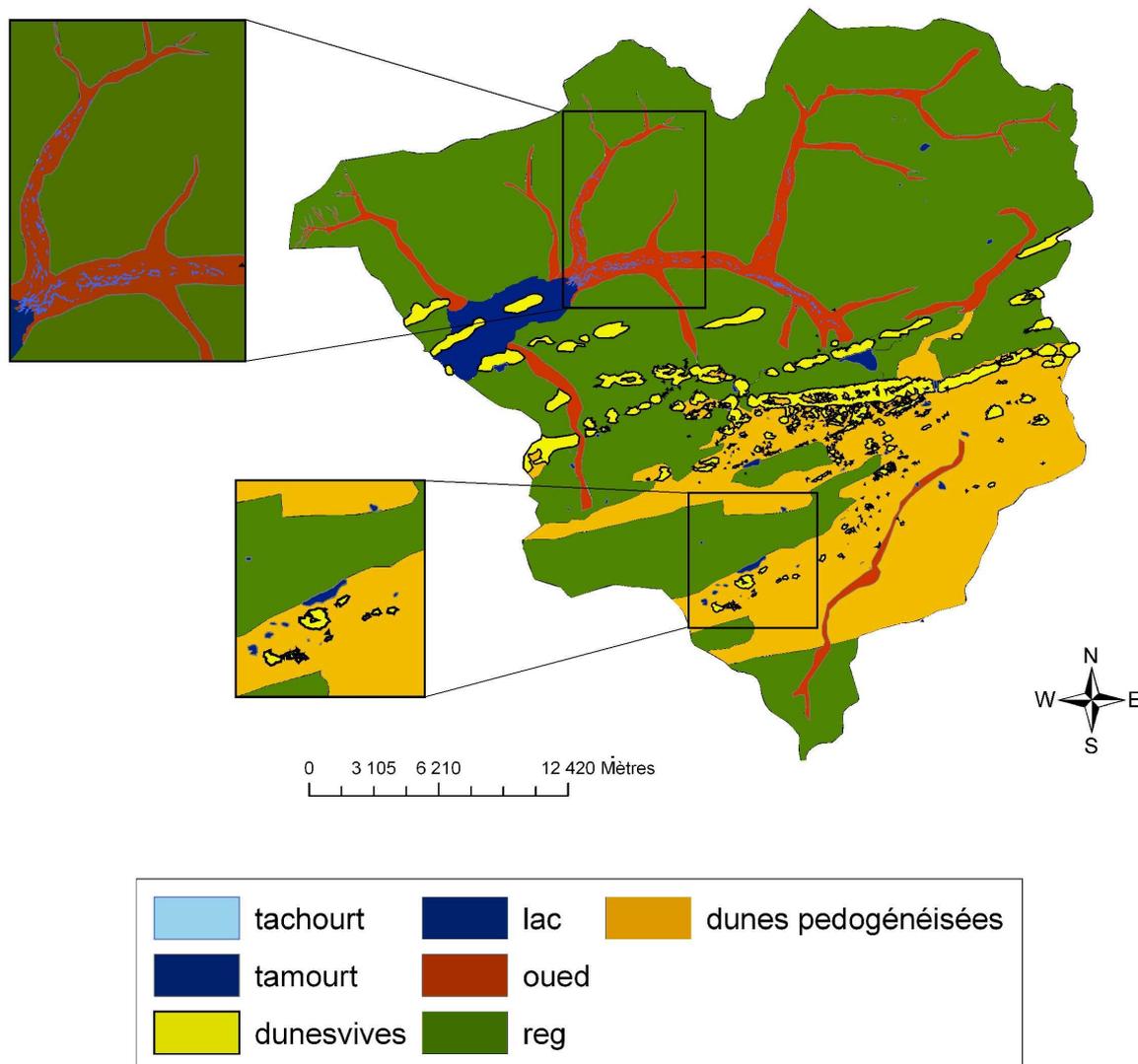


Il en ressort que 65 % du bassin versant est caractérisé par des regs de plateaux et glacis qui, nous le verrons, ont une forte aptitude au ruissellement. Les 26% de surface composées des dunes vives et des dunes pédogénéisées, sont par contre des zones à faible potentiel de ruissellement, et qui se situent pour l'essentiel dans le sud du bassin.

Remarquons (Fig.43) la concentration de bas-fond au sud et à l'est du bassin, importantes zones de stockage d'eau qui contrôlent les apports en provenance de l'amont et qui constituent seulement 0,4% de la superficie du bassin versant (Fig.43).

Si l'analyse supervisée nous permet d'avoir une bonne visualisation de l'ensemble des états de surface du bassin versant, elle génère par contre dans le détail de multiples confusions. L'imagerie radar semble donc être l'outil d'information complémentaire qui va permettre de résoudre ces problèmes.

Figure 43 : Unités paysagères du bassin versant du lac de Mâle



Conception et réalisation : J.GASSANI, 2007

Source : Spot V

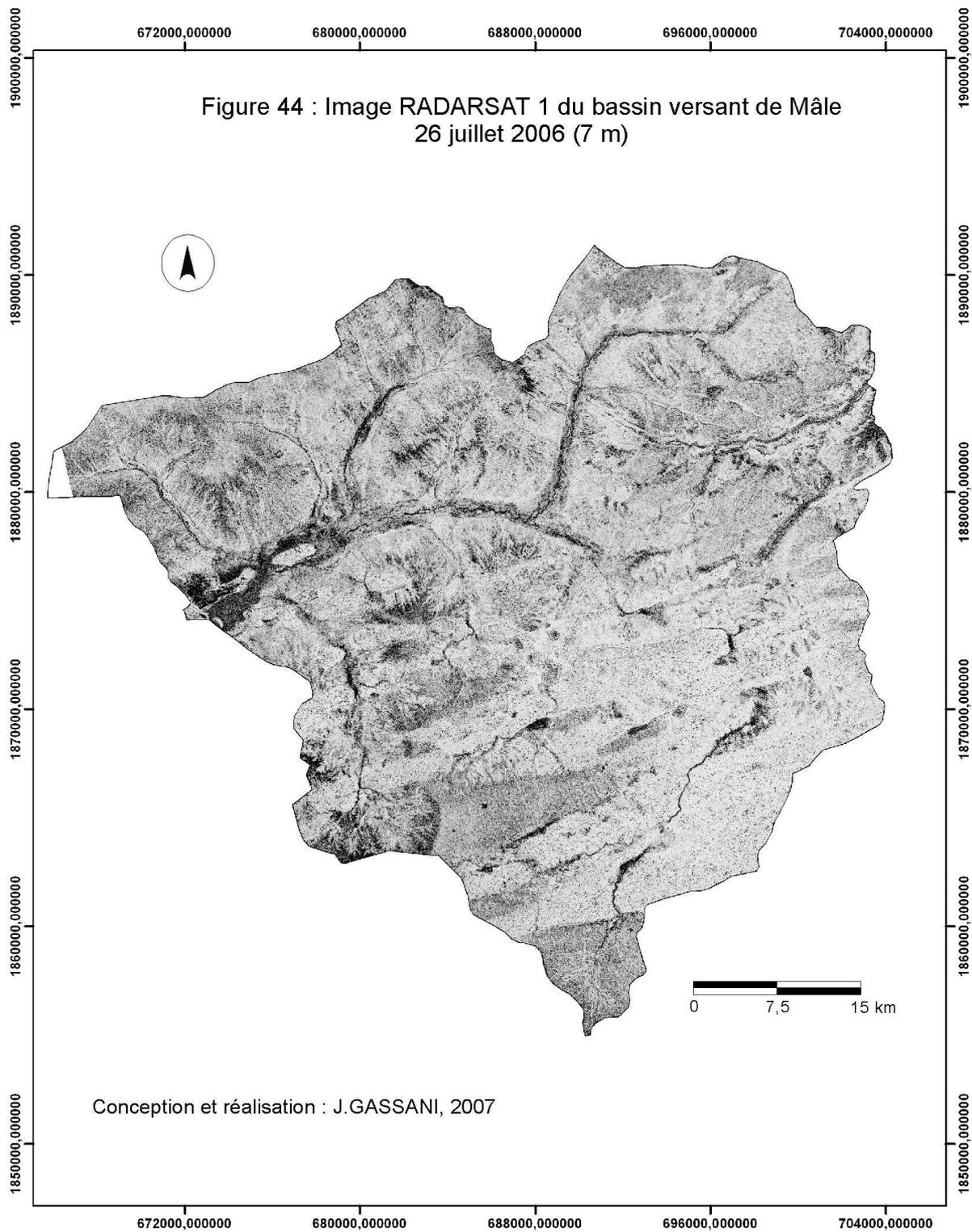
II.4. La télédétection active par Radarsat 1, outil complémentaire à la discrimination des états de surface

En combinant ces données optiques avec l'imagerie radar on peut arriver à surmonter ces difficultés de discrimination des unités de paysage, notamment en utilisant le fonctionnement saisonnier de ces différentes unités.

Pour cela une série temporelle d'images a été acquise pour accéder aux variations des états de surface entre les saisons humide et sèche de 2006. Huit images Radarsat 1 de juin à octobre 2006 (Tab.10) de type SAR et d'une résolution de 7 mètres ont été acquises (Fig.44).

Tableau 10 : Dates d'acquisition des images Radarsat 1

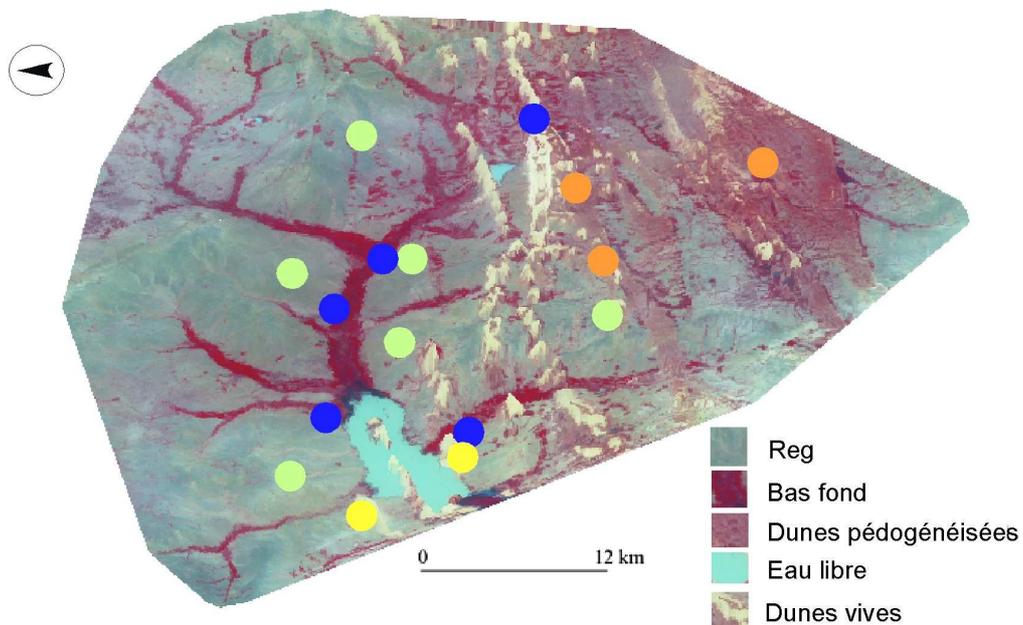
Radarsat 1 (7 mètres)
8 juin 2006
21 juin 2006
15 juillet 2006
26 juillet 2006
8 août 2006
19 août 2006
25 septembre 2006
6 octobre 2006



III. Caractérisation et dynamique des unités de paysage (bas-fond, dune, reg)

Nous avons prélevé sur le terrain, en mars 2006, plus d'une vingtaine d'échantillons pour trois des grands types d'unité paysagère (Reg de plateaux et glacis, bas-fond, système dunaire). Pour le système dunaire, trois échantillons ont été prélevés sur les dunes pédogénésées et deux échantillons sur les dunes vives (Fig.45). Les zones de bas fonds ont été échantillonnées avec cinq prélèvements dans les oueds et à proximité des tachourts. Les plateaux et les glacis ont fait l'objet de cinq prélèvements.

Figure 45 : Localisation des sites de mesures sur le bassin versant



Etats de surface	ID	Nombre d'échantillons
Reg	●	6
Bas-fond	●	5
Dune vive	●	2
Dune pédogénésée	●	3

Conception et réalisation : J.GASSANI, 2007

Source :Spot V 22/09/2006

Des analyses granulométriques qui ont pour but d'étudier la répartition de la taille des particules de ces échantillons, ont été réalisées au laboratoire GEOPHEN à Caen. Ce laboratoire est équipé d'un granulomètre laser Beckman Coulter LS 230. Il est composé d'un banc optique laser associé à un module fluide (1,7 L). Cette analyse est basée sur la diffraction d'un rayon laser par les particules à tester. L'angle de diffraction du faisceau est fonction de la taille des grains.

La gamme de détection s'étend de 0.04 μm à 2 000 μm sur 117 classes de particules. La fraction supérieure à 2 mm, lorsqu'elle existe, a été identifiée et notée pour chaque niveau à l'aide de tamis. Nous avons utilisé à chaque fois des échantillons de 10 grammes.

Le protocole de préparation des échantillons est un savoir-faire spécifique du laboratoire, à savoir :

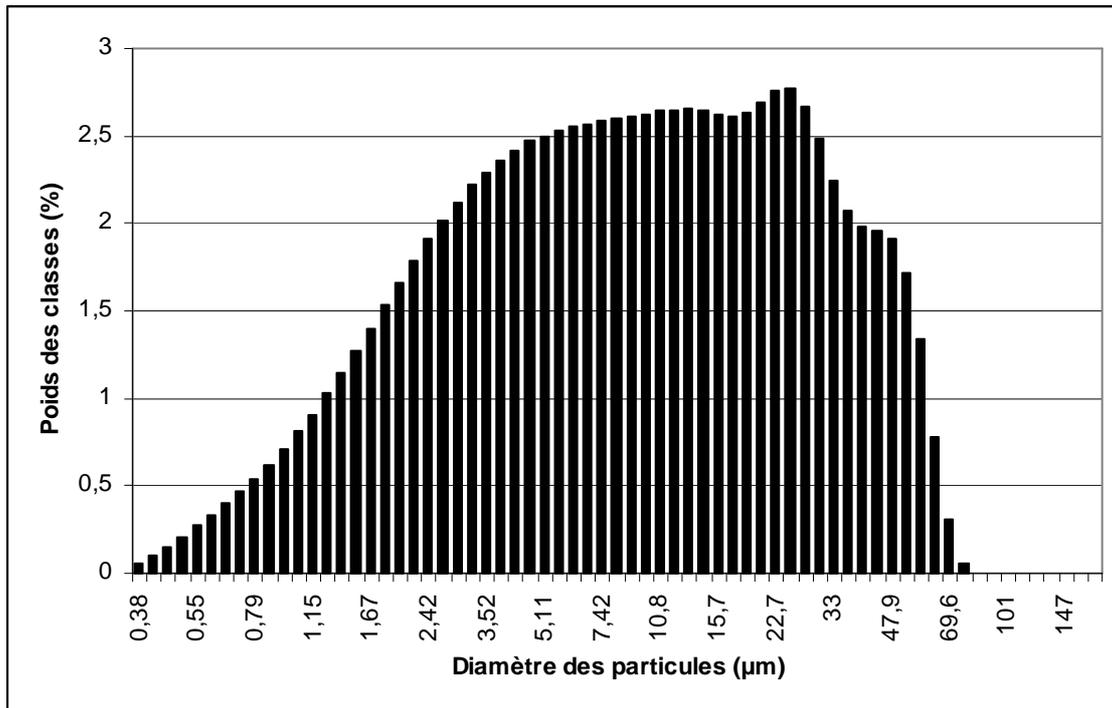
- Le tamisage à 2 mm
- La destruction de la matière organique (attaque au peroxyde d'hydrogène)
- La dispersion de l'échantillon et agitation rotative entre 4h et 6h

Les résultats de ces analyses sont retranscrits par un diagramme de distribution des particules, représentatif de chaque état de surface des unités de paysage.

III.1. Granulométrie des sédiments de zones de bas-fond

Ces zones, comprenant les oueds, le lac et les dépressions (tamourt, tachourt), sont constituées essentiellement de formations limono-argileuses similaires caractérisées par une répartition des particules des oueds très homogène (Fig.46). L'échantillon est caractérisé par une population granulométrique dominante comprise entre 0,5 et 64 μm , indiquant un fort taux de limons et d'argile (10 à 15 % d'argile, 55 % de limons fins et 30% de limons grossiers). Trois sous-populations se distinguent avec un pic de fréquence à 25 μm et une forte diminution à partir de 45 μm .

Figure 46 : Diagramme de la distribution granulométrique représentative des zones de bas fond



Granulométrie (en % des masses)									
	2	4	8	16	31	63	125	250	500 µm
Argile	Limon très Fin	Limon fin	Limon moyen	Limon grossier	Limon très grossier	Sable très fin	Sable fin	Sable moyen	
	11,5	15	18,5	19,5	20	14,5	1,5		

Les vertisols et les sols hydromorphes, peu humifères, qui caractérisent ces bas fonds, riches en argiles gonflantes, sont rapidement saturés. Ils favorisent l'apparition très rapide de graminées, qui, en à peine un mois de pluie, peuvent atteindre une hauteur de 30 cm (Photo.15).

Durant la saison humide de l'année 2006, après la première pluie du 16 juillet, on a pu observer l'apparition de nombreuses dépressions remplies d'eau et une rapide végétalisation par des graminées en moins de 7 jours

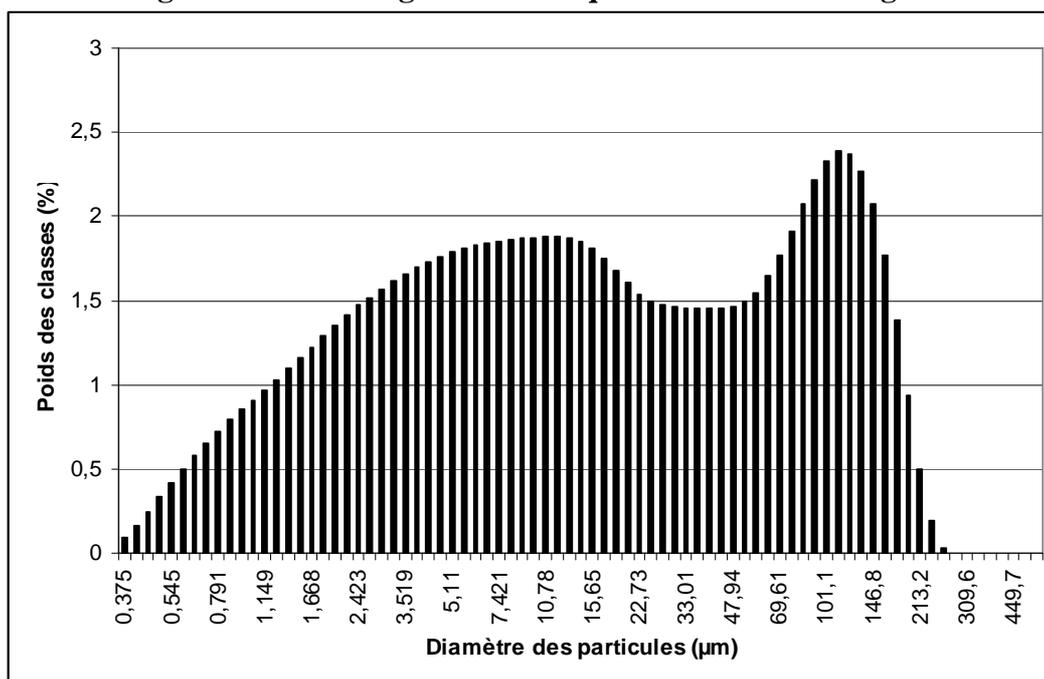
Photo 15 : Etat de surface des zones de bas-fonds avant et pendant la saison humide



III.2. Granulométrie des formations de reg des plateaux et glacis

Après avoir préalablement éliminé les particules supérieures à 2 mm, on observe pour les formations de plateaux et de glacis une composition granulométrique très hétérogène avec deux populations distinctes (Fig.47).

Figure 47 : Courbe granulométrique des surfaces de reg



Granulométrie (en % des masses)									
	2	4	8	16	31	63	125	250	500 µm
Argile	Limon très Fin	Limon fin	Limon moyen	Limon grossier	Limon très grossier	Sable très fin	Sable fin	Sable moyen	
	12,5	11	13	14	12	11	15	11	

Les fractions granulométriques sont comprises entre 0,5 et 180 μm , avec une forte représentation de limons et de sables fins. Ces formations présentent 60 % d'éléments grossiers supérieurs à 2 mm (pisolites issus du démantèlement de la cuirasse), 12 % de sable fin d'une moyenne de 100 μm , 20 % de limon et 8 % d'argile.

Photo 16 : Plateau et glacis (reg), Est de Mâle



Source : J.GASSANI

Septembre 2006

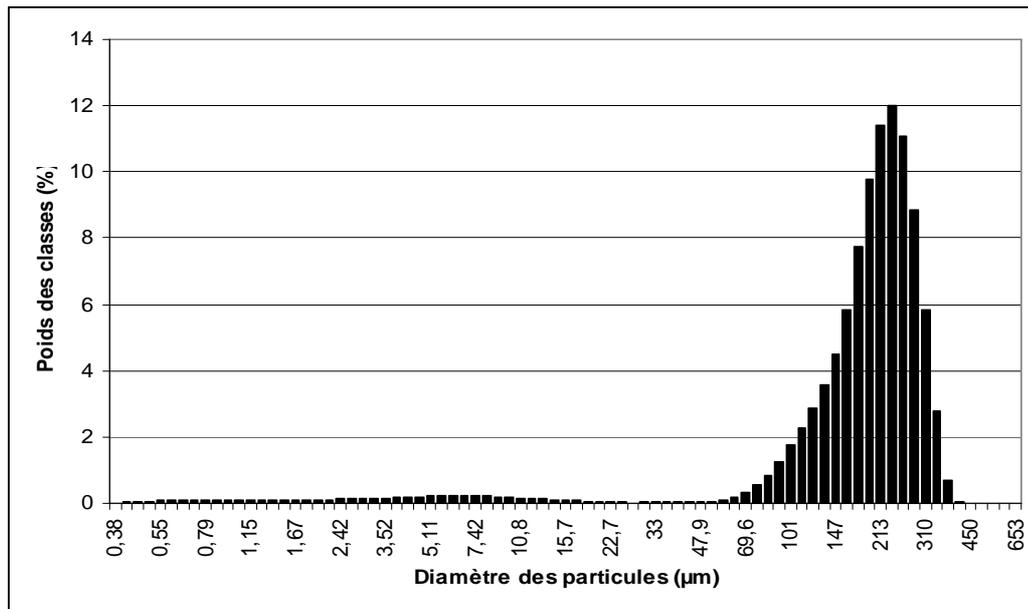
III.3. Les systèmes dunaires

Les dunes vives et pédogénéisées sont constituées de fractions granulométriques sableuses mais elles se distinguent par la présence de fractions argileuses et limoneuses plus importantes pour les secondes.

III.3.1. Les dunes vives

Les sommets des dunes vives, totalement dénudés, sont soumis à une forte déflation quotidienne, mise en évidence sur les dunes de la région d'Aleg (Bodart, Gassani 2006). Par contre, leur base ne présente aucun mouvement de sable. Ces formations sableuses sont caractérisées par un mode principal à 250 μm compris dans la quasi-totalité des échantillons étudiés. Un mode secondaire apparaît dans la fraction de sable plus fin à 80 μm . Par contre, on observe une extrême rareté des sables grossiers supérieurs à 500 μm (environ 1%). La fraction limono-argileuse observée est très réduite (0,5 à 5%).

Figure 48: Diagramme de la distribution granulométrique des zones de dunes vives



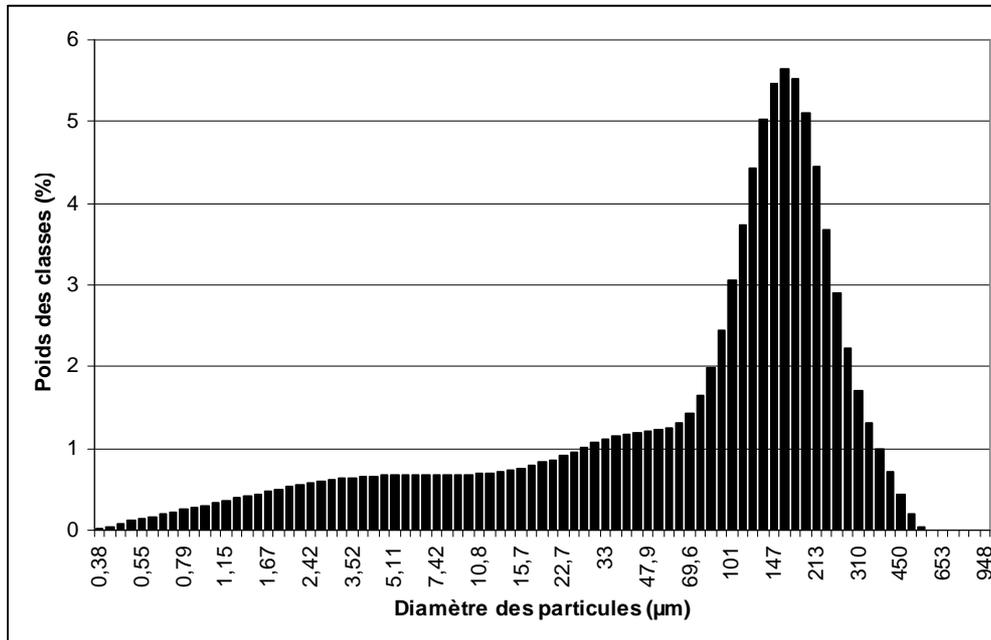
Granulométrie (en % des masses)									
2	4	8	16	31	63	125	250	500	µm
Argile	Limons très fins	Limons fins	Limons moyens	Limons grossiers	Limons très grossiers	Sables très fins	Sables fins	Sables moyens	
1	1	1	0,5	0,5	0,5	7	51	38	

III.3.2. Les dunes pédogénéisées

L'analyse granulométrique des formations des dunes pédogénéisées, montre une population concentrée entre 63,4 µm et 300µm avec un mode principal plus faible que les dunes vives, à 161 µm (Fig.49). Là encore, les sables grossiers sont très peu représentés. Par contre, contrairement aux dunes vives, ces formations sont beaucoup plus riches en particules fines inférieures à 63 µm. Cette « queue », est très spécifique à ce type d'ensemble dunaire, et indique la présence d'un sol.

Avec une taille moyenne de 125 µm, ces sédiments sont composés essentiellement de sables fins (60 %) compris entre 63 et 200µm. Les sables supérieurs à 250µm sont quant à eux faiblement représentés (10 %). Par contre on note une très forte représentation de limon et argile (30 %) avec 15,5 % de limon grossier, 5% de limon moyen, 10% de limon fin et 4,5 % d'argile, cette haute teneur explique la présence de graminées durant la saison d'hivernage.

**Figure 49 : Diagramme par classes granulométriques des zones de dunes
pédogénéisées**



Granulométrie (en % des masses)									
µm	2	4	8	16	31	63	125	250	500
Argile	Limons très fins	Limons fins	Limons moyens	Limons grossiers	Limons très grossiers	Sables très fins	Sables fins	Sables moyens	
4,5	4,5	5	5	6,5	9	17	37	11,5	

IV. La dynamique temporelle des différentes unités de paysage et états de surface

Les différentes unités de paysage et états de surface sont caractérisés par des dynamiques saisonnières propres que nous avons mises en évidence grâce à des traitements de cohérence. Pendant la saison des pluies, certaines surfaces vont évoluer (teneur en eau, végétation), comme les bas-fonds et les dunes pédogénéisées qui se couvrent d'une végétation graminéenne dense (Photo.17).

L'interférométrie SAR est basée sur la répétitivité du satellite qui revisite la scène à intervalle régulier ou d'acquisition conjointe par des capteurs embarqués sur des satellites différents (Fig.50).

Photo 17 : Evolution des états de surface durant les saisons sèches et humides

Bas-fonds



Reg



Dunes vives



Dunes pédogénésées



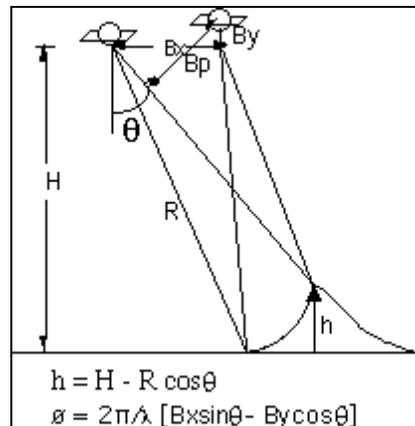
Novembre-Juin

Juillet-Octobre

Source : J.GASSANI

Dans notre cas, pendant la saison humide 2006, chaque acquisition était séparée de la suivante par un intervalle de 14 jours.

Figure 50 : Principe de l'interférométrie SAR



H = Altitude du satellite

h = Hauteur satellite/surface

R = Portée du capteur au point visé

B_x, B_y = Longueur de référence horizontale et verticale séparant les satellites

B_p = Longueur de référence perpendiculaire entre les satellites

θ = Angle hors nadir au point réfléchi

λ = longueur d'onde du Radar

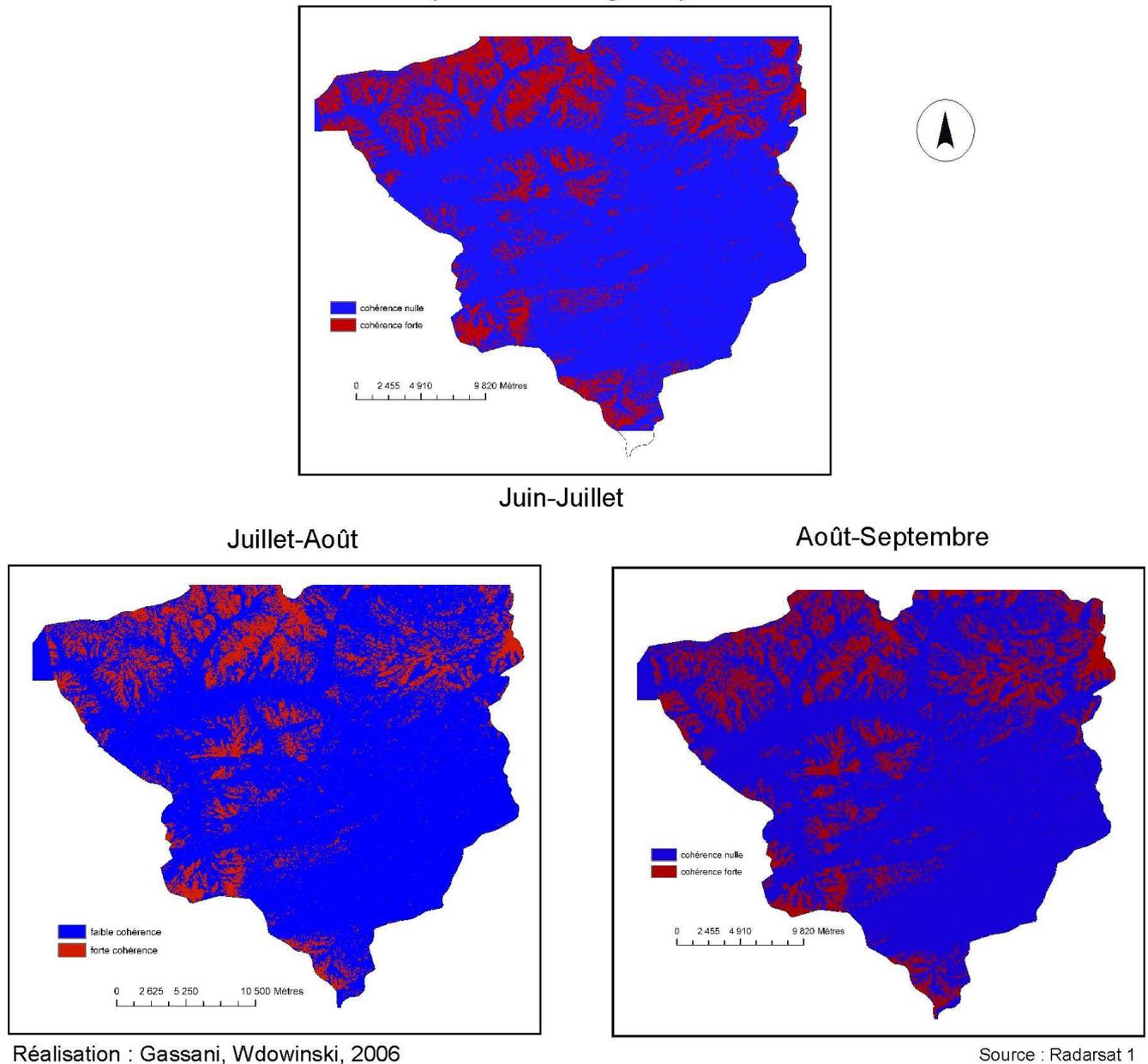
ϕ = Différence de Phase de la longueur d'onde

La mesure de cohérence est une mesure de la différence de la longueur d'onde sur le même point au sol pour chaque point d'observation [Zebker & Goldstein, 1986]. On observe donc une forte cohérence si les structures au sol sont stables et une cohérence faible si des déplacements ont eu lieu (tremblement de terre, mouvement de subsidence, croissance de végétation, mouvement de sable sur les cordons dunaires).

La cohérence se caractérise par la stabilité des surfaces. Elle est en règle générale proche de 1 pour les surfaces très stables (affleurement rocheux par exemple) et proche de 0 pour les surfaces qui ont une organisation spatiale changeante à l'échelle de la longueur d'onde (étendue d'eau, végétation, dunes vives).

La Figure 51 montre les images de cohérences créées à partir de trois paires d'images Radarsat 1 acquises chaque mois, avant (juin-juillet) et pendant la saison des pluies 2006.

Figure 51 : Variations de la cohérence sur les différentes unités paysagères (bleu = 0 et rouge = 1)



Tous les traitements de la cohérence ont été réalisés au préalable par le logiciel Géoradar, créé à l'université de Yonsei en Corée du Sud par le docteur Kim, puis les résultats ont été analysés sur le logiciel Matlab.

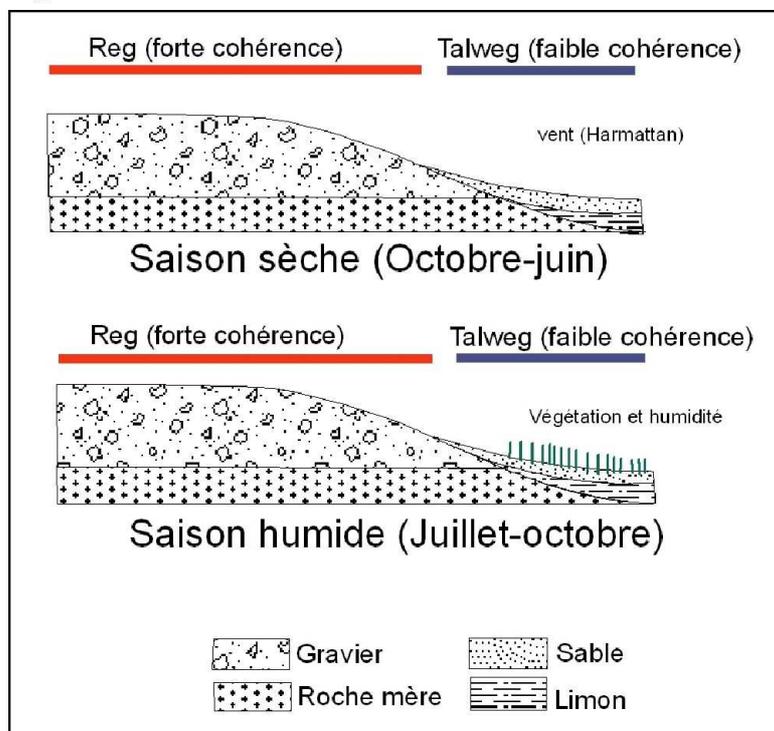
Ils mettent en évidence les changements temporels de cohérence avec des différents types d'états de surface.

Nous pouvons clairement observer le contraste entre les surfaces de type reg (en rouge) et les autres de type bas-fonds et dunes (en bleu).

En observant les images, on remarque que les zones de reg sont relativement stables dans le temps, et qu'elles sont donc marquées par une forte cohérence (environ 75%).

Au contraire les bas-fonds et les dunes montrent une très faible cohérence du fait dans un premier temps, de leurs caractéristiques granulométriques (limons fins et sables) qui facilitent leur remaniement par érosion éolienne en saison sèche. Puis en saison humide, leur humidité s'accroît et la végétation s'y développe, modifiant la longueur d'onde du signal.(Fig.52).

Figure 52 : Schématisation de la variation de la cohérence



IV.1. Analyse temporelle de l'humidité pondérale des unités de paysage durant la saison humide

Conjointement à l'analyse d'images Radarsat, nous avons établi sur le terrain un suivi des variations de l'humidité pondérale¹⁹ pour les formations de reg, des bas-fonds et des dunes (Fig.53).

¹⁹ Relation de masse entre l'eau contenue dans un échantillon et la matière sèche de cet échantillon

Notre site d'étude se caractérise par deux saisons très contrastées (Cf, chapitre II), avec une saison sèche du mois de novembre à juin, et une saison humide de juillet à octobre. Durant la saison sèche, surtout les derniers mois (avril, mai, juin) précédant les pluies, les différents états de surfaces ont un taux d'humidité quasi nul accentué par les températures élevées des mois de mars à juin, ainsi que par l'Harmattan, vent sec soufflant du nord-est au sud ouest.

C'est uniquement durant la saison humide que l'humidité pondérale va osciller au gré des précipitations.

Durant la saison humide de juillet à septembre 2006, nous avons fait des prélèvements dans les formations de reg, des bas-fonds et des dunes conjointement aux acquisitions des images Radarsat 1 (Tab.10). Pour cela, nous avons échantillonné des placettes fixes représentatives de chaque unité paysagère (deux par unité), tous les 2 centimètres jusqu'à 10 cm de profondeur. Ces placettes ont été repérées par GPS.

Chaque échantillon prélevé est placé dans une boîte en aluminium et ont été ensuite analysés au laboratoire du CNERV de Nouakchott pour mesurer leur humidité pondérale, en comparant la masse de l'échantillon prélevé avec sa masse après séchage durant 48h à 105°C dans une étuve.

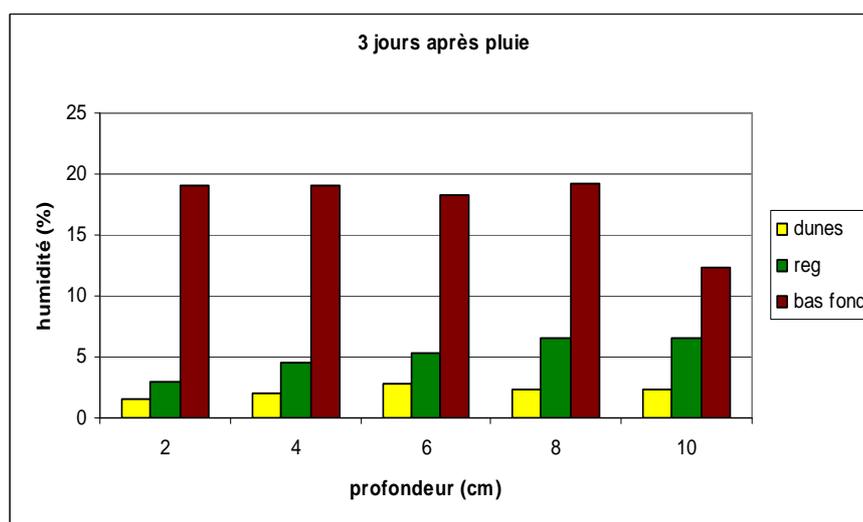
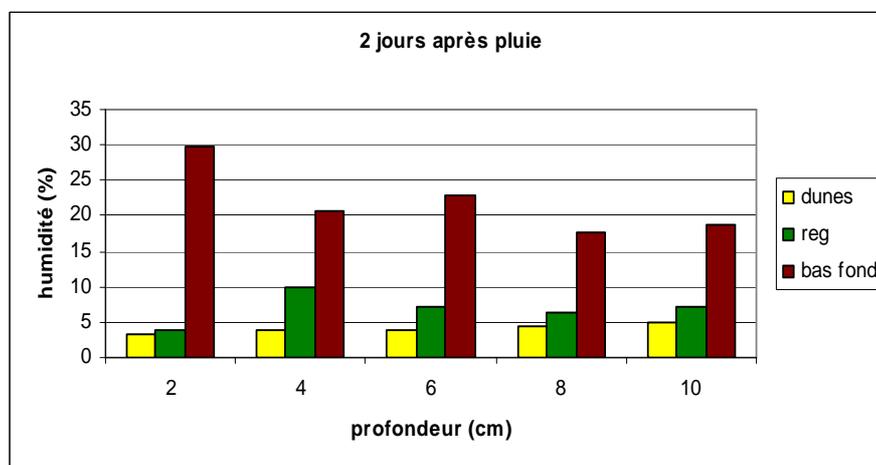
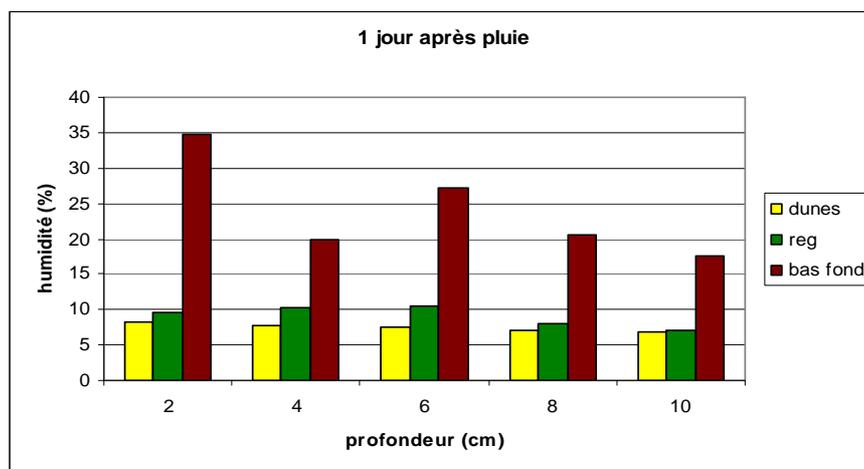
$$\text{Humidité pondéral} = (\text{masse humide} - \text{masse sèche}) / \text{masse sèche}$$

IV.1.1. Les zones de bas-fond

En analysant l'évolution de l'humidité dans les bas fonds, on observe qu'un jour après la pluie, l'humidité est très forte dans les couches superficielles, avec un taux de 35 % dans les deux premiers centimètres, puis l'on passe subitement à une moyenne de 20 % dans les autres horizons.

Le deuxième jour après pluie, le pourcentage d'humidité diminue lentement. On a toujours environ 30 % d'humidité en surface dans les deux premiers centimètres, puis l'on passe encore à une moyenne de 20%.

Figure 53 : Evolution de l'humidité pondérale dans trois unités de paysage du bassin versant du lac de Mâle



Source : mesures terrain 16/03/2006

Le troisième jour après les pluies, le taux d'humidité se stabilise de façon homogène à 20 % dans les différentes profondeurs. Seule la dernière mesure la plus profonde de 8 à 10 cm connaît une humidité un peu plus faible avec 12 %.

La teneur en humidité de ces bas fonds reste donc très constante après un épisode pluvieux. Les fortes proportions en argile et en limon des formations qu'ils colmatent, explique cette très forte capacité de stockage d'eau dès les premières précipitations.

IV.1.2. Les zones de reg et de dunes

L'analyse de leur taux d'humidité fait apparaître une très faible teneur en eau comparativement aux zones de bas fond. Un jour après un épisode pluvieux, leur taux d'humidité est en moyenne de 10 % de 0 à 6 cm de profondeur pour les regs, et de 7 % en moyenne pour les dunes entre 0 et 10 cm.

Deux jours après les pluies, leur humidité en surface diminue très rapidement; on passe de 10 % à 3% pour les regs entre 0 et 2 cm et de 7% à 2,5 % pour les dunes. Par contre, plus en profondeur, au delà de 2 cm, on passe à un taux d'humidité de 6 % pour les regs alors que pour les dunes, le taux d'humidité reste stable à 3 %.

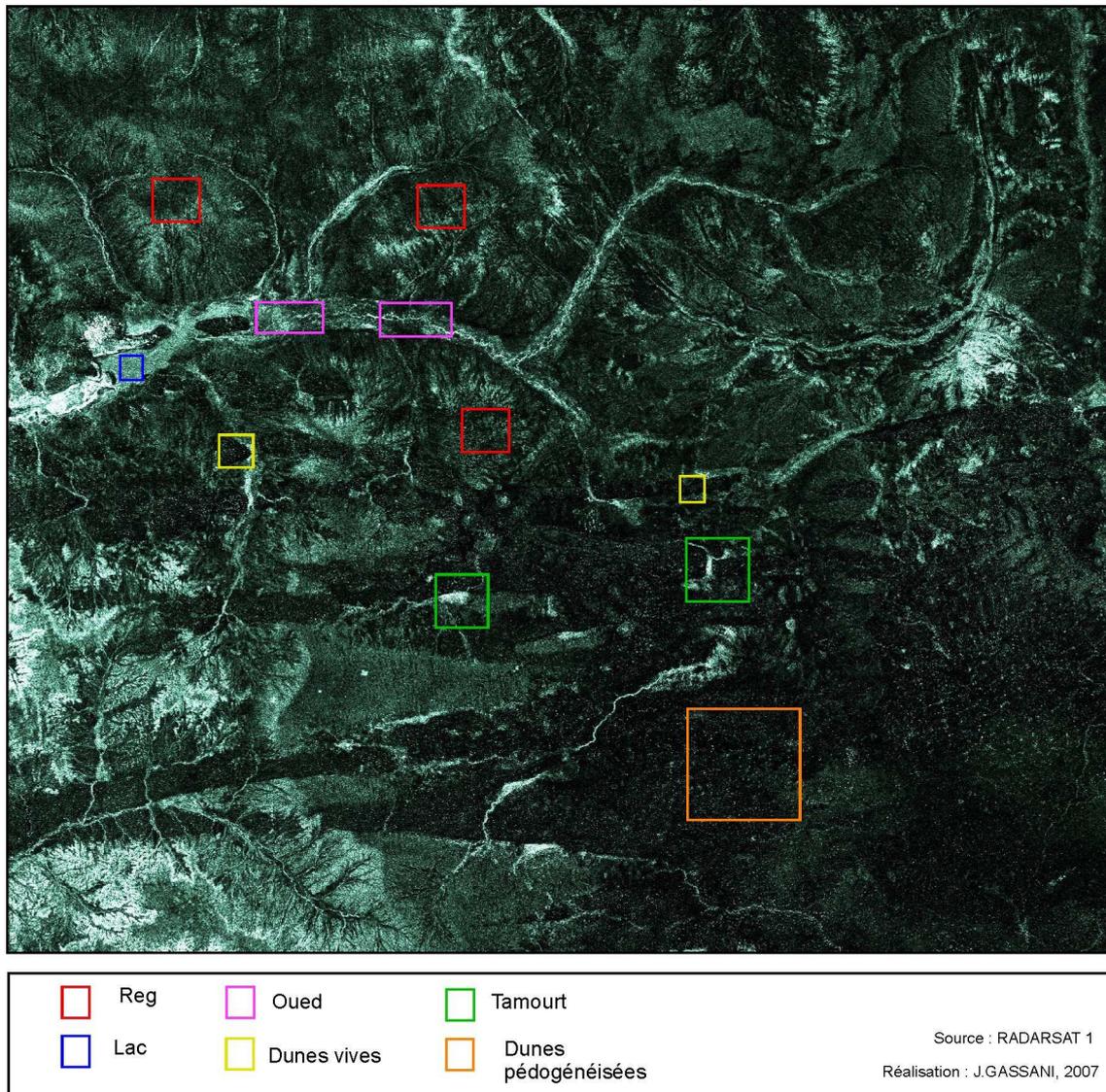
Trois jours après, les taux d'humidité sont toujours aussi faibles ; 2 % pour les dunes et 3 % en surface pour les regs, mais on observe que le taux d'humidité reste en moyenne à 5 % en profondeur entre 2 et 10 cm.

Les surfaces de dunes et de reg sont donc moins enclines au stockage d'eau que les zones de bas-fond.

IV.2. Suivi des différentes unités de paysage avant et pendant l'hivernage 2006 avec les images Radarsat 1

Le couplage des données terrain et de laboratoire avec la variation du signal de rétrodiffusion des huit images Radarsat 1 acquises en 2006, entre juin et octobre, nous permet de suivre l'évolution des différents états de surface entre la saison sèche et la saison humide (Fig.54).

Figure 54 : Localisation des sites test dans les différentes unités paysagères par caractérisation du signal



Les coefficients de rétrodiffusion du signal radar ont été calculés pour chaque date sur des surfaces-témoins des différents états de surface localisées sur la figure 54. Le premier constat est une forte variation entre saison sèche et saison des pluies (Fig.55).

IV.2.1. Durant la saison sèche

Le signal de rétrodiffusion est très stable pour les six types d'états de surface sur les trois premières dates d'images (8 et 21 juin et 15 juillet). Cela signifie que durant cette période de saison sèche, les propriétés de surface de ces unités ne changent pas. Elles sont alors caractérisées par une humidité quasi nulle des sols et par l'absence de végétation herbacée (Fig.56.a).

Durant cette saison sèche, on peut aisément discriminer les différents états de surface à partir de la rétrodiffusion du signal:

- Les dunes vives et pédogénéisées ont la plus faible rétrodiffusion avec un signal d'environ -22 à -23. Cela peut s'expliquer par leur surface très lisse amenant à une rétrodiffusion très faible et très dispersée.

- Les surfaces à reg, les oueds et le lac, ont quant à elles un signal moyen d'environ -17, car elles sont plus rugueuses que les dunes. Ceci s'explique pour les regs par un nappage gravillonnaire (pisolithe ferrugineux et quartz), et pour les oueds et le lac par des surfaces rugueuses, d'argile craquelée par la dessiccation.

- Les tamourts ont, quant à elles, la plus forte rétrodiffusion du signal SAR. Cela s'explique par la présence de nombreux arbres, qui créent une plus forte rétrodiffusion du signal.



IV.2.2. Durant la saison humide

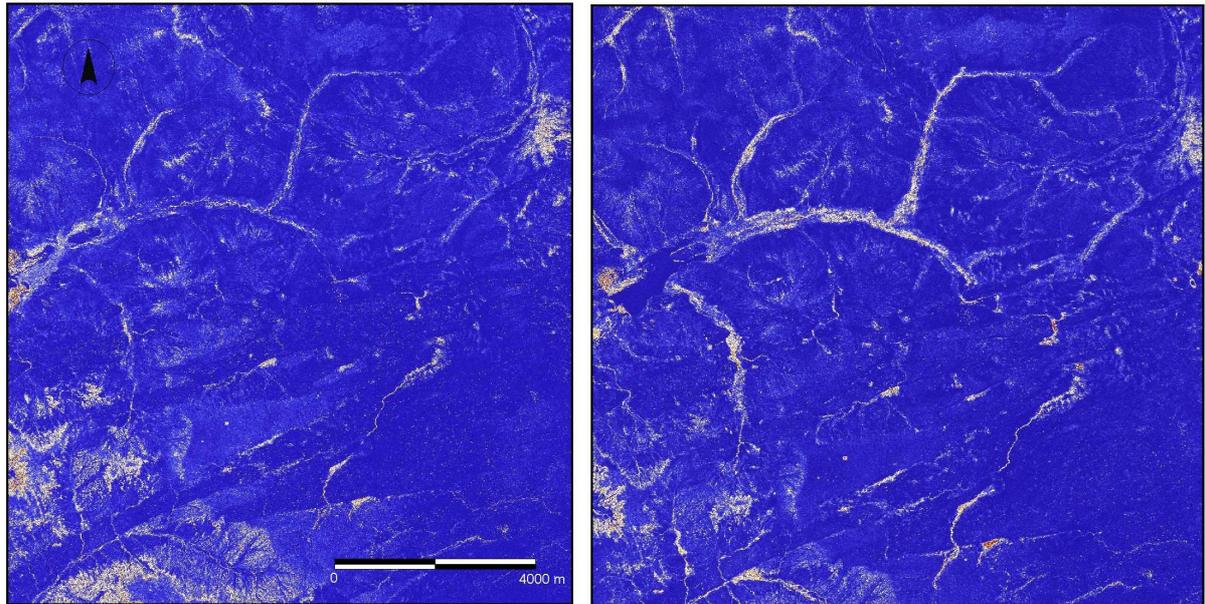
IV.2.2.1. Acquisition du 26 juillet

La date du 26 juillet se place dix jours après un premier épisode pluvieux qui est survenu le 16 juillet (environ 25 mm) et six jours après une pluie de 21mm. C'est à partir des premières pluies de juillet 2006, que nos différents coefficients de rétrodiffusion deviennent instables et que l'on observe une tendance générale à l'augmentation du signal (Fig.56.b).

La rétrodiffusion du signal SAR augmente de façon identique pour les deux types de dunes ; le 26 juillet, leur signal est en moyenne de -20. Sachant que la croissance de la végétation graminéenne est nulle durant la saison humide sur les dunes vives, l'augmentation du signal ne peut s'expliquer que par une augmentation de l'humidité des dunes.

Le signal du reg quant à lui augmente peu. De nombreuses observations sur le terrain nous ont confirmé que la végétation graminéenne y était également quasiment absente durant la saison des pluies. De ce fait, cette faible augmentation du signal à -18 s'explique aussi par l'augmentation de l'humidité de ces sols. Ce type d'états de surface restera ensuite stable durant toute la saison humide.

Figure 56 : Analyse temporelle de la rétrodiffusion du signal RADARSAT

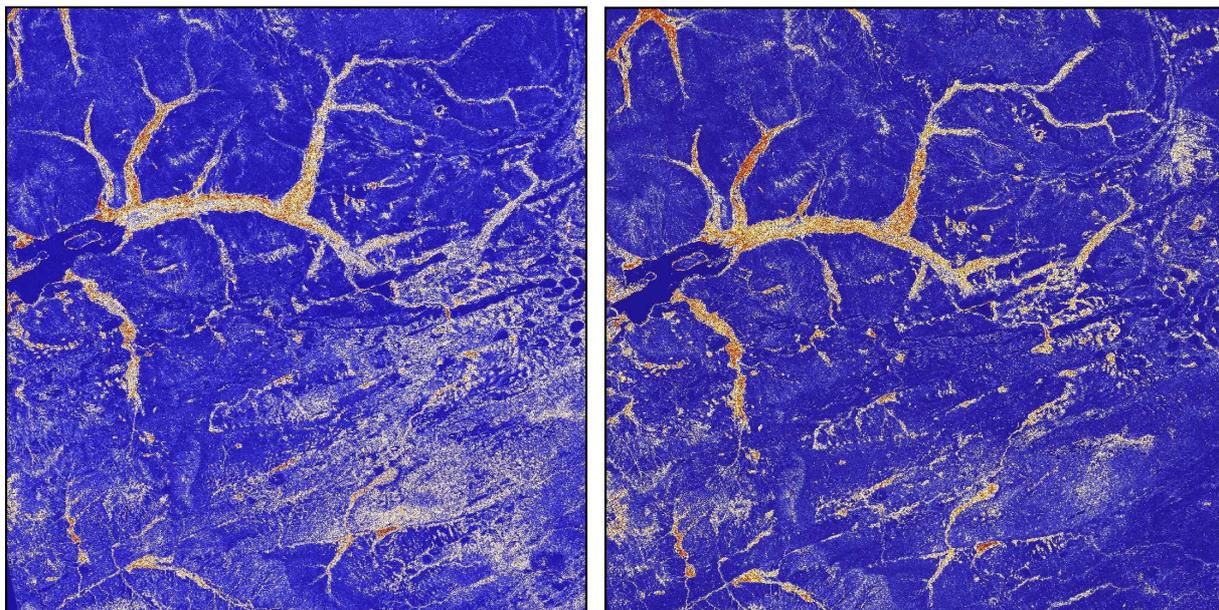


a. 08 juin 2006

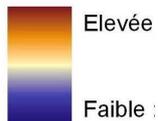
b. 26 juillet 2006

c. 19 août 2006

d. 06 octobre 2006



Intensité du signal sigma



Conception et réalisation : J.GASSANI, 2007

Source : RADARSAT 1

Par contre les états de surface des oueds, subissent quant à eux une très forte augmentation de leur signal. Pendant la saison humide, leur formations alluviales (composé à 90 % de limon de taille comprise entre 2 et 60 μ m) montrent une importante augmentation du

taux d'humidité du fait du ruissellement et du stockage d'eau, mais cela ne peut être la seule explication.

On a observé que dix jours après les premières pluies, toutes les zones d'oueds étaient recouvertes d'un tapis graminéen d'une hauteur de 5 cm, qui fait augmenter le signal. Ce phénomène se combine avec l'augmentation de l'humidité des sols (Fig.53).

Au niveau des tamourts, le signal augmente faiblement par rapport à la première date, (-4). Le signal SAR étant de bande X, il ne pénètre pas dans la végétation arborée dense. Durant toute la saison des pluies ce signal restera identique.

Le lac quant à lui, connaît une baisse très nette de son signal. Cela est dû à la présence d'eau libre (-23). Durant toute la saison humide, son signal sera très faible, en moyenne -25, indiquant une présence pérenne de l'eau durant la période couvrant les acquisitions d'images du 26/07 au 06/10/06.

IV.2.2.2. Acquisition du 19 Août

A cette date, nous sommes à plus de vingt cinq jours après la première pluie. Le bassin versant enregistre une moyenne de 100 mm de précipitation avec quatre épisodes. Le dernier de ces épisodes pluvieux a été enregistré un jour avant l'acquisition de l'image Radarsat 1 avec une moyenne de 24 mm sur le bassin versant.

Les dunes ont à cette période un coefficient de rétrodiffusion différent. On observe pour les zones de dunes vives une stabilisation du signal à -20.

Par contre pour les dunes pédogénéisées, la rétrodiffusion du signal est très forte, à -13. Cette évolution ne peut pas s'expliquer par l'humidité du sol, celle-ci étant généralement équivalente à celle des dunes vives.

Des analyses sur le terrain en août 2006 nous ont permis d'observer une forte pousse de graminée sur ces zones. La granulométrie de cette unité paysagère, composée de limon fin, permet d'avoir une croissance de cette végétation durant la saison des pluies. Nous pouvons donc confirmer la présence de ces graminées à partir de début août soit une vingtaine de jours après les premières pluies.

Le signal de rétrodiffusion des zones d'oued augmente lui aussi, (un jour après les pluies), avec une l'humidité des sols très forte, environ 30 à 35%. On observe donc le développement

d'une végétation graminéenne qui fait augmenter le signal de rétrodiffusion, avec à cette date là un tapis de graminées d'environ 30 cm de hauteur.

Si les zones des dunes pédogénéisées montrent un développement d'un tapis d'herbacées, son développement se fait moins rapidement que dans les oueds (entre 3 à 5 jours), avec un délai de 15 à 20 jours.

IV.2.2.3. Acquisitions du 19/08, 25/09 et du 06/10

Ces trois images d'août et de septembre ont été acquises en plein milieu et à la fin de la saison des pluies, un jour et dix jours après des pluies de 5 et 25 mm.

On observe sur cette période une stabilisation des différents états de surfaces. La croissance des graminées est maximale dans les oueds et sur les dunes pédogénéisées (Fig. 56.c.d)

L'acquisition du 6 octobre, fait, elle, apparaître une chute du signal des dunes pédogénéisées et des oueds, indiquant la fin de la période végétative.

Les données optiques apportent des informations pour la caractérisation et la spatialisation des différents états de surface du bassin versant de Mâle.

Les données SAR apportent, elles des informations complémentaires sur les états de surface (humidité, rugosité, géométrie) et leur évolution temporelle (croissance de la végétation, humidité des sols) qui ne peuvent pas être détectées par des données optiques. La répétitivité des acquisitions RADARSAT-1 tous les 14 jours nous aide à détecter les changements de propriété des états de surface, entre saison sèche et saison humide.

En combinant ces observations, nous obtenons une bonne caractérisation des états de surface, qui ne peut être obtenue par les seules données optique ou SAR séparément.

V. Dynamique de fonctionnement des bas fonds

De manière générale, durant l'hivernage, le bassin versant de Mâle est parsemé de nombreuses dépressions en eau, de tailles différentes. Ces tachourts et tamourts se remplissent pendant la saison des pluies (Photo.18) et jouent un rôle essentiel dans la survie des populations semi-nomades pour leur agriculture de subsistance. Ces dépressions endoréiques jouent également un rôle majeur dans la régulation des écoulements de surface.

Photo 18: tamourts (Saison sèche, saison humide)



Mars 2006



Septembre 2006

Clichés : DELAHAYE, GASSANI

Photo 19: tachourts (Saison sèche, saison humide)



Mars 2006



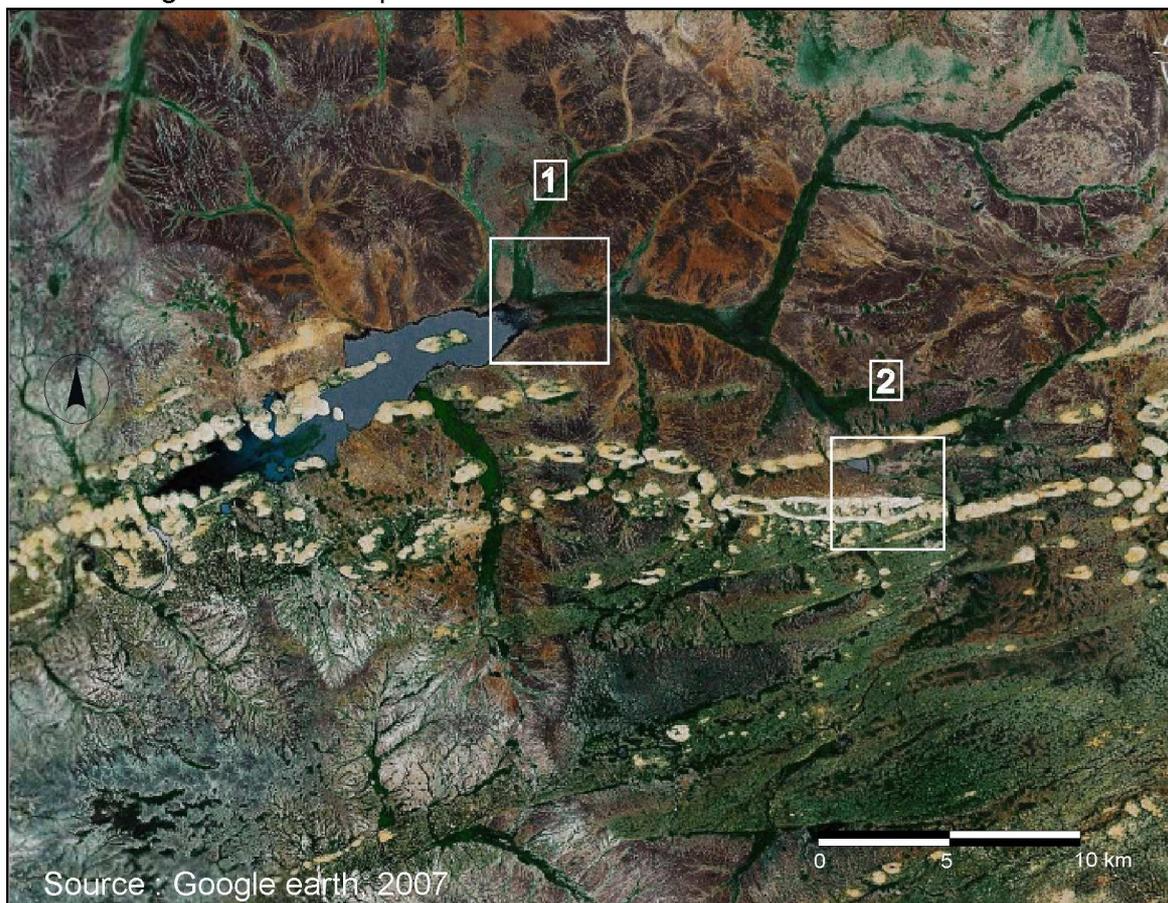
Août 2005

Source : J.GASSANI

Les tamourts, (photo. 18) sont des dépressions de type circulaire, d'une profondeur moyenne d'environ 60 cm, avec des tailles très variables pouvant atteindre dans certains cas plus de 10 ha. Les tachourts (Photo. 19) sont elles des dépressions de type longiligne

localisées dans les fonds des oueds, allongées dans le sens des écoulements et avec une profondeur moyenne de 70 cm.

Figure 57 : Exemple de localisation des tamourts et des tachourts



1



Septembre 2006

2



Août 2005

Clichés : DELAHAYE, GASSANI

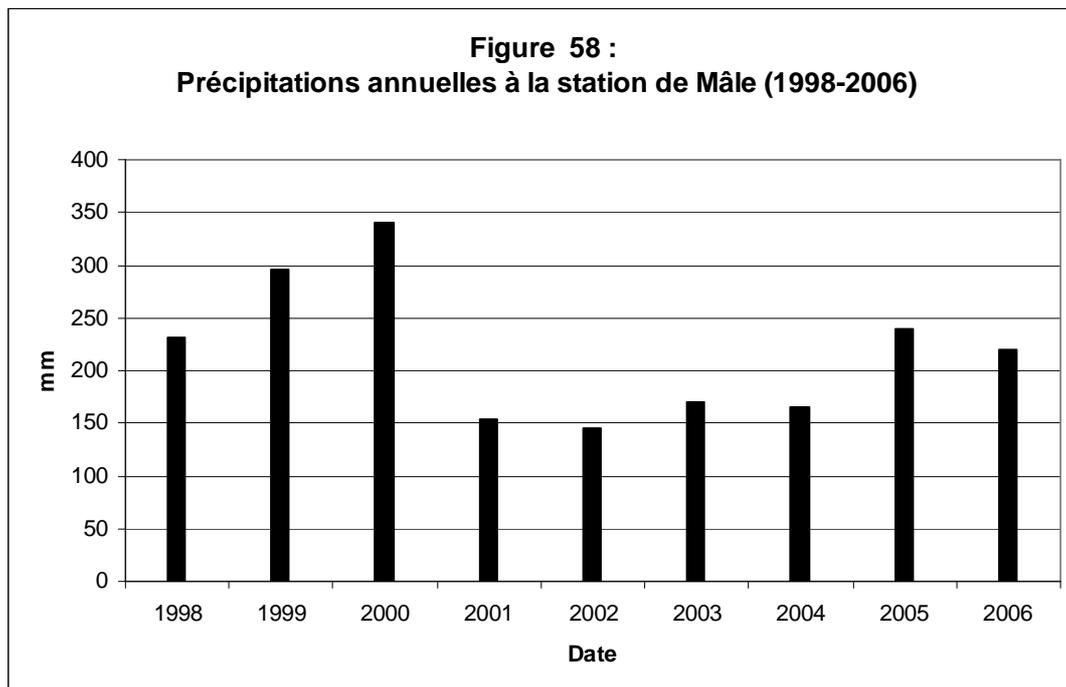
Ces dépressions, sèches la majeure partie de l'année, se remplissent pendant la période des pluies de mousson (juillet-octobre) et jouent un rôle majeur dans la dynamique de remplissage des lacs avoisnants (Aleg et Mâle).

V.1. Suivi du rôle des bas fonds dans le remplissage du lac par données multisources

Pour réaliser une évolution diachronique du plan d'eau du lac de Mâle, nous avons analysé des précipitations enregistrées pendant neuf ans (depuis juin 1998) par les autorités locales sur le bassin versant avec un pluviomètre manuel (Fig.58). L'installation d'un second pluviomètre manuel en 2005 à proximité du premier, a permis de valider la fiabilité de ces données.

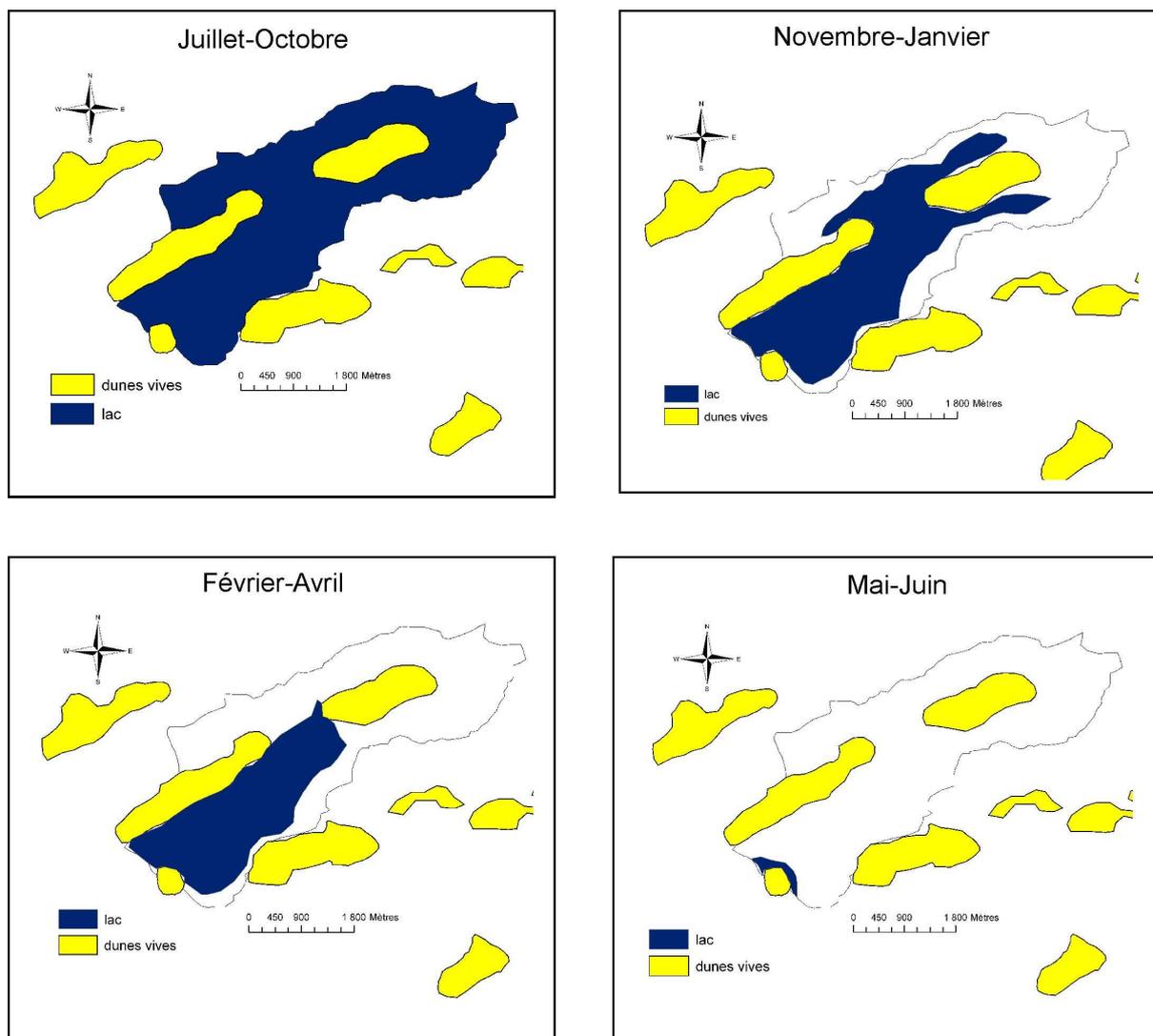
Ces données pluviométriques ont été couplées avec le remplissage du lac issu d'une série d'images Landsat téléchargées gratuitement sur le site www.landsat.org.

A la station de Mâle, les précipitations depuis 1998 se subdivisent en trois périodes distinctes: une période excédentaire de 1998 à 2000 avec une moyenne de 290 mm de pluie par an, puis une période déficitaire entre 2000 à 2004 avec 159 mm, soit une baisse de 40 %, et une période de retour en 2005-2006 avec 230 mm.



L'analyse diachronique des images Landsat, nous montre six années optimales de remplissage du lac (1999, 2000, 2001, 2002, 2005, 2006), où les précipitations ont été suffisamment importantes pour remplir au maximum la dépression. On a pu schématiser ce fonctionnement annuel du remplissage du lac de Mâle à partir de ces images satellites traitées sur le logiciel ArcGis (Fig.59).

Figure 59 : Schématisation de l'évolution annuelle de la surface en eau du lac de Mâle d'après l'analyse diachronique d'images Landsat (2000-2004)



Conception et réalisation : J.GASSANI, 2007

Source : Landsat (2000-2004)

L'analyse de la dynamique de remplissage du lac montre qu'à son remplissage maximum durant la saison des pluies, il peut atteindre 13 million de m² (Tab.11).

A la fin de la saison des pluies, les batardeaux du barrage sont ouverts, et commence alors une longue période de décrue vers le lac aval, qui peut durer plus de 7 mois selon le remplissage de la cuvette amont.

Dans le cas de figure d'un remplissage optimal, on observe déjà au mois de janvier une diminution d'environ 50 % de la superficie du plan d'eau. Au mois d'avril, on est à plus ou moins 25 % de remplissage. A partir de mai, il n'y a plus d'eau dans le lac amont de Mâle.

Tableau n° 11 : Dynamique de la superficie saisonnière du lac de Mâle

Mois	Superficie (m ²)	Superficie (%)
Juillet-octobre	13 000 000 m ²	100 %
Novembre-janvier	6 500 000 m ²	50 %
Février- avril	3 000 000 m ²	23 %
Mai- juin	80 000 m ²	0,6 %

Certaines années, les lacs d'Aleg et de Mâle sont exceptionnellement vides beaucoup plus tôt dans la saison. C'était le cas en mars 2005, ce qui a causé de nombreuses pertes dans le cheptel des villages avoisinants qui s'abreuve dans ces dépressions.

V.2. Un remplissage interannuel du lac très aléatoire

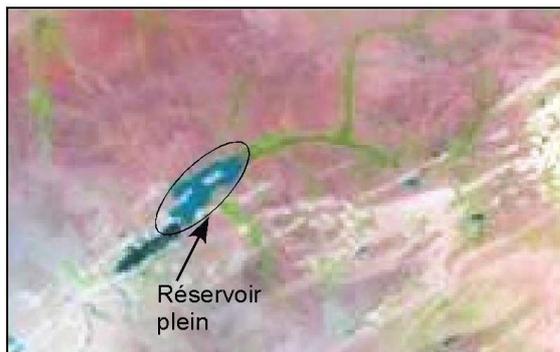
On remarque que, malgré des forts écarts des moyennes annuelles de précipitations (une différence de 200 mm entre l'année 2000 et 2002 par exemple), on arrive à des remplissages équivalents du lac. Le total pluviométrique annuel n'a donc pas d'incidence sur le remplissage du lac.

Une des hypothèses principales de cette recherche est que pour un total pluviométrique annuel similaire de deux années successives, la cuvette du lac peut être remplie ou non, en fonction de l'intensité des événements pluvieux (*cf* chapitre II). Lorsque l'on compare par exemple, les années 2002 et 2003, on observe que malgré des précipitations de 145,6 mm au 30 septembre 2002, inférieures à la même période en 2003 (171 mm au 27 septembre 2003), le lac de Mâle était plein en septembre 2002 alors qu'il n'était qu'à moitié rempli en septembre 2003 (Fig.60).

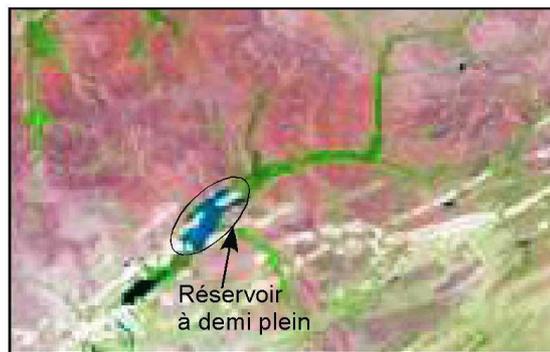
Ces différences de comportement hydrologique entre ces deux années, s'explique parfaitement si on observe qu'en 2002 on a eu quatre épisodes de pluie supérieur à 20 mm, alors qu'il n'y en a eu qu'un seul en 2003.

Figure 60 : Relation entre la surface en eau et les évènements pluvieux (nombre et intensité) entre 2002 et 2003

27 septembre 2002 (145,6 mm)



30 septembre 2003 (171 mm)



Source : Landsat.org

2002	2003
15 évènements pluvieux	16 évènements pluvieux
4 > 20 mm	1 > 20 mm

Source : Pluviomètre Mâle



14 septembre 2003

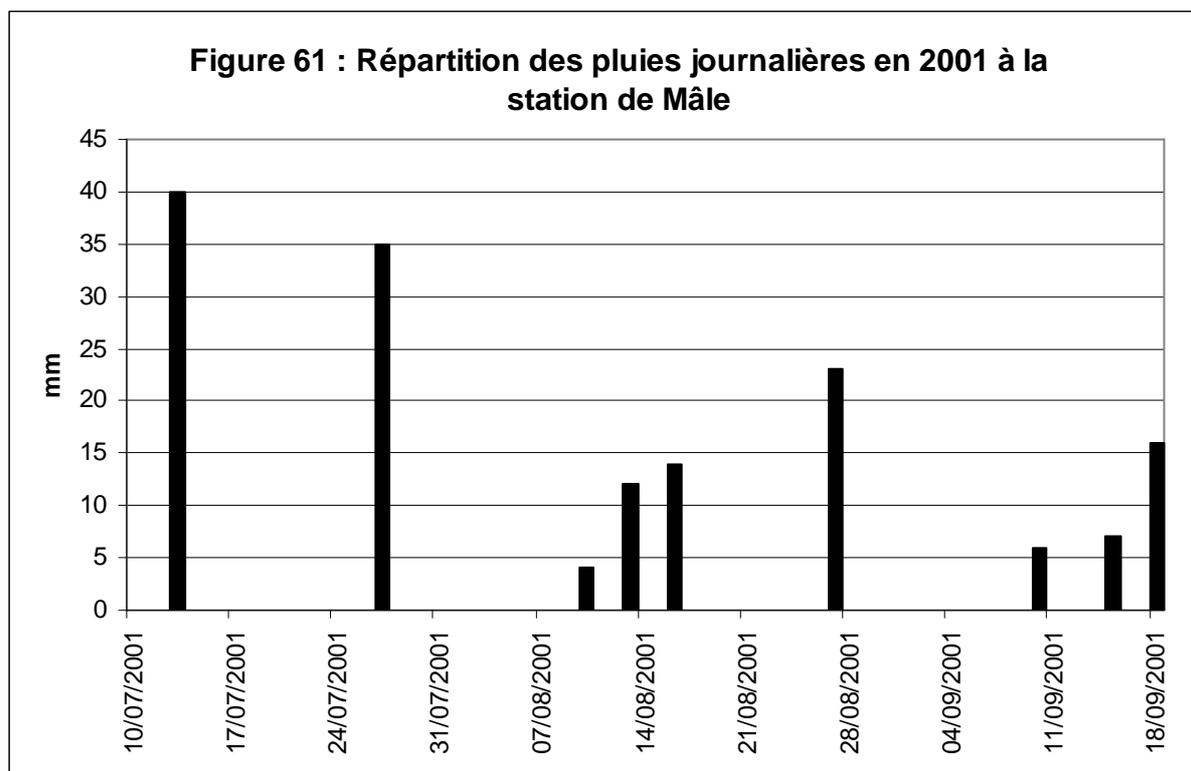


30 septembre 2003

On fait le même constat avec un suivi sur deux dates de septembre 2003, il existe peu de différences de remplissage du lac entre le 14 et le 30 septembre 2003 bien que quatre évènements pluvieux, tous inférieurs à 20 mm, aient été enregistrés sur cette période de 16 jours, avec un total de 41,7 mm. Cela indique bien que les pluies inférieures à 20 mm ont peu d'influence sur le remplissage du lac.

Le remplissage du lac se fait donc par l'apport de forts évènements pluvieux, variables d'une année à l'autre. On peut également prendre l'exemple de la saison des pluies

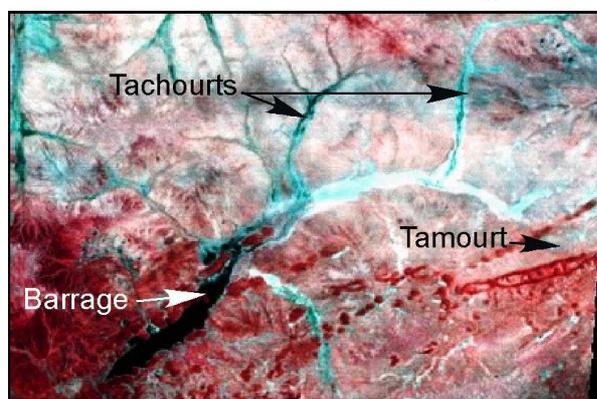
de l'année 2001 (Fig.61), avec un total annuel de 154 mm, très en dessous de la moyenne annuelle de 1998 à 2006 qui est de 220 mm.



Cette année là, un premier évènement pluvieux de 40 mm s'est abattu le 13 juillet, tombe sur le bassin versant :

Le lac s'est peu rempli, mais par contre, on peut observer à l'amont (en noir) sur la photo 20 du 22/07, le remplissage des dépressions (tachourt, tamourt et diguettes). Le 7 août, une deuxième pluie de 35 mm a touché le bassin versant du lac de Mâle. On constate que la dépression est cette fois pleine. Il aura donc suffi de deux épisodes pluvieux d'un total de 75 mm pour remplir le lac de Mâle en saison des pluies 2001.

Photo 20 : Remplissage du lac par deux évènements pluvieux (2001)



22 juillet 2001



7 août 2001

Source : Landsat.org

Autre exemple, la saison des pluies 2004. On observe tout d'abord qu'aucune pluie ne dépasse les 20 mm dans le bassin cette année là (Fig.62). Malgré les quatre épisodes pluvieux entre le 5 juillet et le 15 août aucune évolution n'est à noter dans le remplissage du lac.

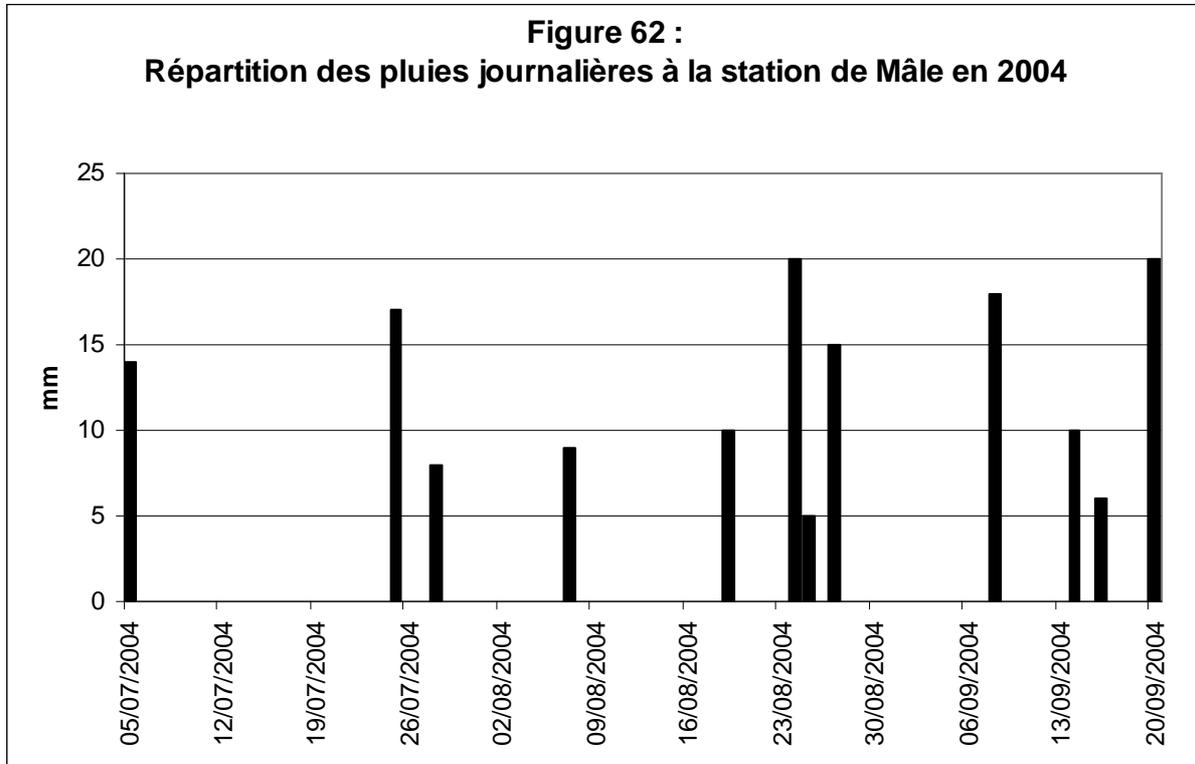


Photo 21 : Remplissage du lac, saison humide 2004



30 juillet 2004



15 août 2004

Source : Landsat.org

Par ailleurs, une mission terrain réalisée en mars 2005 nous a permis de constater que le lac de Mâle était complètement asséché (Photo.22), de même que le lac d'Aleg. Ce cas est toutefois exceptionnel malgré une moyenne annuelle de précipitation, d'environ 200 mm.

Photo 22 : Lac de Mâle vide



Source : J.GASSANI

Mars 2005

Il ressort donc de ces analyses que la dynamique de remplissage du lac se fait principalement par des évènements pluvieux supérieurs à 20 mm. Le total de pluies annuelles n'est donc pas un indicateur pertinent de remplissage de la cuvette. Malgré la diminution des jours de pluie dans l'ouest mauritanien, la stabilisation des pluies extrêmes contribue au maintien du remplissage du lac.

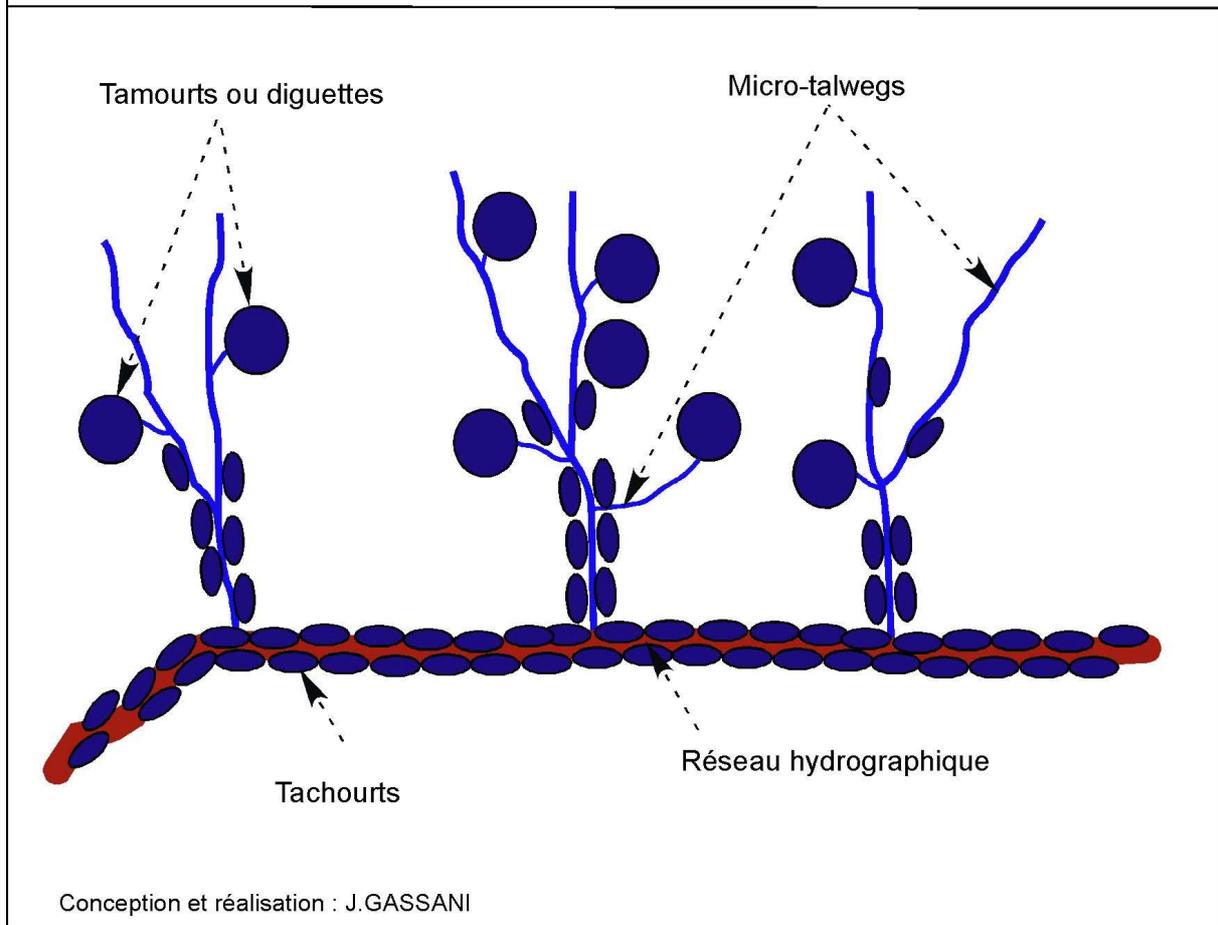
On émet donc l'hypothèse que ces dépressions (tachourts, tamourts et barrages) jouent un rôle fondamental dans les processus de remplissage du lac en stockant l'eau qui n'atteint donc pas le lac. Il devient alors nécessaire d'analyser plus précisément les caractéristiques de ces dépressions. On essayera au chapitre V par une modélisation hydrologique de confirmer ces résultats.

V.3. Caractérisation géomorphologique des dépressions

La microtopographie du bassin versant de Mâle est donc caractérisée par deux types de dépressions (Fig.63) :

- Une multitude de tamourts et diguettes qui sont reliées à des micro-talwegs qui à leur tour convergent vers le réseau hydrographique en suivant la pente générale.
- Les tachourts de type longiligne localisées dans le réseau hydrographique

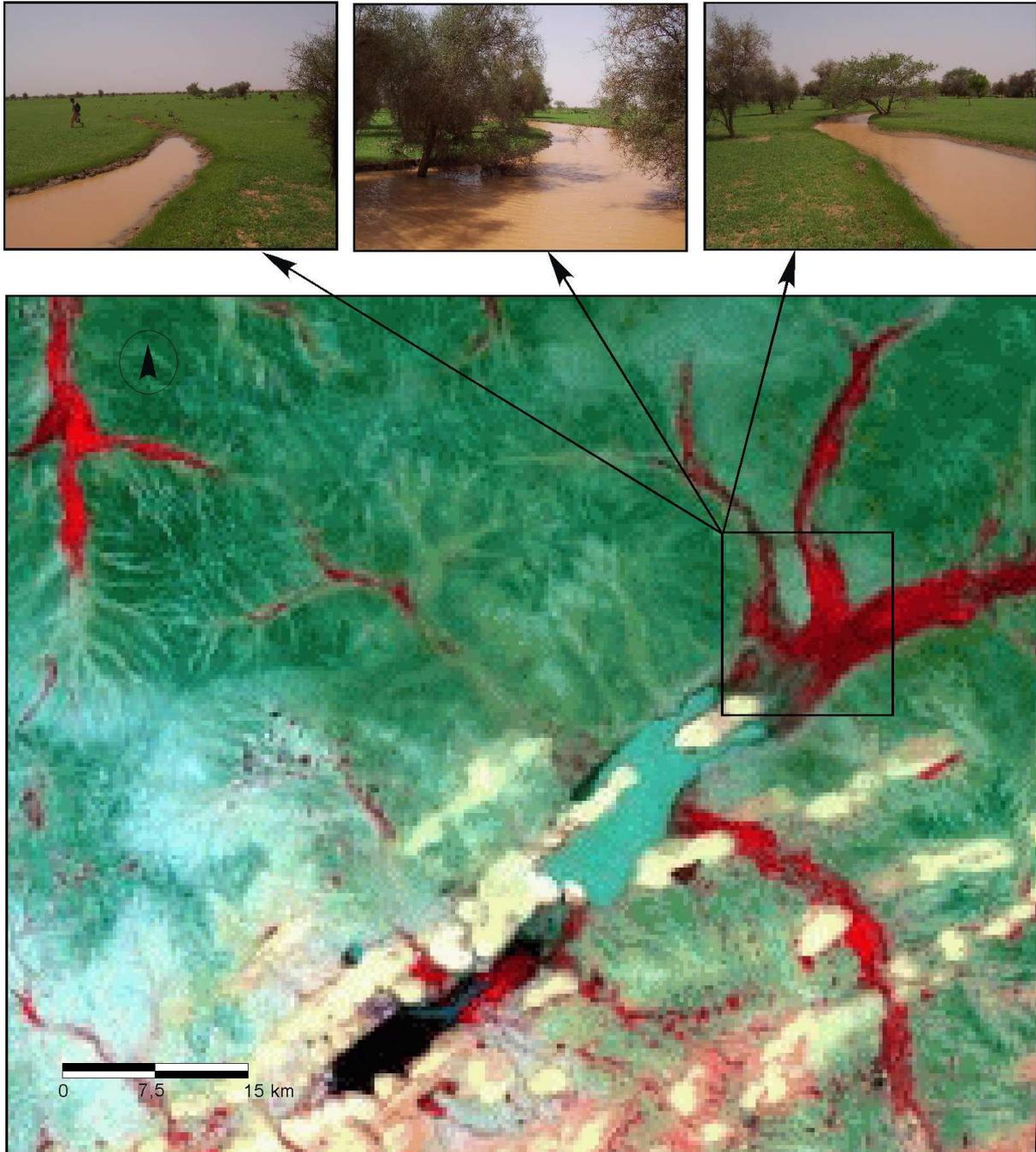
Figure 63 : Schématisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant du lac de Mâle



Une étude approfondie de ces dépressions a été entreprise en mars 2006. Nous avons levé au théodolite en coordonnées x,y,z, une zone de bas-fond comprenant des tachourts (fig.64) situé dans un oued qui se jette dans le lac. Ces mesures ont permis d'acquérir des informations sur les différences de profondeur, la microtopographie et les dynamiques de remplissage de ces dépressions.

L'image Landsat 7 ETM+ du 14 septembre 2003, montre le site d'étude situé à 8 kilomètres à l'est du village de Mâle, et d'une superficie d'environ 2,7 ha.

Figure 64: Localisation et visualisation des tachourts durant la saison humide



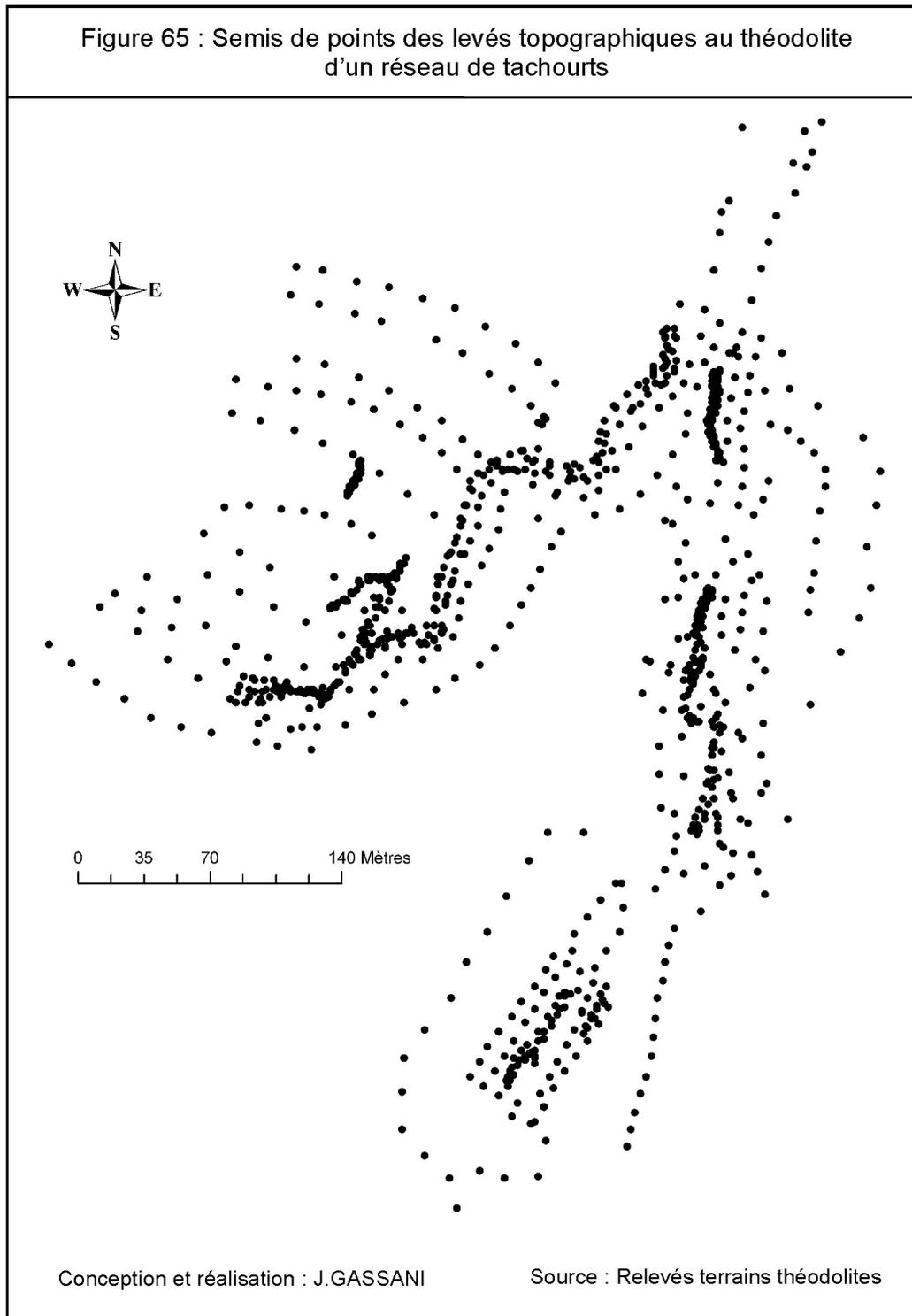
Réalisation : J.GASSANI

Source : Landsat 2001

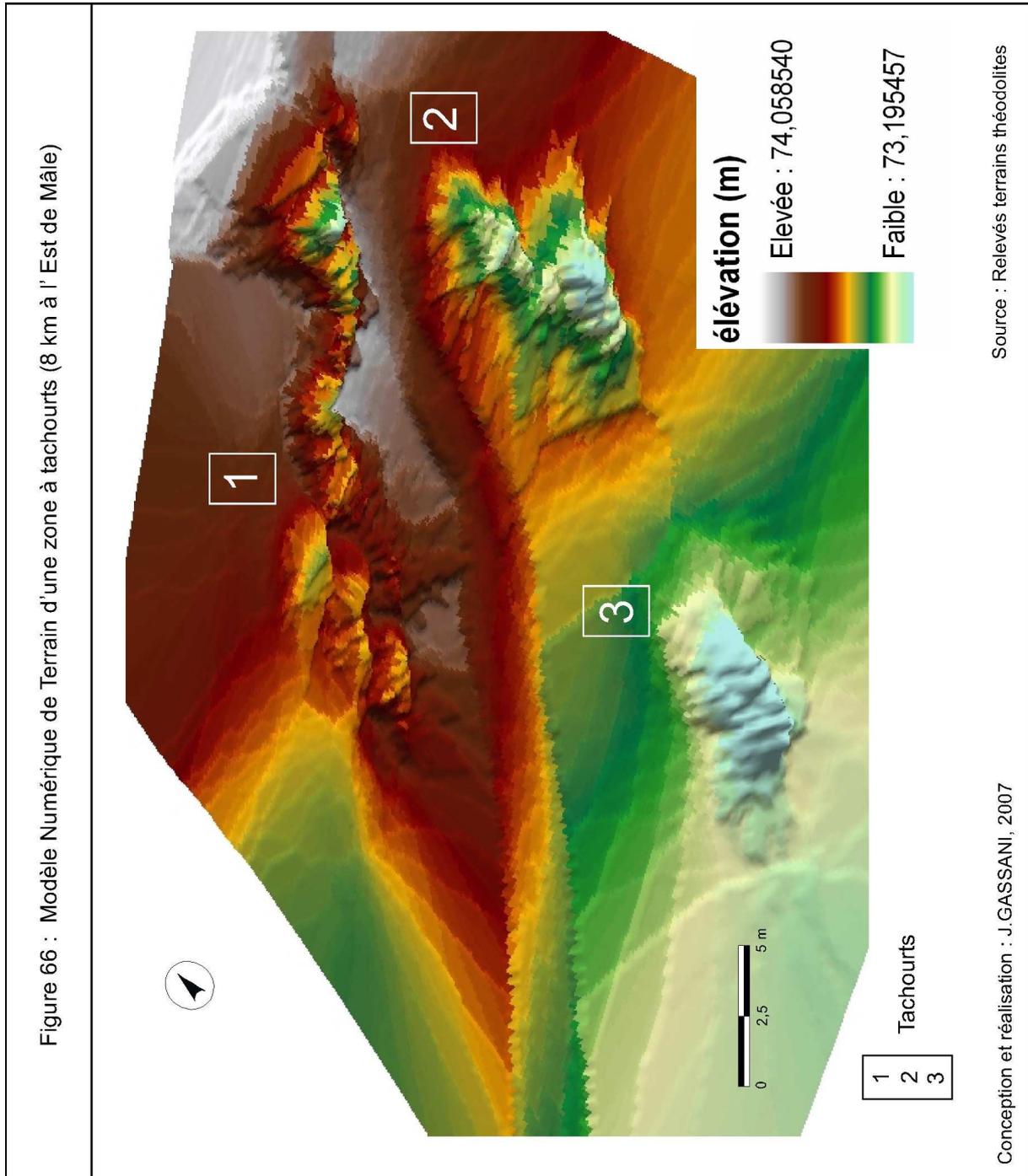
V.3.1. Création d'un Modèle numérique de terrain des tachourts

Ces relevés au théodolite ont permis de réaliser un modèle numérique de terrain (MNT) qui est une représentation de la topographie d'une zone terrestre. Cette image en 3D du terrain, nous a permis de quantifier les surfaces et les volumes d'eau stockables dans ces dépressions.

Nous avons levé au théodolite électronique plus de 500 points sur cette zone représentative de bas-fond à tachourts. Les données ont été transférées sur le logiciel Arc Gis (Fig.65) et analysées avec Spatial analyst.



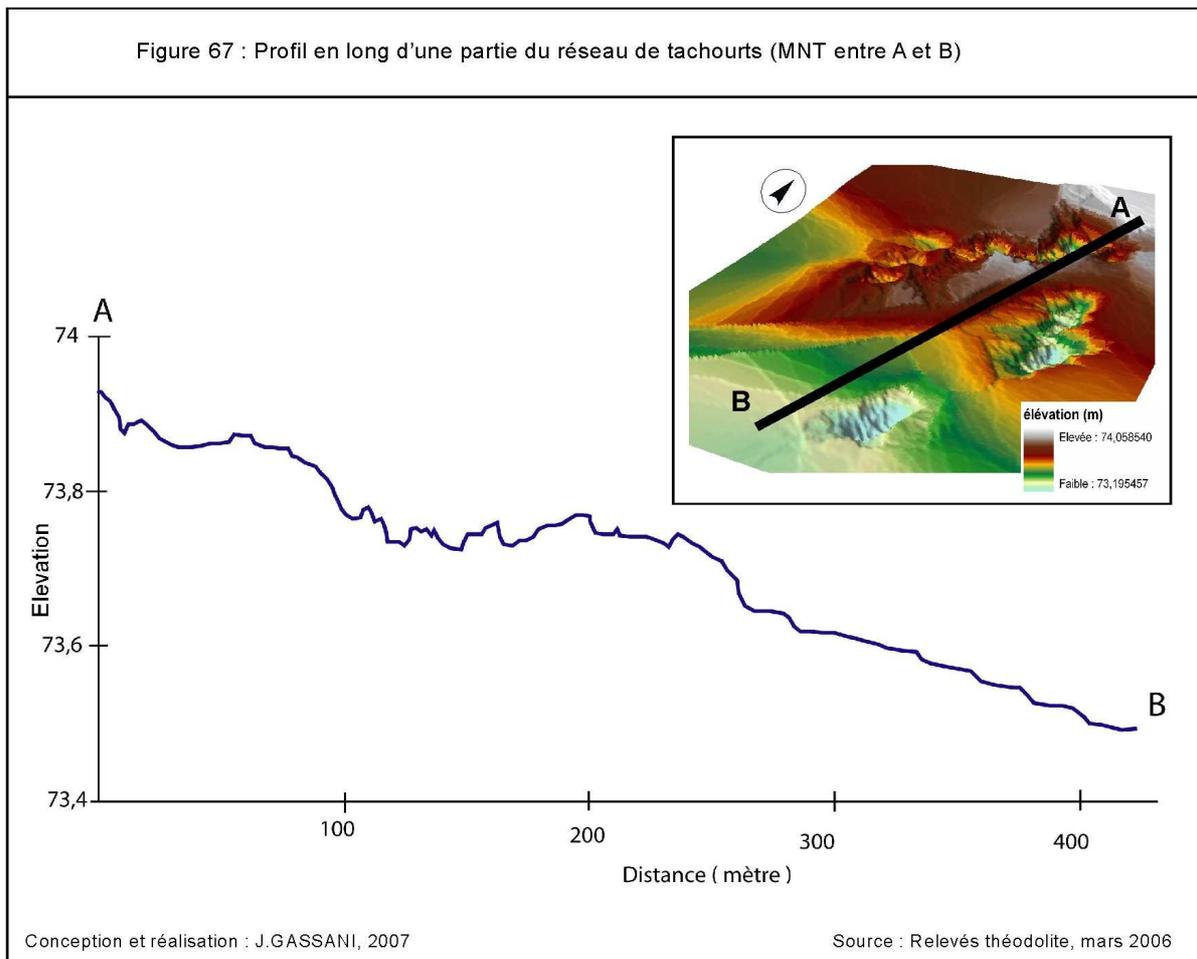
Dans un modèle de réseau triangulé irrégulier (TIN), le monde est représenté sous forme d'un réseau de triangles reliés, tracés entre des points situés à différentes distances avec des valeurs x, y et z. Les réseaux TIN sont une manière d'analyser des surfaces (Fig.66).



En analysant le modèle numérique de terrain, on observe une très faible différence d'altitude de l'ordre de la dizaine de centimètres entre les points les plus élevés et les points les plus bas. Les altitudes relevées sur le terrain ont été obtenues à partir d'une altitude étalon

déterminée à l'aide de l'altimètre d'un GPS Garmin. Cela nous permet de lever des points en x et y avec une altitude très précise, de l'ordre du centimètre.

La pente générale de l'oued considéré est faible puisqu'elle fait moins de 0,1% avec une dénivelée de 0,8 mètres du nord au sud (Fig.67).

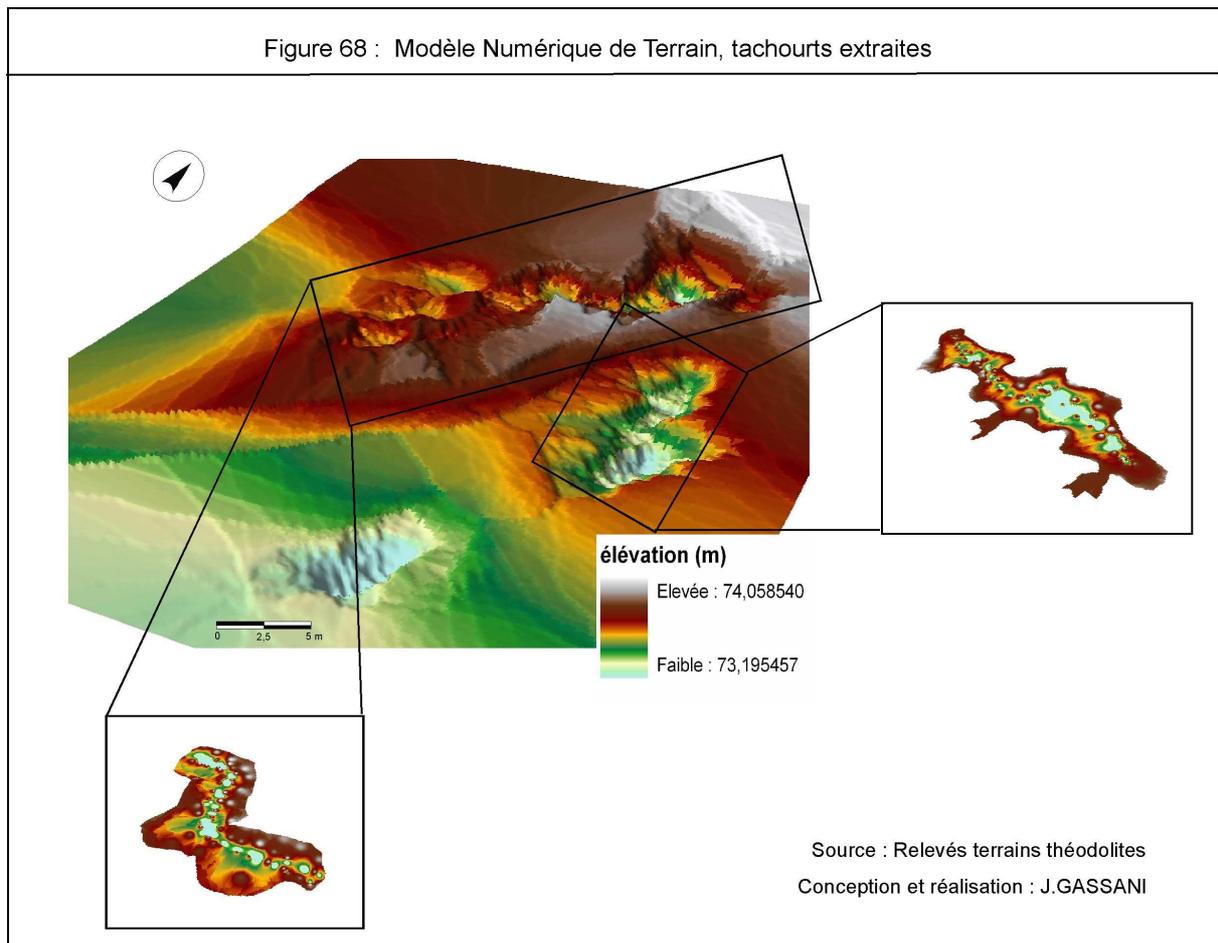


Les trois tachourts du site d'étude ont une profondeur moyenne oscillant entre 60 et 70 cm et elles ont une forme linéaire qui suit la pente générale. Elles sont reliées les unes aux autres par des seuils de déversement d'une trentaine de centimètres de hauteur, caractérisés par de légers bourrelets topographiques qui, à partir d'une certaine hauteur, laissent passer le surplus d'eau par déversement.

Nous avons extrait du modèle numérique de terrain deux tachourts (Fig.68), caractéristiques de notre zone d'étude. La tachourt 1 occupe une superficie de 5800 m² et un

volume de 883 m³. Concernant la tachourte 2, ces valeurs sont respectivement de 4000 m² et de 900 m³. Elles ont une profondeur maximale de 80 cm (73,19 m) qui selon les observations terrain de 2006, semble être caractéristique de l'ensemble des tachourts du bassin versant.

On peut observer de manière très précise sur les zooms des deux tachourts, la continuité des micro-talwegs²⁰ qui présentent une élévation moyenne de 73,19 mètres (en bleu ciel sur la figure). Les micro-talus bordant présentent, quant à eux, une dénivelée moyenne de 71 centimètres



Dans les deux tachourts, on observe un micro-talweg composé d'un ensemble de micro-dépressions se connectant par des seuils d'une quinzaine de centimètres de hauteur. La définition des micro-seuils peut être prise en défaut par la méthode d'interpolation des points inhérente au MNT. En effet, le Krigeage, pourrait induire un biais. Ce dernier pourrait en effet

²⁰ Un micro-talweg est à notre sens l'ensemble des points bas d'une dépression naturelle, dépression d'une longueur variant de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres.

avoir tendance à lisser les altitudes, même si les points de référence au départ sont nombreux et minimisent le risque.

V.3.2. Suivi de la dynamique de remplissage des tachourts durant la saison des pluies 2006

Pour suivre la dynamique de remplissage de ces tachourts durant la saison des pluies 2006, nous avons installé trois piquets d'une hauteur de deux mètres et gradués tous les cinq centimètres dans les trois tachourts du site-test étudiées avec le MNT. Comme ils ont été installés dans les talwegs, les difficultés d'accessibilité au site durant la saison des pluies n'ont permis de suivre l'évolution de leur remplissage que durant dix jours.

Photo 23 : Repères au centre des tachourts pour estimer la hauteur d'eau



10 juillet 2006



18 juillet 2006

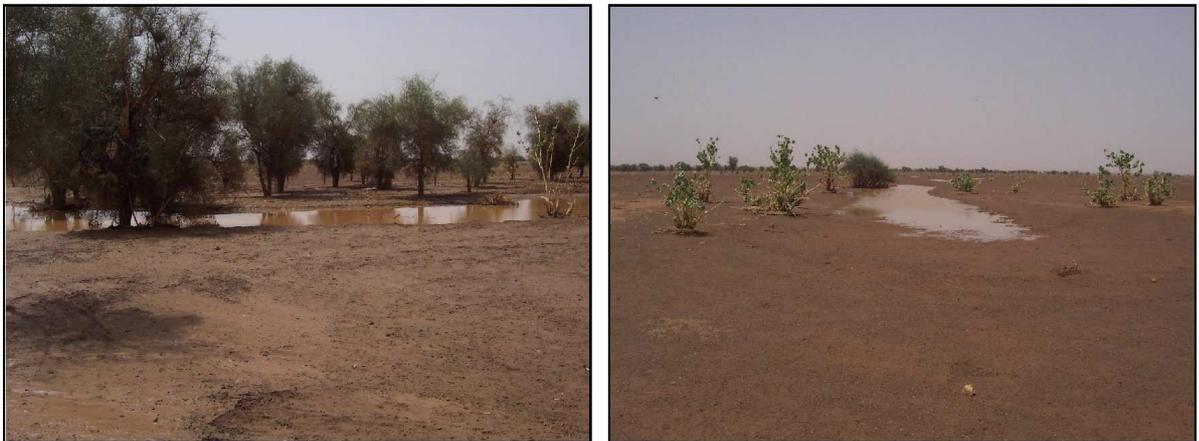
L'observation des premières pluies sur le bassin versant a permis de comprendre les modalités de remplissage de ces dépressions. Le fond de l'oued, où se localisent les tachourts (Fig.64), est marqué par des écoulements diffus (sheetflood²¹), durant des précipitations assez fortes supérieures à 20 mm. Ces écoulements sont caractérisés par un faible débit du à la faible pente générale du talweg, et une lame d'eau d'une épaisseur d'environ 15 cm. Après la pluie, toutes les tachourts sont remplies d'eau (photo.24). Une dizaine d'heures plus tard, on assiste à un retrait de l'eau environnant les dépressions vers le lac de Mâle.

²¹ Ruissellement en nappes de quelques centimètres d'épaisseur

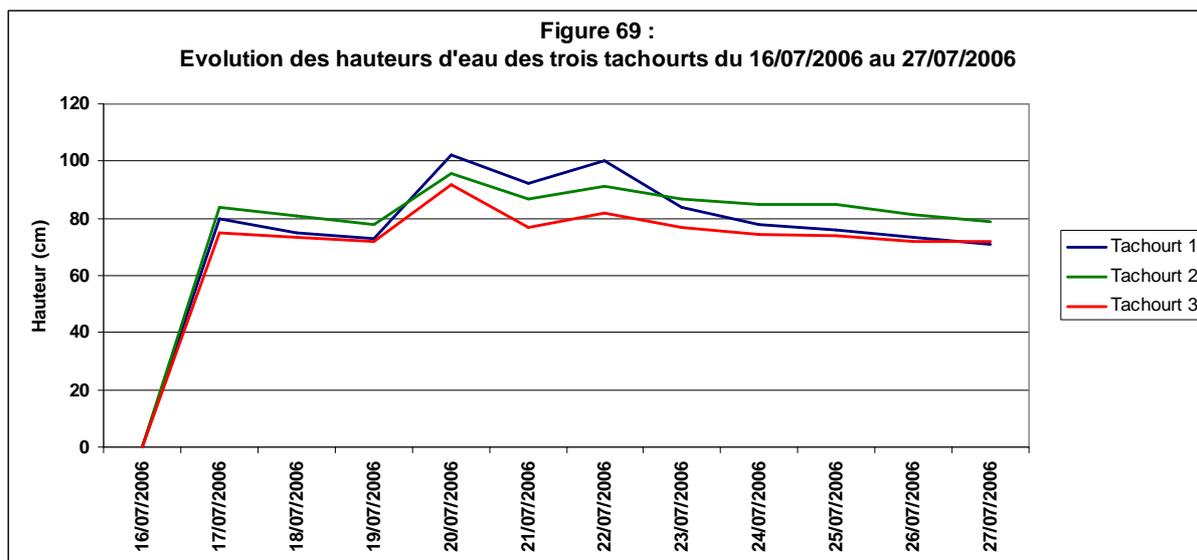
Photo 24 : Ecoulement en nappe sur l'espace couvert par le MNT des tachourts



Figure 25 : Stockage d'eau par les tachourts suite à l'écoulement de nappe



Les hauteurs d'eau d'environ 80 cm sont relativement homogènes dans les tachourts après le premier fort épisode de pluie de la saison (16 juillet). L'infiltration y est très forte durant le premier jour et le niveau d'eau diminue en moyenne de 5 à 10 centimètres (Fig.69). Puis, l'infiltration se stabilise à 2 ou 3 cm par jour. A la fin de la saison des pluies, ces dépressions stockent l'eau durant un mois, ce qui tend à montrer qu'une fois saturées, l'infiltration y est très faible.



V.3.3. Discrimination et spatialisation des dépressions

Les images SPOT multispectrales (10 mètres) et les images panchromatiques à 2,5 mètres acquises en saison des pluies 2006, nous ont permis de discriminer et spatialiser toutes les dépressions du bassin versant du lac de Mâle.

V.3.3.1. Méthodologie

Nous avons fusionné dans un premier temps avec le logiciel *Erdas imagine* version 8.4 les images panchromatiques Spot 5 (2,5 mètres) avec les Spots multispectrales à 10 mètres de résolution. La fusion de ces deux types de données aux résolutions hétérogènes, nous permet d'obtenir des images multispectrales à haute résolution de 2,5 mètres. Cette étape est nécessaire, car elle permet de discriminer plus facilement les tachourts de petite taille qui sont indétectables sur les images Spot à 10 mètres de résolution.

Cette fusion d'images a été réalisée selon la formule :

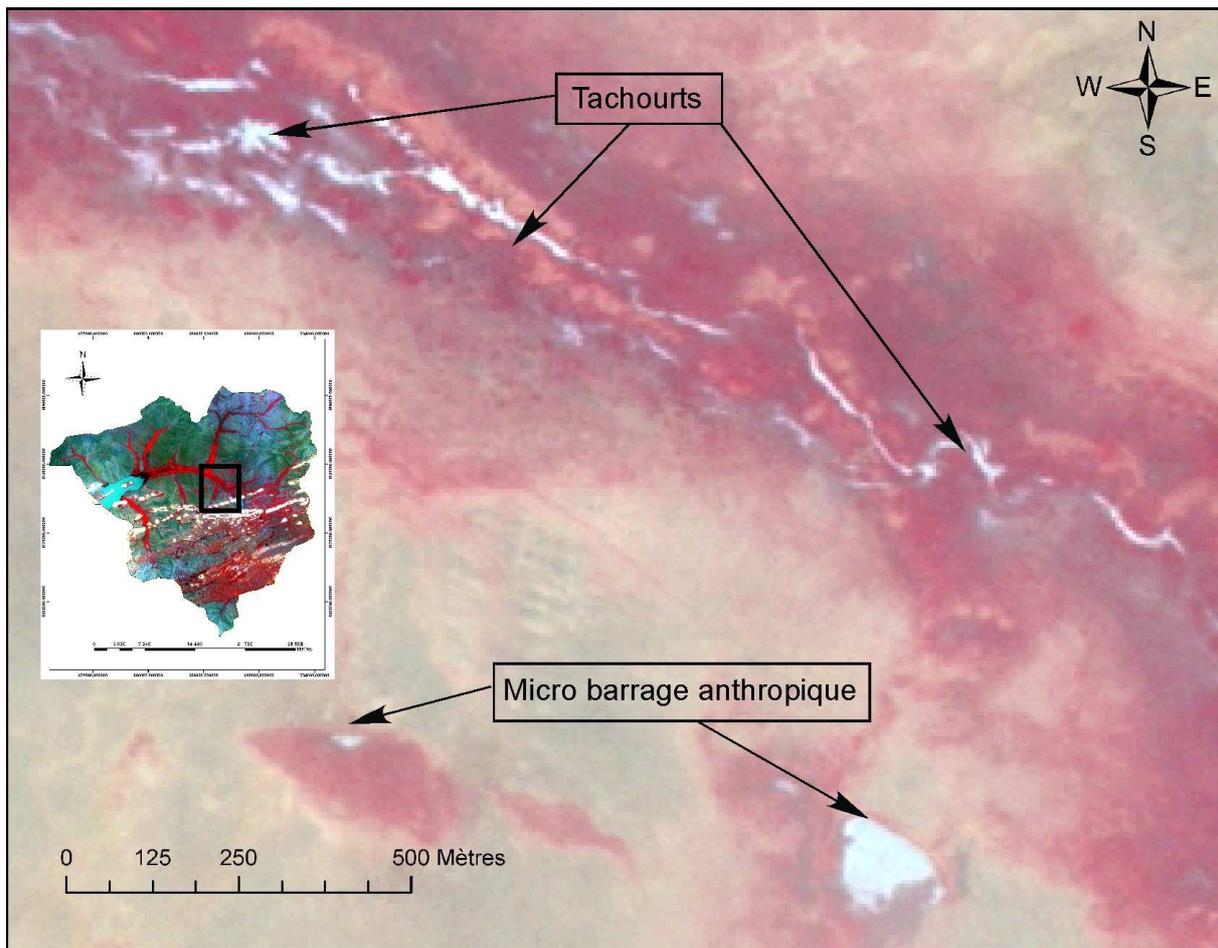
$$[\text{DN}_{B1} / \text{DN}_{B1} + \text{DN}_{B2} + \text{DN}_{Bn}] \times [\text{DN}_{\text{IMAGE HAUTE RESOLUTION}}] = \text{DN}_{B1_nouvel}$$

DN = Données numériques des bandes utilisées

Nous avons ensuite extrait l'ensemble des tachourts à partir de ces images à haute résolution.

Dans un premier temps, nous avons mis en œuvre une méthode d'extraction rapide et souple d'utilisation s'appuyant sur un masque basé sur la signature spectrale de l'eau puisque les dépressions sont pleines à cette date. L'eau ayant une faible réflectance, ces surfaces se distinguent en théorie nettement des autres états de surface. Nous avons réalisé ce masque au moyen du logiciel *Idrisi Kilimandjaro*. Il est rapidement apparu que ces masques incluaient d'autres types d'objet que les seules surfaces d'eau libre des tachourts notamment les sols gorgés d'eau de la périphérie immédiate.

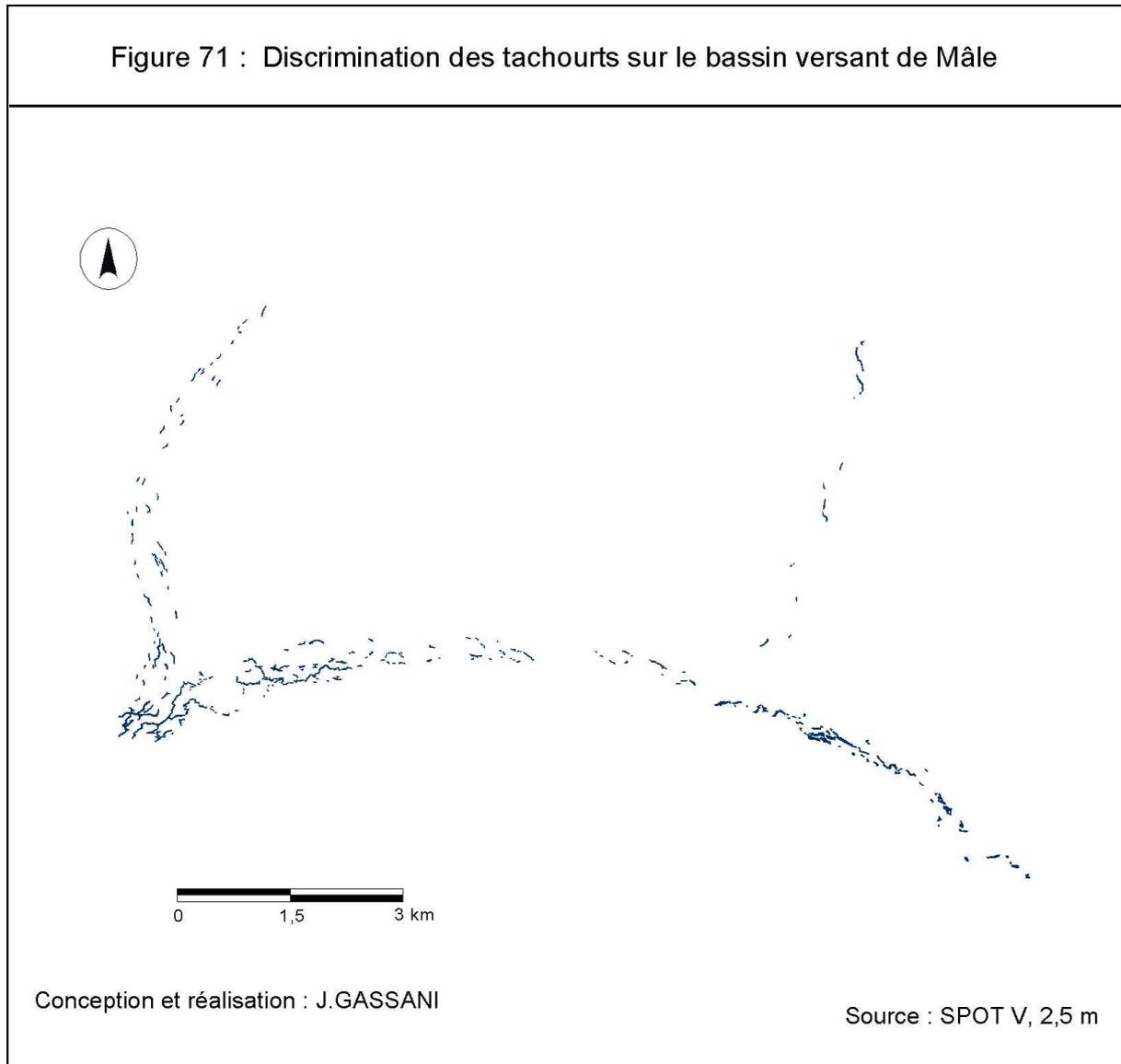
Figure 70 : Dépressions en eau, image multispectrale Spot à 2,5 m de résolution.



Conception et réalisation : J.GASSANI

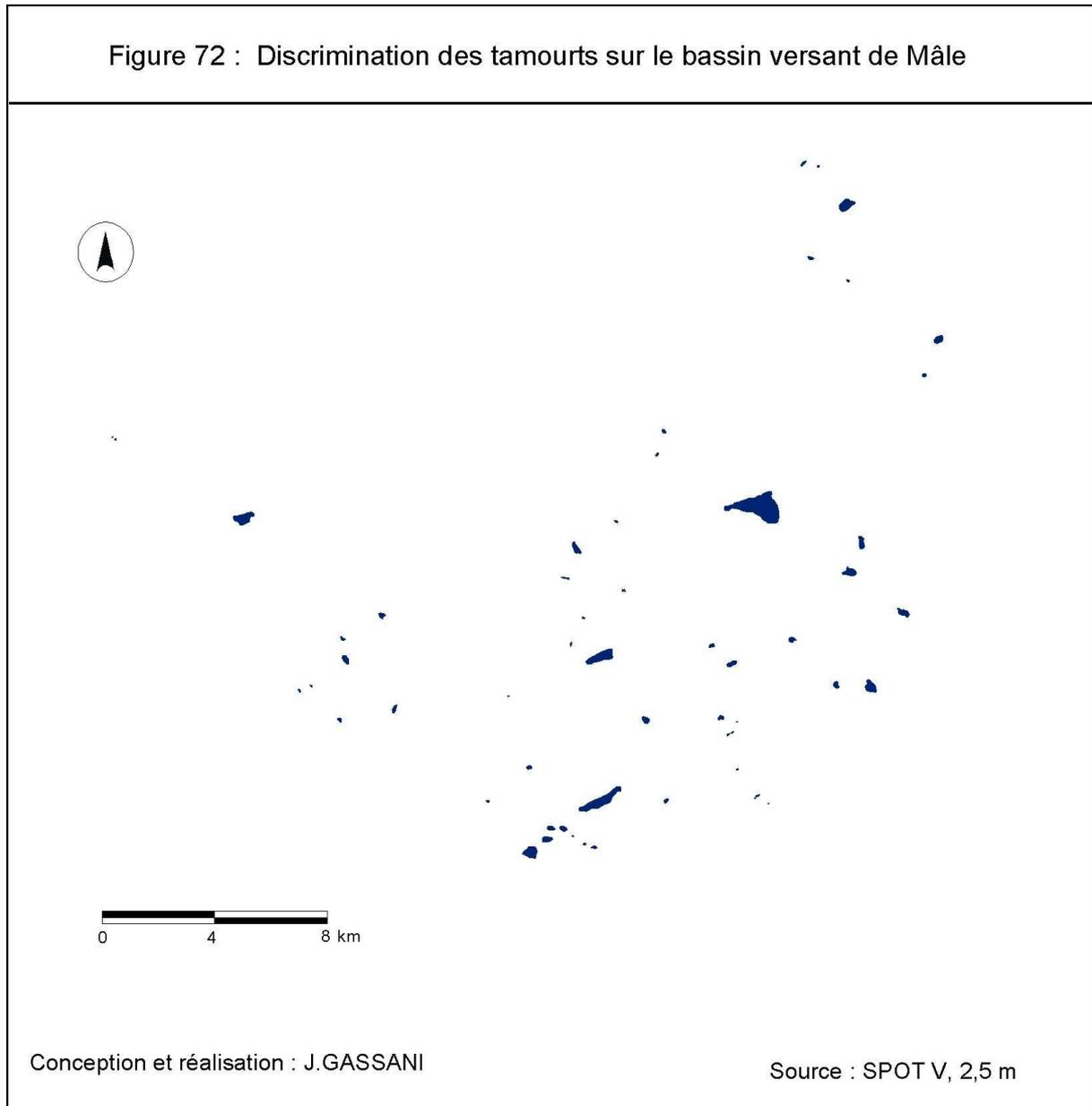
Face à ce problème d'augmentation artificielle des surfaces de tachourts, nous avons opté dans un deuxième temps pour une méthode plus fastidieuse mais plus précise, la digitalisation de chacune des tachourts après analyse visuelle des images Spot à 2,5 m de résolution, au moyen du logiciel *ArcGis 9.1*.

Après la digitalisation des tachourts (fig.71), on constate qu'elles n'existent que dans les grands oueds qui convergent vers le lac, reconstituant en filigrane, le tracé de l'oued Leye ainsi que celui de deux de ses principaux affluents au nord.



La superficie totale couverte par les tachourts est de 303 423 m², ce qui représente un stockage potentiel d'eau de près de 91 027 m³. A titre de comparaison, le volume maximal du lac de Mâle est de 16 500 000 m³. La capacité de stockage des tachourts ne représente donc en définitive que 0,55 % du volume de stockage du lac soit un volume total extrêmement faible.

La discrimination des tamourts, n'a pas posé de problème méthodologique similaire à celui évoqué pour les tachourts, du fait de leur taille plus importante (Fig.72). Ici nous avons appliqué la méthode du masque par télédétection présenté précédemment.

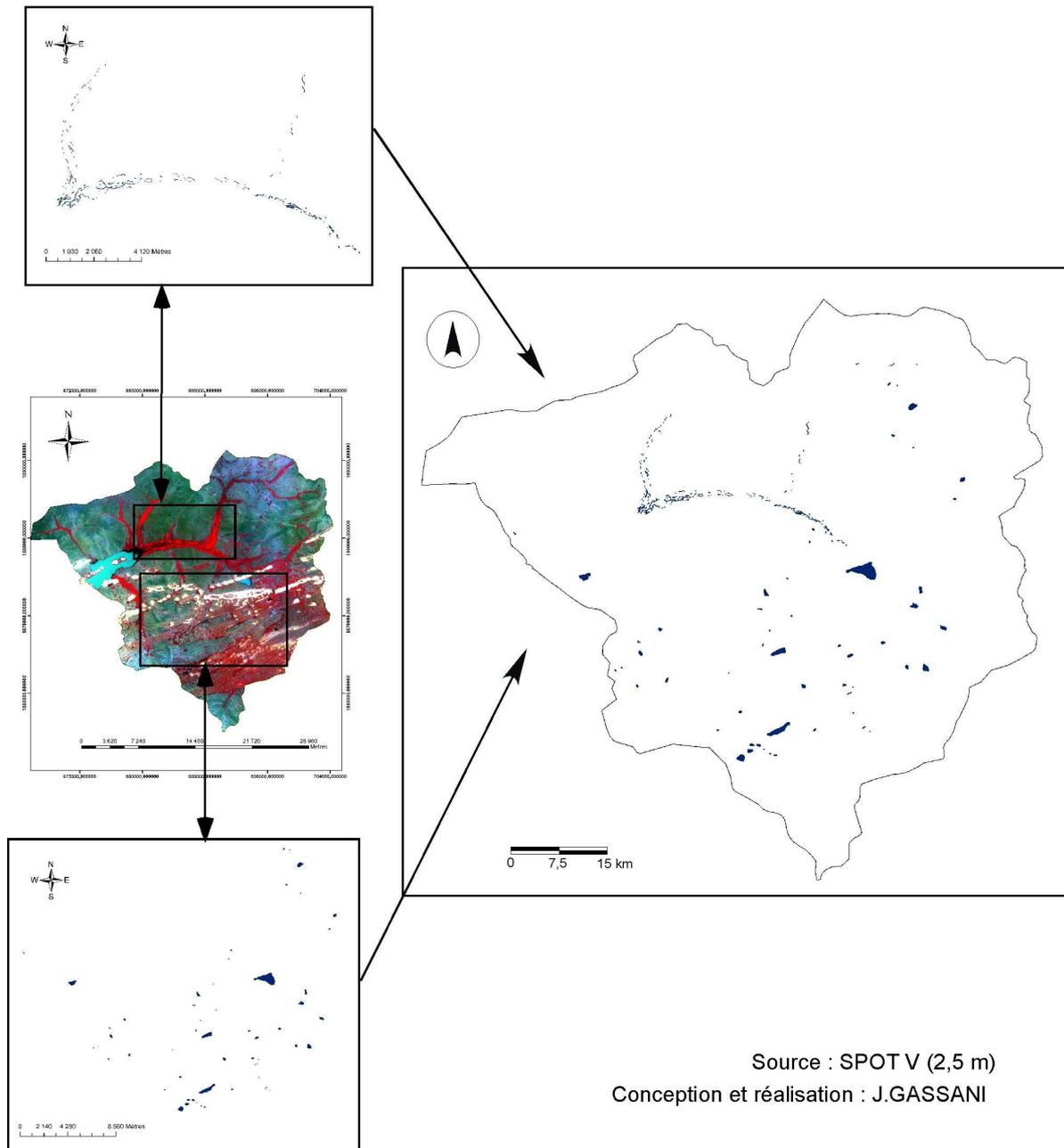


Les tamourts et micro-barrages anthropiques couvrent une superficie beaucoup plus importante que les tachourts, d'environ 3 005 000 m², ce qui représente un stockage potentiel de 901 408 m³. Si ce volume ne correspond qu'à 5,5 % du volume maximum du lac de Mâle, il constitue néanmoins une quantité d'eau non négligeable au niveau du bassin versant, surtout durant des saisons des pluies où l'on enregistre peu d'évènements extrêmes. Un épisode

pluvieux de faible intensité peut voir la majorité de son volume ruisselé sur le bassin versant, stocké dans ces dépressions.

La fusion des deux masques des tachourts et des tamourts, permet d'obtenir une spatialisation des micro-dépressions du bassin versant (fig. 73) :

Figure 73 : Fusion des masques des tachourts et des tamourts discriminées



La discrimination de ces deux principales formes de dépressions, les tachourts et les tamourts fait apparaître une localisation différenciée de ces deux types de cuvettes. Sur le masque de synthèse (fig. 73), on peut observer que les tachourts sont localisées au nord du bassin versant, de manière quasi continue, tandis que les tamourts et les retenues d'eau derrière diguettes se répartissent de manière bien plus hétérogène au sud et à l'est du bassin versant.

Cette répartition apparemment aléatoire des tamourts s'explique par le fait que cette partie du bassin versant est caractérisée par de nombreux cordons dunaires qui jouent un rôle de régulation du ruissellement en favorisant la formation de micro-retenues. Ces cordons dunaires ont oblitéré l'ancien réseau d'oued, créant des retenues à capacité de stockage qui reste limitée. Dès qu'on enregistre des pluies importantes, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les écoulements dépassent le seuil de retenue des tamourts et forment un écoulement en nappe continu jusqu'au lac.

Conclusion partielle

La discrimination des trois unités de paysage et de leurs états de surface, nous a permis dans un premier temps de les cartographier par télédétection passive. L'unité plateau et reg occupe la plus grande surface du bassin versant du lac de Mâle, à peu près 65 %.

L'association imagerie radar et multispectrale permet une discrimination très précise des unités de paysage. La caractérisation de la composition granulométrique des formations superficielles qui les occupent, associée à l'apport de l'imagerie radar, a mis en évidence leurs dynamiques et leurs évolutions pendant la saison des pluies. Ce sont les zones de bas-fond et les dunes pédogénéisées qui évoluent le plus durant la saison humide, par l'apparition sur leur surface d'une couverture graminéenne saisonnière qui se maintient durant environ quatre mois.

L'analyse de la dynamique des bas-fonds fait apparaître un remplissage du lac dépendant uniquement des pluies supérieures à 20 mm. La discrimination des différentes dépressions et l'observation de leurs volumes ont confirmé un fort stockage d'eau. Les tamourts apparaissent comme les dépressions stockant la majeure partie du ruissellement des épisodes pluvieux.

L'évaluation de ces volumes d'eau stockés dans ces dépressions après un épisode pluvieux reste à confirmer et c'est ce que nous allons étudier dans le prochain chapitre.

Chapitre IV
MODELISATION HYDROLOGIQUE

Dans le contexte sahélien de rareté de la ressource hydrique et, souvent, de concurrence entre utilisateurs, constituer un inventaire des plans d'eau, petits et grands, et suivre leur évolution au cours du temps sont des préalables indispensables à une gestion rationnelle de l'eau. Par ailleurs, la modélisation, appuyée par un minimum de mesures sur le terrain, nous paraît une bonne réponse technique à ce défi.

L'analyse de la répartition spatio-temporelle des pluies sur le bassin versant de Mâle et la compréhension de la dynamique des états de surface abordée au chapitre IV, nous permet maintenant d'envisager une étude du fonctionnement hydrologique de ce bassin versant durant la période d'hivernage (juillet-octobre).

Nous allons tenter de mesurer ces interactions spatiales en étudiant la dynamique réelle du ruissellement entre les différents types d'états de surface, et la prise en compte de la concentration de l'eau dans les multiples dépressions de toutes tailles (tachourts, tamourts) qui composent le bassin versant.

L'objectif de ce chapitre est donc d'élaborer, pour une pluie donnée, un outil de simulation du stockage de l'eau dans la cuvette du lac de Mâle permettant d'améliorer la gestion de ces ressources hydriques :

- en appréhendant le fonctionnement du ruissellement sur les différents types d'états de surface,
- en intégrant les caractéristiques de répartition très aléatoires des précipitations sur le bassin versant,
- en prenant en compte le rôle des dépressions dans le ruissellement,
- en conservant des variables d'entrée assez simples pour rester dans une modélisation facilement reproductible dans cette sous région, par exemple au lac d'Aleg.

I. La modélisation Pluie-débit

La manière dont va réagir le bassin versant lorsqu'il est soumis à une pluie de mousson, se nomme réponse hydrologique. Il est donc essentiel d'identifier les processus hydrologiques et leurs parts respectives intervenant dans la réponse du bassin versant, et les modalités de passage de l'impulsion pluviométrique à la réponse hydrologique (Musy, 2000).

Pour cela, on utilise différents modèles comprenant une fonction de production et une fonction de transfert permettant d'interpréter les mécanismes de transformation de la pluie en

hydrogramme (Fig.74). La fonction de production permet de déterminer le hyétogramme de pluie nette (fraction de la pluie brute qui participe à l'écoulement) à partir de la pluie brute.

La fonction de transfert permet de déterminer l'hydrogramme de crue résultant de la pluie nette.

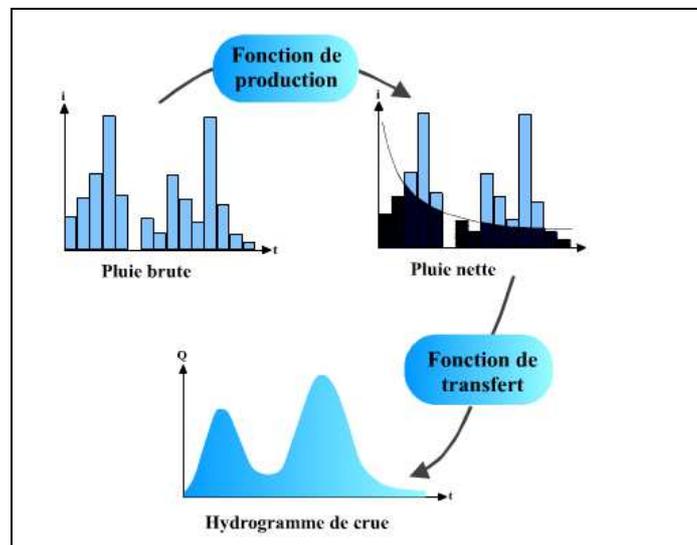


Figure 74 : Transformation de la pluie brute en hydrogramme de crue (Musy 2000)

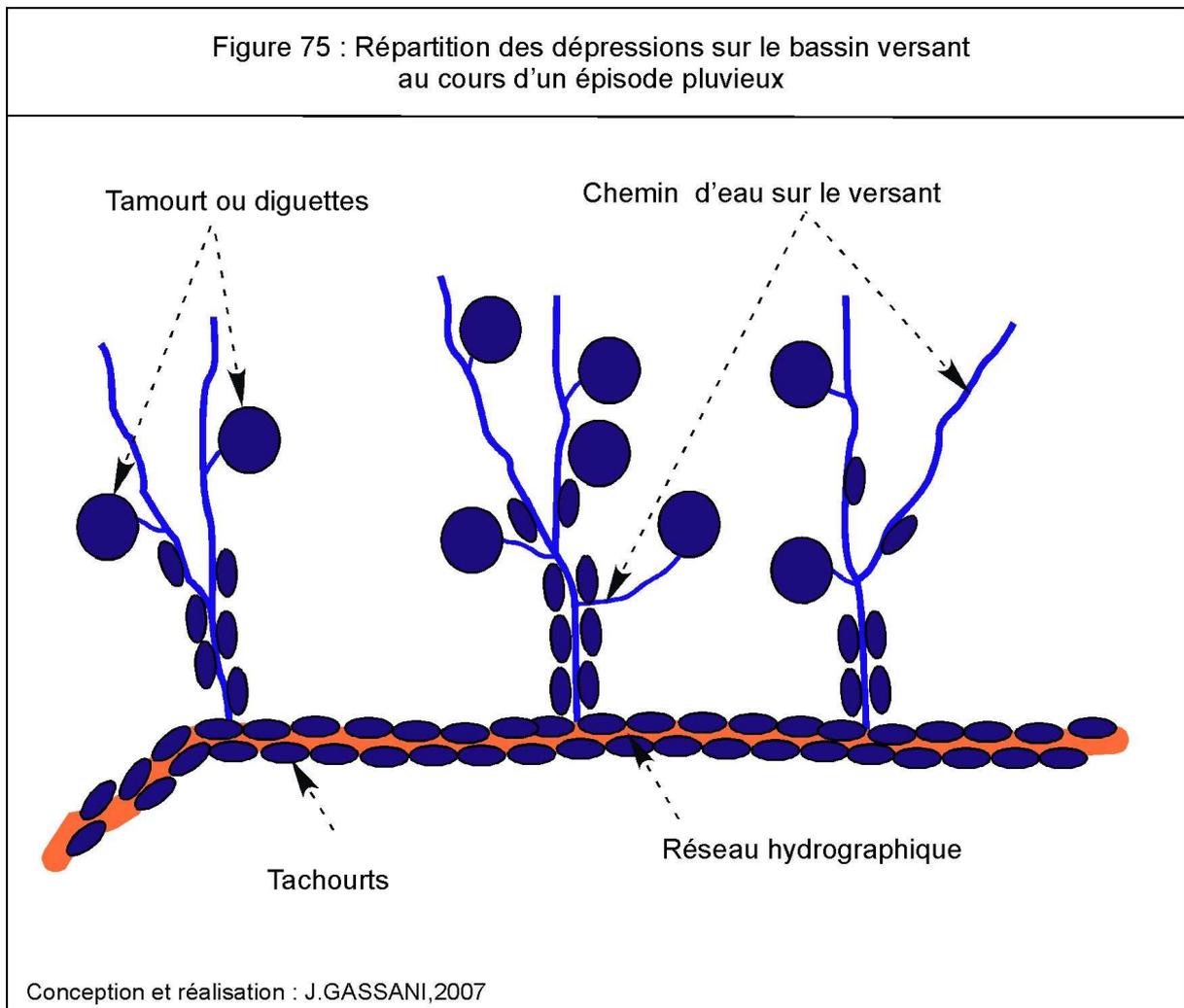
Dans le modèle que nous allons utiliser, nous travaillerons uniquement sur le calcul de la fonction de production, car nous ne nous intéressons qu'au volume ruisselé sur le bassin versant et non à sa distribution dans le temps. Cette fonction peut être calculée de deux manières différentes, soit par calcul physique (méthode déterministe), soit par calage (méthode statistique).

Dans la mesure du possible, c'est la première qui sera privilégiée car, si les variables nécessaires sont bien connues, elle peut être appliquée à n'importe quelle partie du bassin versant étudié, alors que la seconde nécessite évidemment un nouveau calage à chaque fois qu'on veut travailler sur un bassin ou sous-bassin différent.

I.1. Méthode déterministe

L'idée centrale et originale de ce modèle est que l'infiltration ne se produit pas sur toute la surface, comme c'est forcément le cas en conditions expérimentales, par exemple avec le double anneau que nous allons mettre en œuvre ci-après, où la charge hydraulique est de plusieurs centimètres, ou avec un simulateur de pluie. Dans ces conditions, la micro-topographie du sol joue un rôle majeur.

D'après les nombreuses observations qui ont pu être faites sur des bassins versants très variés en Europe, en Afrique et en Asie, nous pensons que le réseau des microtalwegs est structuré comme le réseau hydrographique, c'est-à-dire qu'il est ramifié ; cependant, les dépressions (tachourts, tamourts et diguettes dans notre cas) devront se remplir avant de se déverser dans la suivante ou dans le réseau ; la conséquence de cette structuration est un laminage de la crue, plus ou moins efficace selon la densité de distribution des dépressions, et le volume d'eau qu'elles peuvent stocker (Fig.75).



I.2 Démarche

Notre démarche de modélisation repose sur la comparaison du volume ruisselé au volume d'eau simulé.

Le premier résulte de l'observation quotidienne de la hauteur d'eau au barrage, ainsi que de la prise en compte de la topographie du lac via le modèle numérique de terrain que nous avons créé à partir d'une campagne de mesures topographiques.

Le deuxième prend en compte plusieurs variables et paramètres déterminés lors de multiples campagnes de terrain réalisées en 2005 et 2006 :

- la répartition et l'intensité des pluies, enregistrées par pluviomètres automatiques aux cinq stations présentées au chapitre III ;
- les mesures d'infiltration par la méthode de Muntz sur les différents types d'états de surface décrits au chapitre IV ;
- la cartographie des dépressions par images satellitales à très fine résolution (2,5 mètres) présentées au chapitre IV ;
- le modèle numérique de terrain des dépressions et du lac en vue d'estimer leur volume de stockage.

La figure 76 synthétise la démarche mise en œuvre pour mesurer expérimentalement les volumes d'eau stockés par le barrage (en rose) et pour les simuler par modélisation (en bleu). La comparaison des deux volumes mesuré et simulé permettra de valider ou non le modèle.

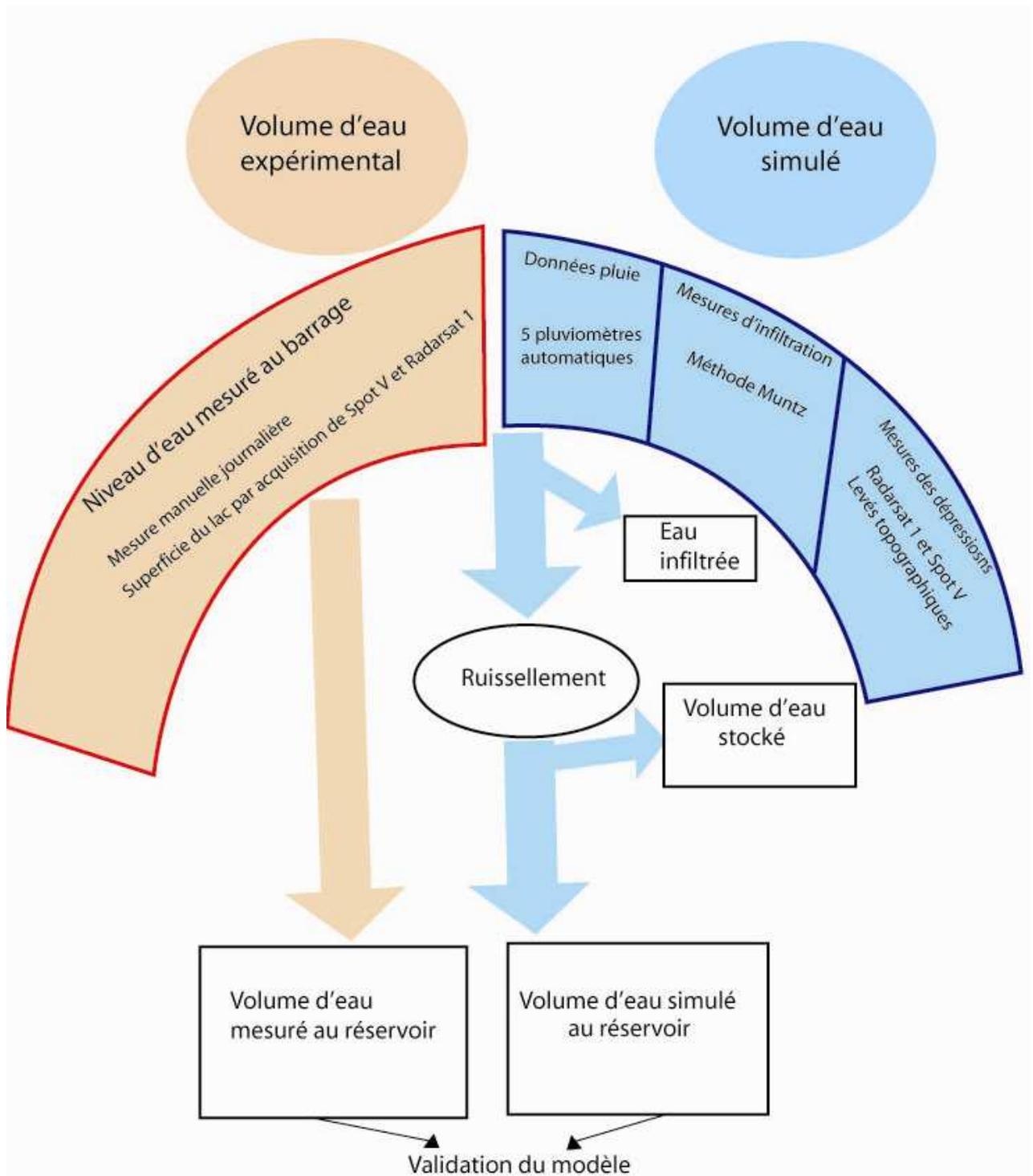


Figure 76 : Méthodologie des mesures du ruissellement

II. Acquisition et exploitation des données

II.1. Pluviométrie

II.1.1. Stations de mesure

Elles ont été présentées au chapitre III.

II.1.2. Analyse des pluies

Pour effectuer des simulations, il peut être intéressant de caractériser la forme des pluies afin d'obtenir un hyétogramme typique des intensités de pluie de la région et à partir duquel il sera ensuite possible de simuler un hyétogramme pour un cumul de pluie imposé.

Une des applications intéressantes serait de pouvoir accéder à la répartition temporelle des pluies, même en l'absence de pluviomètre enregistreur.

Une telle approche a déjà été tentée par Ribstein (1990), sous des climats comparables, et sous d'autres climats Huff (1967) par exemple aux Etats-Unis. L'analyse des données pluviométriques faite par le BDPA (1999) montre que l'essentiel des pluies est constitué par des pluies d'une durée inférieure à 24 heures.

Plus généralement, au Sahel selon Tapsoba (1997), on distingue trois systèmes de précipitations majeurs : les systèmes convectifs isolés, les systèmes convectifs organisés et les lignes de grains. Les deux derniers sont regroupés sous l'appellation de Systèmes Convectifs de Méso-échelle (SCM). Ces systèmes précipitants ont été étudiés au cours de l'expérience EPSAT-Niger, où une estimation des Pluies par Satellite au Niger a été fait par le groupe PRAO (Précipitation Afrique de l'Ouest) (Lebel et al, 1998). La contribution des SCM au total pluviométrique annuel au Sahel serait de l'ordre de 80 %. Ce pourcentage justifie que nous nous soyons spécialement intéressés aux SCM.

En travaillant sur les épisodes pluvieux les plus intenses et en utilisant les diagrammes de Huff (1967), (*cf.* chapitre III), Ribstein (1994) montre que la distribution des volumes précipités en fonction du temps se présente systématiquement sous la forme d'un histogramme à asymétrie positive, le mode de la distribution étant toujours situé dans le premier quart de l'épisode.

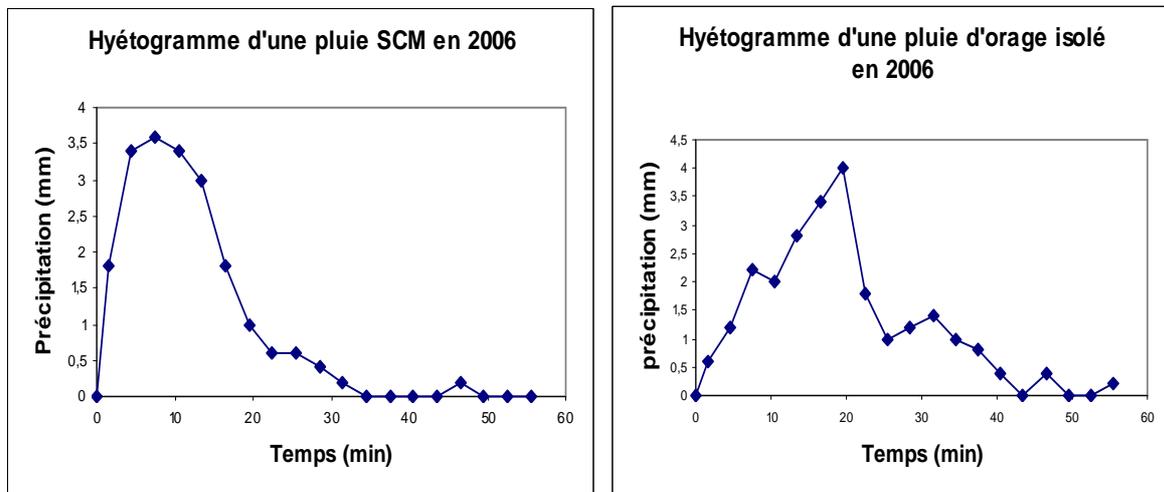
Nous proposons une méthode différente.

Les données utilisées correspondent à deux ans de mesure en 2005 et 2006 sur le bassin versant de Mâle, années, au cours desquelles nous avons utilisé les 39 épisodes les plus intenses enregistrés sur les cinq stations automatiques disponibles. Nous observons que tous ces épisodes sont très courts ; le maximum d'intensité est systématiquement atteint dans le premier quart d'heure et la durée totale de l'épisode excède rarement 1 heure, et lorsque c'est le cas, il ne s'agit que de la traîne de la distribution, qui correspond à des volumes négligeables.

Pour caractériser la forme des pluies, nous avons retenu les 39 événements d'un cumul supérieur à 10 mm parmi lesquels on comptabilise 30 épisodes de type SCM et 9 de type convectif isolé, ce qui vérifie bien la prééminence des épisodes de type SCM signalée par Lebel *et al*, 1998.

Les fig 77 a et 77 b montrent pour le premier un exemple de hyétogramme de pluie de type SCM et pour le second un type d'orage isolé :

Figure 77 : Hyétogramme de pluie SCM et d'orage isolé (2006)



a.

b.

Pour atteindre le hyétogramme caractéristique, nous calculons un épisode fictif en additionnant pas de temps par pas de temps les données des 29 hyétogrammes réels de type SCM, en utilisant un pas de temps de 3 mn. La durée de ce hyétogramme fictif est donc celle de la pluie la plus longue, et il présente, à l'instar des pluies individuelles, une asymétrie positive.

La figure 78 montre la courbe expérimentale obtenue.

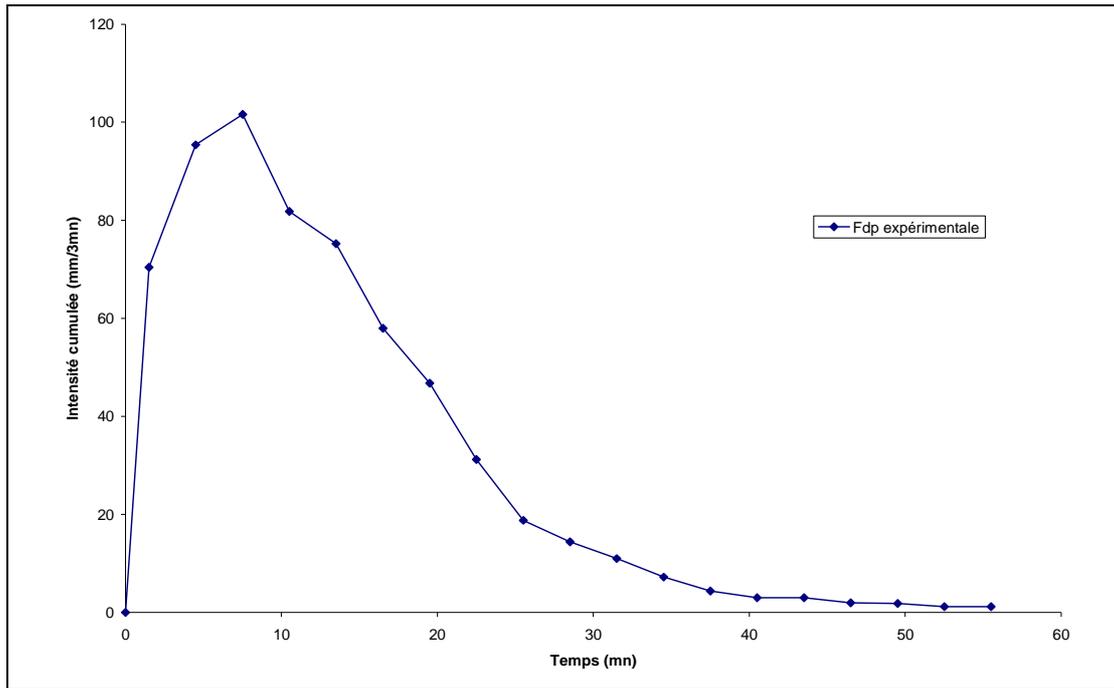


Figure 78 : Hyétogramme expérimental montrant la fonction densité de probabilité expérimentale (f_{dp}) en fonction du temps

Nous pensons *a priori* que la loi gamma peut convenir comme loi théorique de distribution. La figure 79 montre le très bon ajustement entre la distribution expérimentale obtenue ci-dessus et la distribution théorique en loi gamma, ce qui permet de valider notre hypothèse.

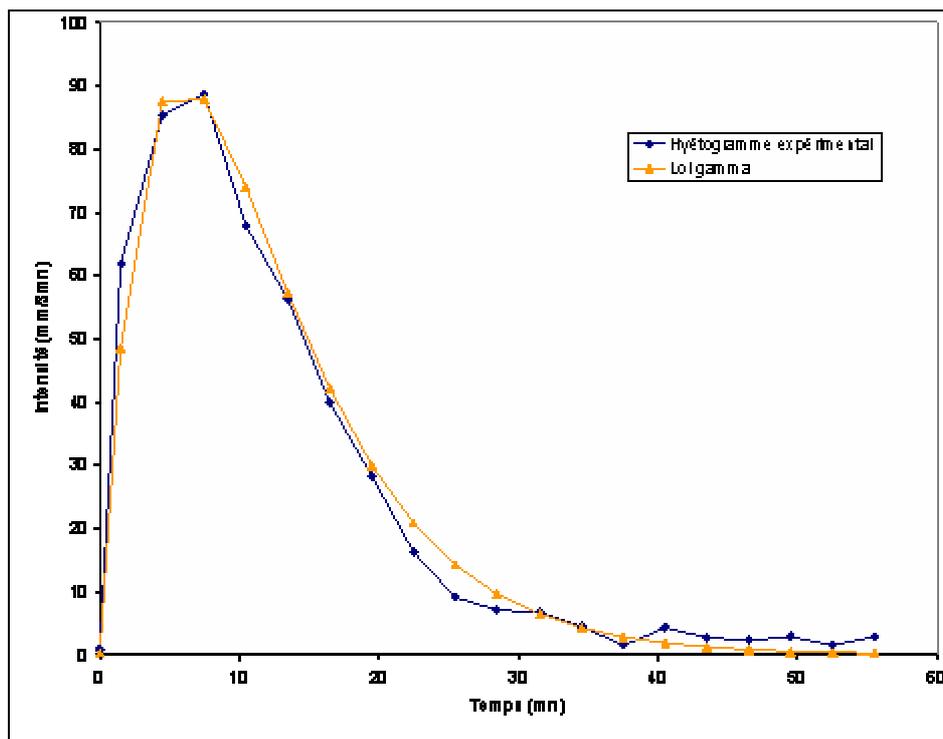


Figure 79 : Ajustement du hyétogramme de pluie à la loi Gamma

Pour vérifier la pertinence de cette loi de répartition théorique en loi gamma sur des épisodes individuels, nous l'avons appliquée à tous les épisodes de type SCM enregistrés en

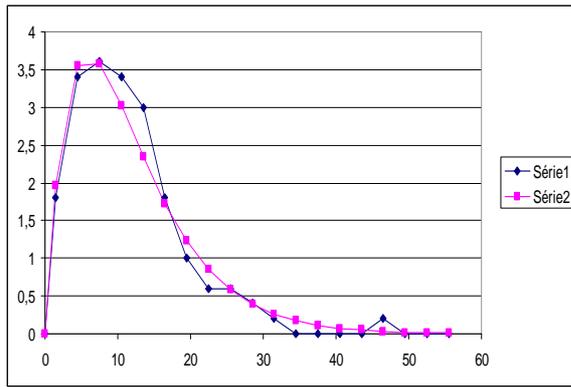
i) imposant comme durée totale de la pluie celle de l'épisode fictif total, c'est-à-dire 1 heure ;

ii) en appliquant aux ordonnées de la courbe théorique de la fig 79 une affinité d'axe vertical

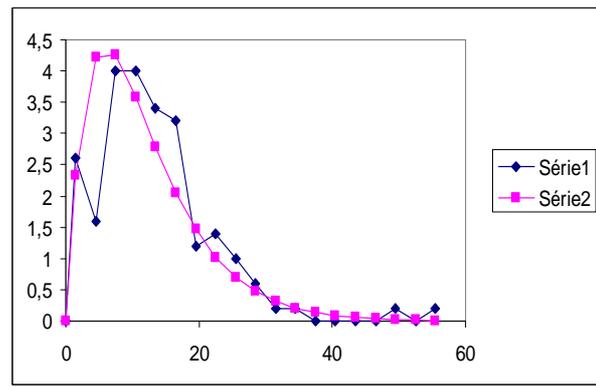
et de rapport $\frac{P_i}{P_t}$ où P_i est le cumul de l'épisode étudié et P_t le cumul total des 29 épisodes de

type SCM.

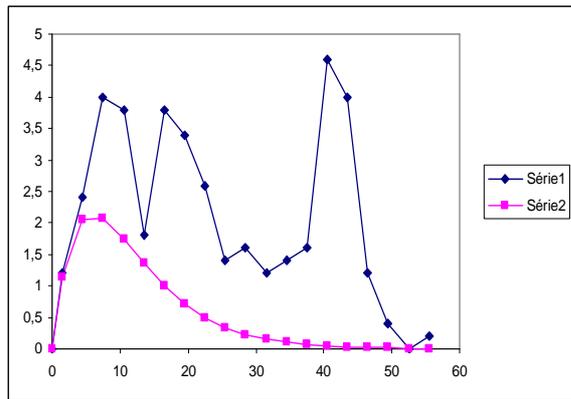
Sur les 29 épisodes étudiés, 20 sont bien simulés. Les figures 80 a, 80 b, 80 c, 80 d, ci-dessous donnent 4 exemples de bonne (fig a et b) et de moins bonne simulation (fig. c et d).



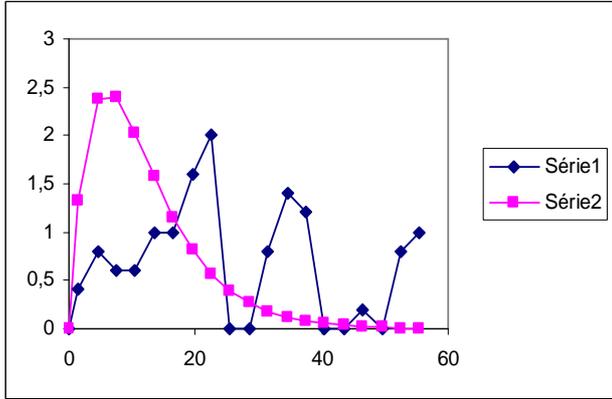
a.



b.



c.



d.

Figure 80 : Calage de la loi Gamma à différents types d'épisodes pluvieux

Le premier intérêt de ce résultat est de pouvoir simuler la répartition temporelle des pluies dans les cas, fréquents en Afrique et dans les pays en développement, où le bassin versant étudié est dépourvu de pluviomètres enregistreurs.

Le second intérêt réside dans la possibilité de simuler des pluies d'intensité plus ou moins forte que les deux années d'enregistrement n'ont pas permis de rencontrer sur ce bassin versant, afin de simuler le ruissellement correspondant. La figure 81 ci-dessous donne, à titre d'exemple, les hyétogrammes théoriques pour cinq cumuls de pluie (10, 20, 30, 40 et 50mm) que nous allons utiliser dans la partie V ci-dessous.

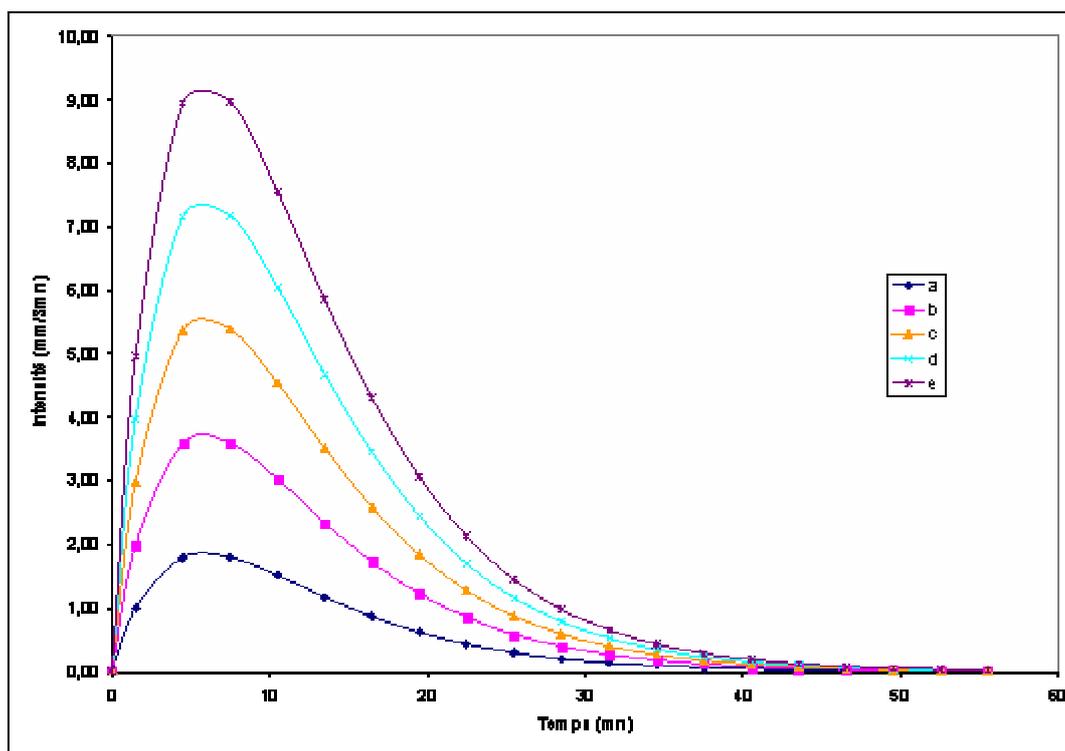


Figure 81 : Hyétogrammes simulés pour une pluie totale de (a) : 10 mm ; (b) : 20 mm ; (c) : 30 mm ; (d) : 40 mm et (e) : 50 mm.

II.2. Relevé limnimétrique au barrage

En 2005 et 2006, le lac de Mâle a fait l'objet d'un suivi hydrologique. Comme nous l'avons vu précédemment, un barrage a été construit à l'aval en 1957, dans le but de faire de l'agriculture de décrue.

En début de saison des pluies, les villageois installent des batardeaux renforcés par de la terre pour bloquer tout écoulement. A la fin de la saison des pluies, ils sont enlevés.

Nous avons donc installé sur la digue une échelle limnimétrique afin de pouvoir mesurer bi quotidiennement l'évolution des hauteurs d'eau durant la saison des pluies, entre juillet et septembre.

Photo 26 : Relevés linimétriques au barrage de Mâle



Les mesures ont été effectuées chaque jour à 8 heures du matin et 6 heures du soir. La figure 82 montre l'évolution des hauteurs d'eau durant la saison des pluies 2006 ; on constate que le remplissage du lac s'est fait dans la première quinzaine de la saison des pluies. Entre le 17 juillet et le 28 juillet, on arrive à une hauteur de 2,4 mètres, cote proche du maximum de remplissage du lac soit environ 2,6 mètres. Après le 28 juillet la hauteur d'eau dans le lac n'augmentera plus que très peu en raison de la trop faible intensité des pluies.

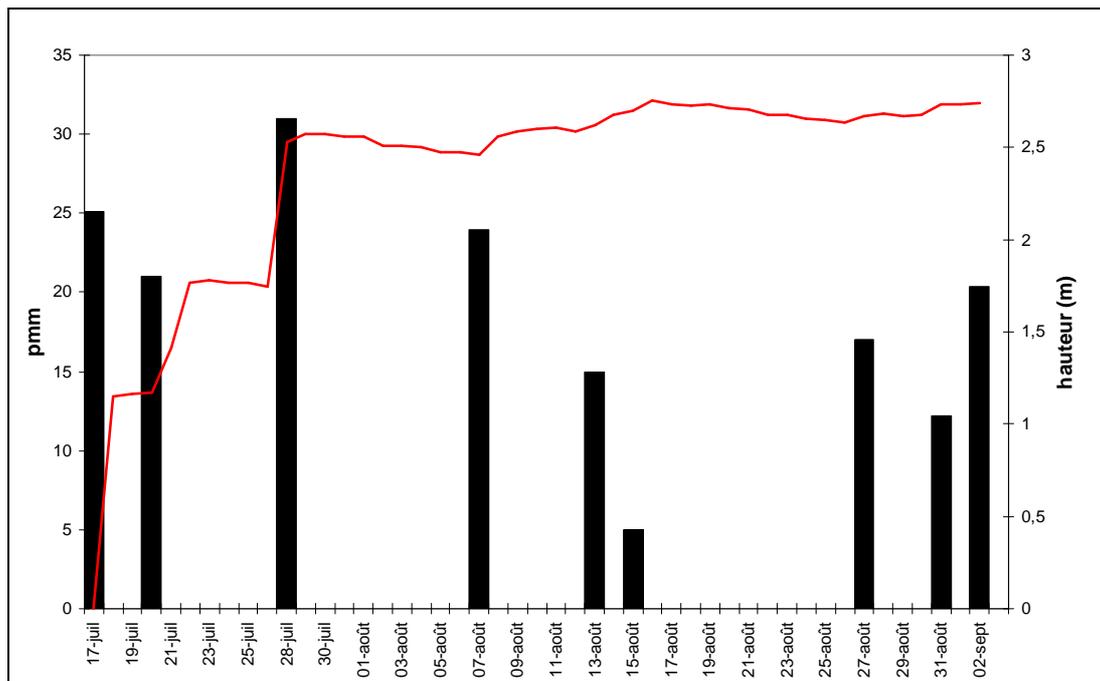


Figure 82 : relevé limnimétrique du barrage de Mâle durant la saison humide en 2006

II.3. Mesure d'infiltration

L'étude de l'infiltration est une étape essentielle pour évaluer le ruissellement sur le bassin versant. Une mission de terrain a donc été entreprise en mars 2006 pour mesurer l'infiltration potentielle des différents états de surface (reg, bas fonds, dunes vives, dunes pédogénéisées).

Dans un premier temps, nous présenterons le matériel utilisé et son utilisation. Nous présenterons ensuite les résultats des différents états de surface et essayerons d'établir une loi de ruissellement sur les différents types de surface.

II.3.1. Méthode utilisée

La méthode du double anneau a été utilisée. Elle a été développée initialement pour des terrains moyennement perméables.

La méthode du double anneau a été bien décrite par Boivin (1990). L'appareil se compose d'un anneau interne (sur lequel se mesure l'infiltration) et d'un anneau de garde dans lequel on maintient la même charge hydraulique que dans l'anneau interne (Photo. 27). Le diamètre du cylindre externe est de 45 cm et celui du cylindre central est de 30 cm. La hauteur, identique pour les deux, est de 45 cm.

Les anneaux ont été fabriqués sur mesure par une entreprise d'Angers et transportés sur le terrain.

Pour les mesures, ils sont enfoncés dans le sol jusqu'à environ 30 cm de profondeur. La présence de l'anneau de garde (extérieur) permet de maintenir l'écoulement vertical unidirectionnel dans l'anneau interne tant que la charge hydraulique est modérée (10 à 30 cm). Pour la mesure proprement dite, les deux anneaux étaient remplis d'eau jusqu'à une hauteur de 20 cm.

Photo 27 : Appareil à double anneau permettant les mesures d'infiltration



Source : J.GASSANI

La hauteur initiale de l'eau était notée, puis au fur et à mesure de l'infiltration, la hauteur du plan d'eau était relevée à des intervalles de temps variables selon la vitesse d'infiltration.

En cours de manipulation la hauteur de l'eau dans l'anneau extérieur était ramenée, à chaque fois que nécessaire, au même niveau que la hauteur dans l'anneau intérieur. Cette précaution s'impose pour maintenir un écoulement unidirectionnel dans l'anneau intérieur.

Les points de mesure ont été répartis sur l'ensemble du bassin versant et leur localisation est donnée sur la figure 44 du chapitre IV. En tout, une quinzaine de mesures ont été réalisées sur les quatre types d'unités paysagères. Chaque mesure durant trois heures en moyenne, la campagne de mesures s'est étalée sur environ deux semaines.

Nous avons réduit le nombre d'échantillon pour les dunes vives et pédogénésées et nous avons privilégié les mesures sur reg et sur bas-fond dont les caractéristiques sont a priori plus hétérogènes.

II.3.2. Capacité d'infiltration

L'estimation de l'importance du processus d'infiltration permet de déterminer quelle fraction de la pluie va participer à l'écoulement de surface, et quelle fraction va alimenter les écoulements souterrains et donc aussi participer à la recharge des nappes souterraines.

Le terme d'infiltration désigne le processus de pénétration de l'eau dans le sol. La particularité de ce processus découle de ce qu'il est engendré par une modification drastique et quasi instantanée des conditions de pression et de teneur en eau régnant à la surface du sol, lorsque celui-ci reçoit une averse ou est soumis à submersion (Musy et Soutter, 1991). Le concept d'infiltration est facile à comprendre mais la mesure et la compréhension des facteurs physiques qui contrôlent le processus d'infiltration sont extrêmement difficiles (Betson, 1964).

II.3.2.1. La loi de Horton

La décroissance de l'infiltration en fonction du temps est exprimée comme une fonction soit exponentielle soit quadratique, à partir d'une valeur initiale vers une valeur asymptotique qui peut être proche de zéro. La formulation la plus fréquemment utilisée est celle de Horton (1933) :

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

Dans cette relation, les variables ont la signification suivante :

f_0 est le taux d'infiltration initial

f_c le taux d'infiltration à saturation

k la constante de temps

$f(t)$ la valeur instantanée de l'infiltration ; elle sera aussi notée f_i dans ce texte

t le temps écoulé depuis le début de l'averse ou de l'essai d'infiltration

En général, le temps est exprimé en mn et le taux d'infiltration en mm/mn : k est alors exprimé en mn^{-1} .

II.3.2.2. Le traitement des résultats

L'exemple de la mesure effectuée sur la station1 du reg va nous servir à montrer la démarche suivie (Fig. 83).

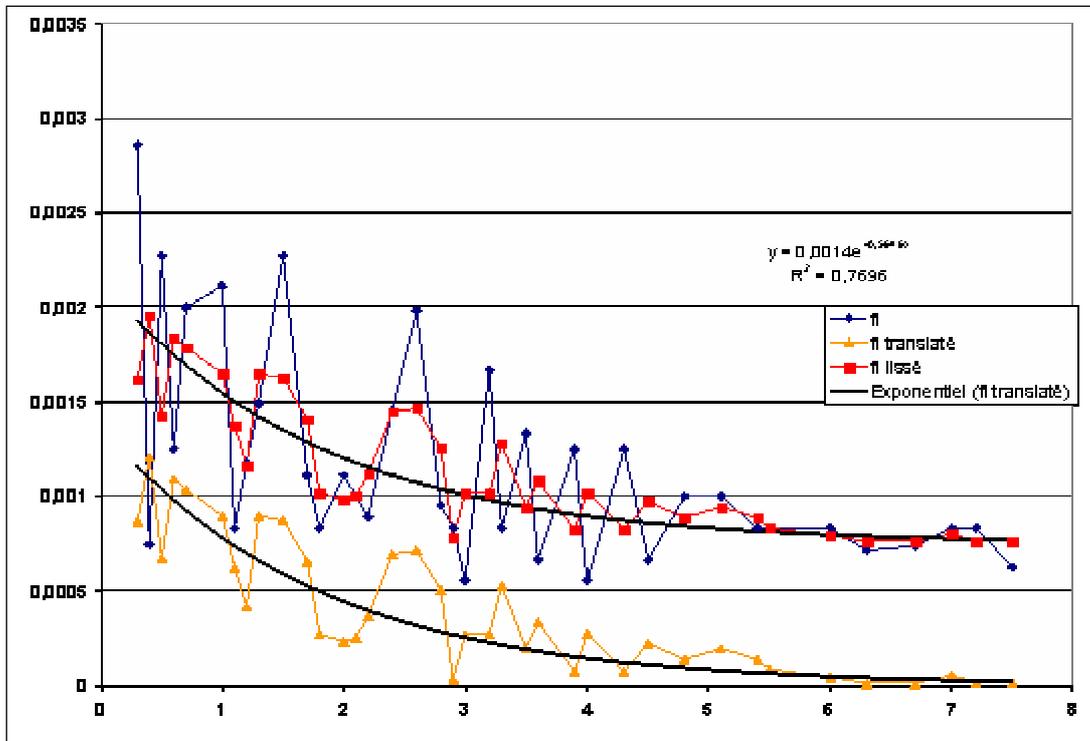


Figure 83 : Infiltration du reg en mm/s en fonction du temps

Les résultats bruts de la mesure de f_i exprimés en fonction du temps génèrent une courbe en dents de scie (courbe bleue) ; les oscillations importantes, de l'ordre du mm, sont dues à l'imprécision des mesures de hauteur, effectuées sans grossissement, dans l'anneau interne. Pour dessiner plus facilement la courbe de tendance, nous avons lissé la courbe expérimentale (bleue) avec un algorithme simple : chaque valeur est remplacée par la moyenne arithmétique de la mesure et des 2 mesures qui l'encadrent. On obtient alors la courbe rouge lissée. Afin de mettre en évidence la loi exponentielle de décroissance de f_i , nous lisons sur cette courbe la valeur asymptotique, à savoir $0,00075 \text{ cm.s}^{-1}$, qui est le paramètre f_c de la loi de Horton. En translatant la courbe précédente de cette valeur, nous obtenons la courbe orange sur laquelle la tendance est ajustée. On obtient la loi exponentielle, en noir, dont les 2 paramètres $0,0014$ et $0,5646$ sont respectivement f_0 et k . Il suffit de translater à nouveau cette courbe, mais vers le haut, pour obtenir la courbe qui représente la loi de Horton ajustée à nos données expérimentales.

Dans notre exemple, l'infiltration instantanée est donnée par la relation

$$f_i = (f_0 - f_c)e^{-kt} + f_c$$

avec $f_i = 0,00075 \text{ cm. s}^{-1}$ $k = 0,5646$

$f_0 = 0,0014 \text{ cm.s}^{-1}$

II.3.2.3. L'infiltration retenue

Pour déterminer l'infiltration type de chaque état de surface (tabl.12), nous prenons, pour chaque paramètre, la moyenne des valeurs obtenues par la méthode décrite ci-dessus.

Tableau 12 : Valeur des paramètres d'infiltration pour les différents états de surface

Type de surface	Infiltration initiale f_0	Infiltration à saturation f_c	Constant de temps k
Reg	0,0017	0,001015	0,65
Bas fond	0,0014	0,000125	1,0866
Dune vive	0,0352	0,19	0,372
Dune pédogénéisée	0,026	0,008	0,6

Les valeurs élevées obtenues sur les dunes et les dunes pédogénéisées ne surprennent pas. Par contre, on peut être étonné de la valeur plutôt forte atteinte sur le reg. Ce résultat aura une importance capitale sur le ruissellement et la modélisation des volumes écoulés. En utilisant l'hydrogramme théorique représentatif de ce type de climat décrit auparavant (§ II.1.2) et en comparant, au pas de temps de 3mn, l'intensité pluviométrique et le taux d'infiltration, on aboutit aux valeurs suivantes (tableau 13) du coefficient de ruissellement (en %). Comme on pouvait s'y attendre, même avec des pluies très intenses (60 mm en une heure), les dunes ne produisent aucun ruissellement. Le comportement du reg apparaît en revanche plus complexe.

Une pluie de 10 mm en une heure est totalement infiltrée, mais nous avons montré au chapitre III que pour cette région, la pluie extrême correspondant au percentile supérieur était de 58,5 mm. On observe sur le tableau suivant que pour un tel évènement, le coefficient de

ruissellement passe à 62 %. On voit donc que le coefficient de ruissellement augmente très rapidement quand la pluie devient de plus en plus intense (Tab 13).

Tableau 13 : Production du ruissellement sur les différents types d'états de surface selon la quantité de précipitation

P en mm	Reg		Bas-fonds		Dunes	
	Ruissellement en mm	%	R en mm	%	R en mm	%
10	0,0	0	5,7	57	0	0
20	4,4	22	14,9	74	0	0
30	11,8	39	24,1	80	0	0
40	19,7	49	34,0	85	0	0
50	27,9	56	43,9	88	0	0
60	37,1	62	53,8	90	0	0

II.4. Suivi du remplissage du lac

II.4.1. Levé topographique du lac

La nécessité de disposer de courbes de niveau les plus précises possible pour le calcul des volumes d'eau stockée dans la cuvette du lac de Mâle, nous a amené à établir une mission de levé topographique en mai 2007, un des seuls mois de l'année où l'on peut trouver la cuvette amont sans eau, condition indispensable pour le levé des points.

Plus de 400 points ont été relevés au théodolite électronique avec une précision de l'ordre du centimètre, afin de permettre de recréer l'altitude topographique de la dépression par interpolation (Figure 84.).

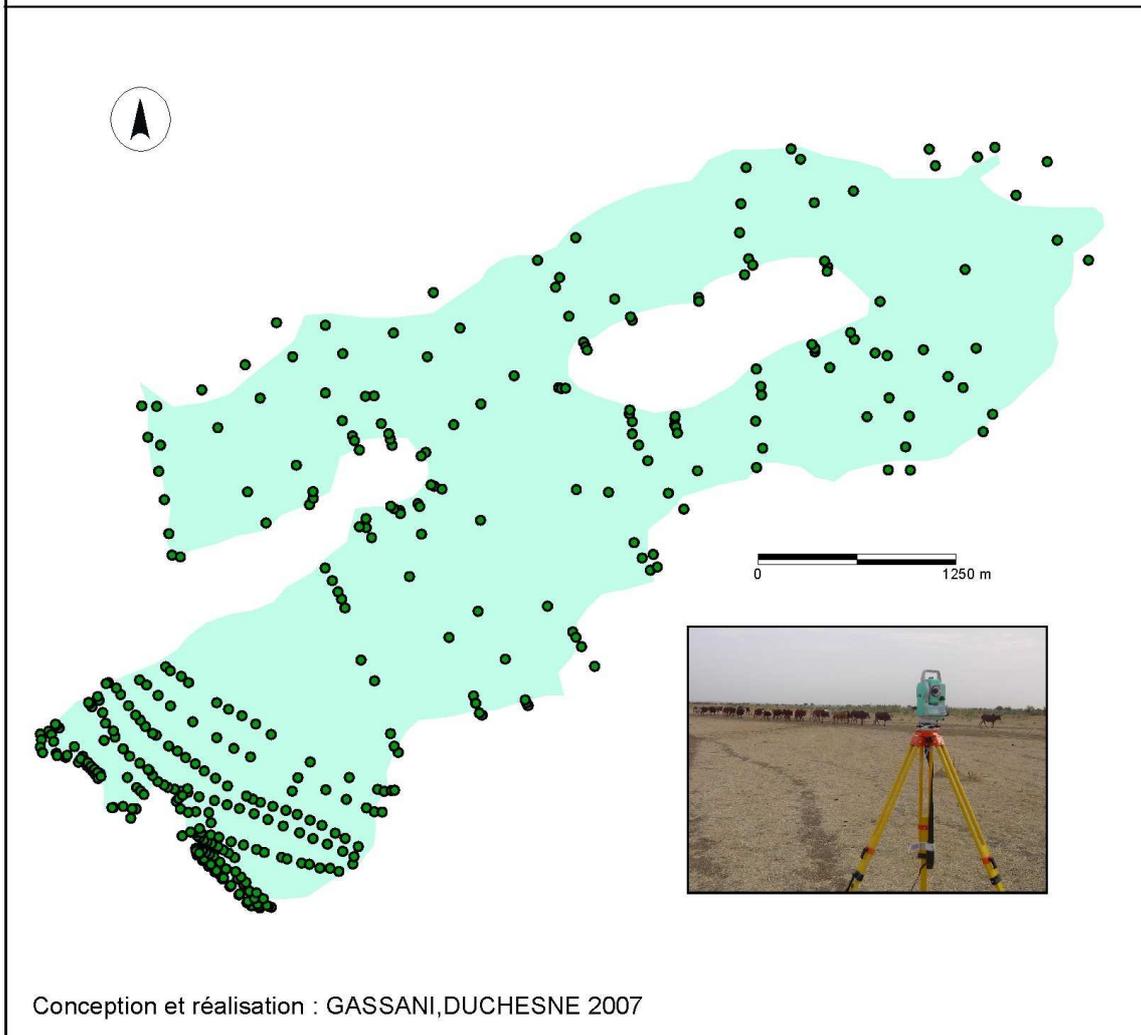
Nous avons déterminé les courbes de niveau en appliquant aux cotes mesurées une méthode d'interpolation, dite IDW, c'est-à-dire une technique de pondération par l'inverse de la distance.

L'interpolation IDW (Inverse Distance Weighted) détermine la valeur des cellules en calculant une moyenne pondérée à partir des valeurs des points les plus proches. La pondération est inversement proportionnelle à la distance séparant le point de ses plus proches voisins (Fig.84).

Pour avoir un bon résultat, il faut un échantillon de points suffisamment dense et correctement répartis en fonction des variations locales de la topographie. Sur le terrain, cela impose de

- Densifier le nombre de points lorsque la pente devient plus prononcée
- Relever les points de rupture de pente

Figure 84 : Points obtenus par théodolite du lac amont de Mâle (mai 2006)



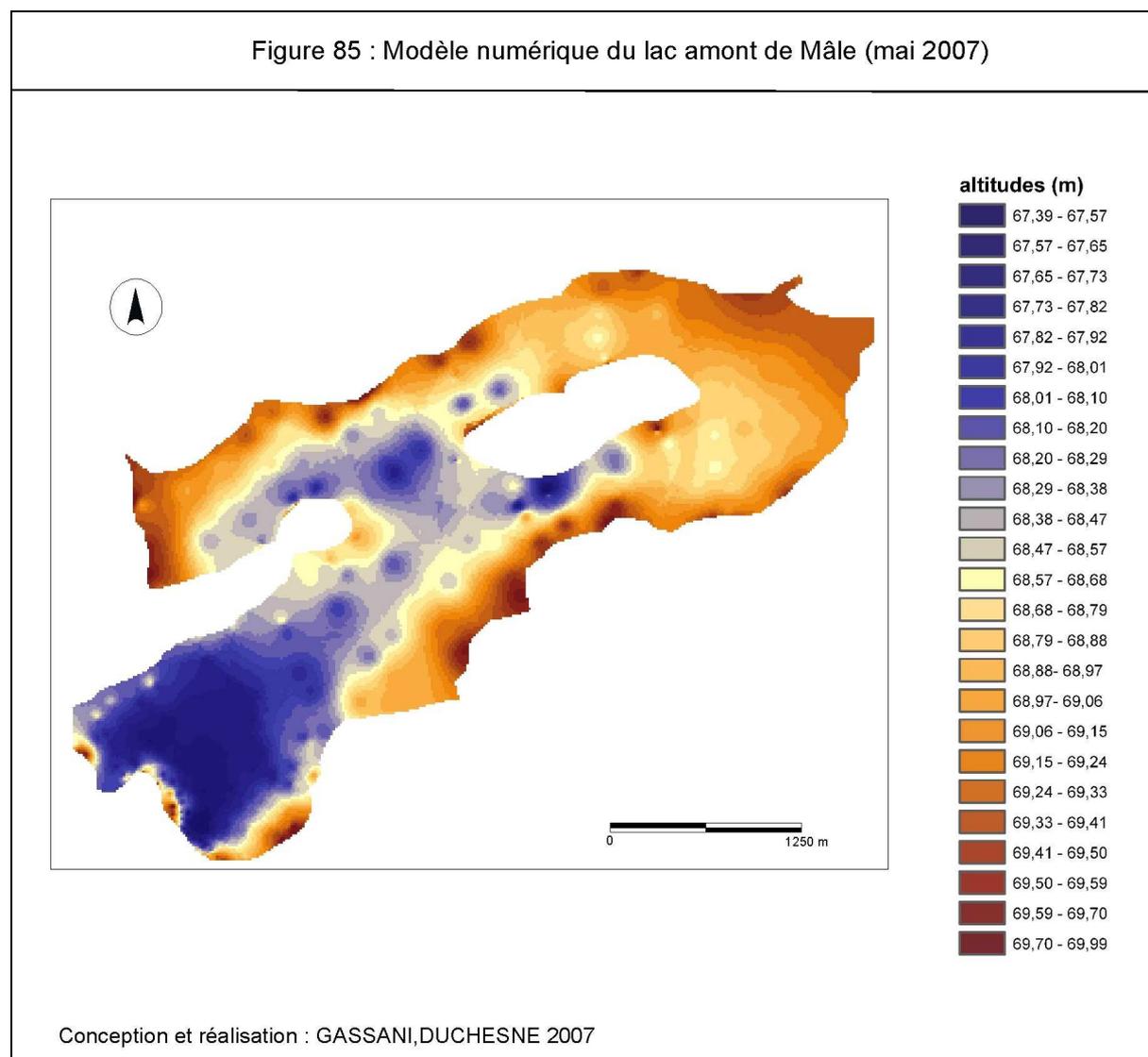
La figure 85 de 2007 présente le modèle numérique de terrain obtenu après traitement sur le logiciel Arc GIS.

Le lac est composé de plusieurs ceintures d'expansion de crue. Le volume total est de $16\,500\,000\text{ m}^3$. Sa plus grande surface d'extension est située au nord-est.

La topographie du lac n'est marquée par aucun relief, à part les dunes bordières. Le niveau minimal est à 67,39 m et la cote maximale à 70 m. Avec une profondeur maximale de 2,6 m, c'est un lac à topographie très plane d'orientation NE-SO. Le lac est plus profond à proximité du barrage, à l'emplacement des échelles limnimétriques. Il est bordé sur sa rive droite de grandes dunes ogoliennes orientées NE-SO alors qu'une grande dune, la dune Coppolani, occupe le centre du lac. Dans sa partie est, le lac peut déborder par le village de Jedida quand il dépasse la cote du déversoir de 70,72 m. En suivant l'évolution diachronique

par image satellitaire, la cote 69,50 m est souvent considérée comme optimale pour avoir de l'eau toute l'année.

Figure 85 : Modèle numérique du lac amont de Mâle (mai 2007)



II.4.2. Suivi du remplissage par limnimétrie

L'extension du lac dépend essentiellement des apports hydrologiques des oueds avoisinants qui varient d'une année à l'autre. L'alimentation en eau se fait sur les quatre mois de juillet à octobre, en corrélation avec la période des pluies. Puis à partir d'octobre, quand il a atteint son remplissage maximum, on entre dans une phase d'assèchement progressif du lac s'effectuant par évaporation et infiltration évaluées à 14 mm par jour.

Il nous est très facile de reporter les hauteurs observées à l'échelle limnimétrique à notre modèle numérique de terrain, qui peut ainsi cartographier les différentes superficies de la lame d'eau du lac à une date donnée et nous fournir le volume correspondant (Fig.86).

La figure 86, donne à partir de 15 valeurs de la hauteur d'eau, le volume stocké calculé directement à partir du MNT sur Arc Gis.

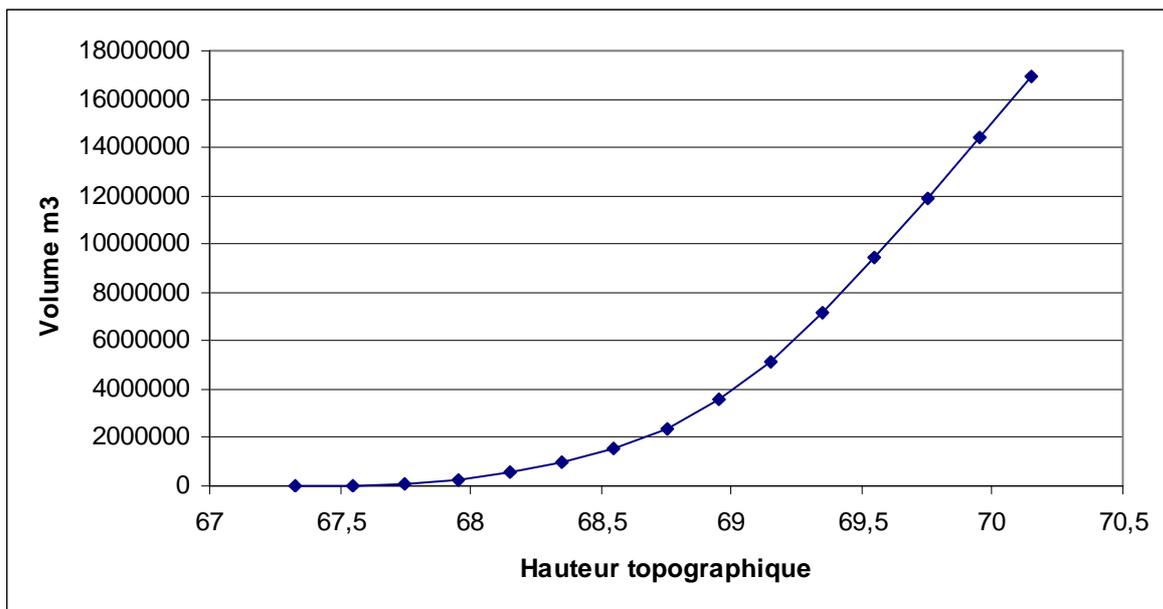


Figure 86 : relation hauteur/volume du lac de Mâle

On observe que l'accroissement de volume est très modeste quand on passe de 67,5 m (barrage vide) à 69 m (4 000 000 m³). Par contre, on observe un accroissement très fort entre 69 m et 70 m avec une augmentation de plus de 12 000 000 m³.

II.4.3. Suivi du remplissage par images satellitaires

Etant donné les difficultés de collecte des données, les zones humides mauritaniennes n'ont pas d'échelles limnimétriques pour suivre l'évolution de leur hauteur d'eau.

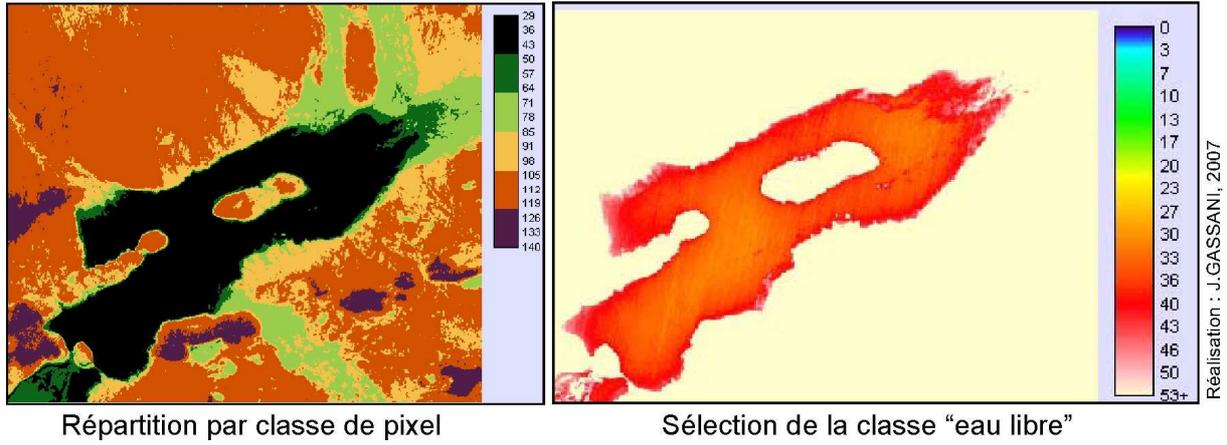
L'acquisition d'images satellites multidates va nous permettre de pallier ces difficultés en permettant de discriminer la surface d'eau du lac. La précision de cette cartographie va dépendre de la résolution de nos images.

Une zone d'eau, comme le lac de Mâle, est donc caractérisée par un ensemble de pixels dans une image satellite, dont la réponse radiométrique est généralement faible, plus particulièrement s'il s'agit d'une image de l'infrarouge moyen comme le canal XS4 de SPOT. Les zones d'eau sont généralement faciles à extraire et n'ont pas fait par conséquent l'objet de nombreux travaux et publications. Le fait que leur réponse radiométrique soit souvent homogène et sombre sur la plupart des images rend leur extraction facile par des traitements simples.

Nous allons étudier les distributions radiométriques sur tous les canaux SPOT disponibles sur le lac. Nous constatons que la réponse radiométrique de l'eau dans le canal du moyen infrarouge est faible (valeurs comprises entre 0 et 50) et assez homogène (la grande majorité des pixels a une valeur proche de 30), ce qui n'est pas étonnant puisque nous avons vu au chapitre IV que la réflectance de l'eau est toujours décroissante entre le visible (réponse moyenne) et le proche infrarouge (réponse très faible).

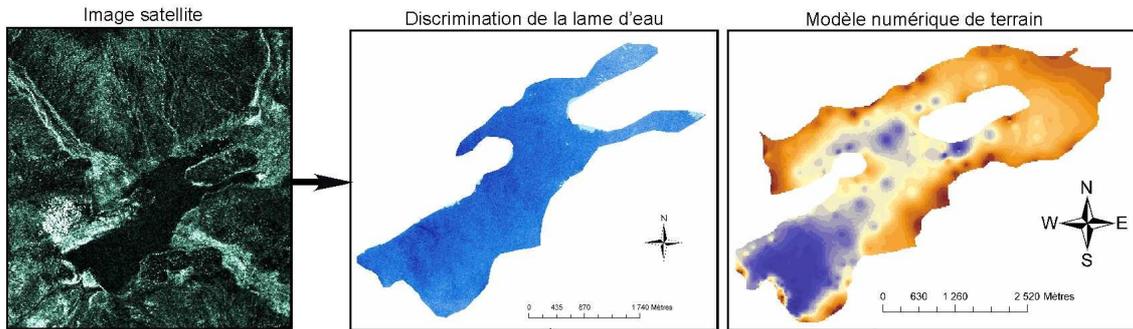
On peut appliquer deux techniques de discrimination, soit par masque d'image satellitaire soit par digitalisation à l'écran. Dans la première, on discrimine l'eau libre grâce à la superposition de masques invariants, où sont conservées les seules classes de la classification non dirigée (Figure 87). Mais cette identification d'une surface d'eau par des pixels introduit une erreur d'autant plus appréciable que la taille du pixel est grande par rapport à la taille du plan d'eau. On peut atteindre une erreur de 10% pour un carré d'un hectare délimité sur image Spot (Joannès *et al*, 1986).

Figure 87 : Méthode de discrimination par masque de l'eau libre

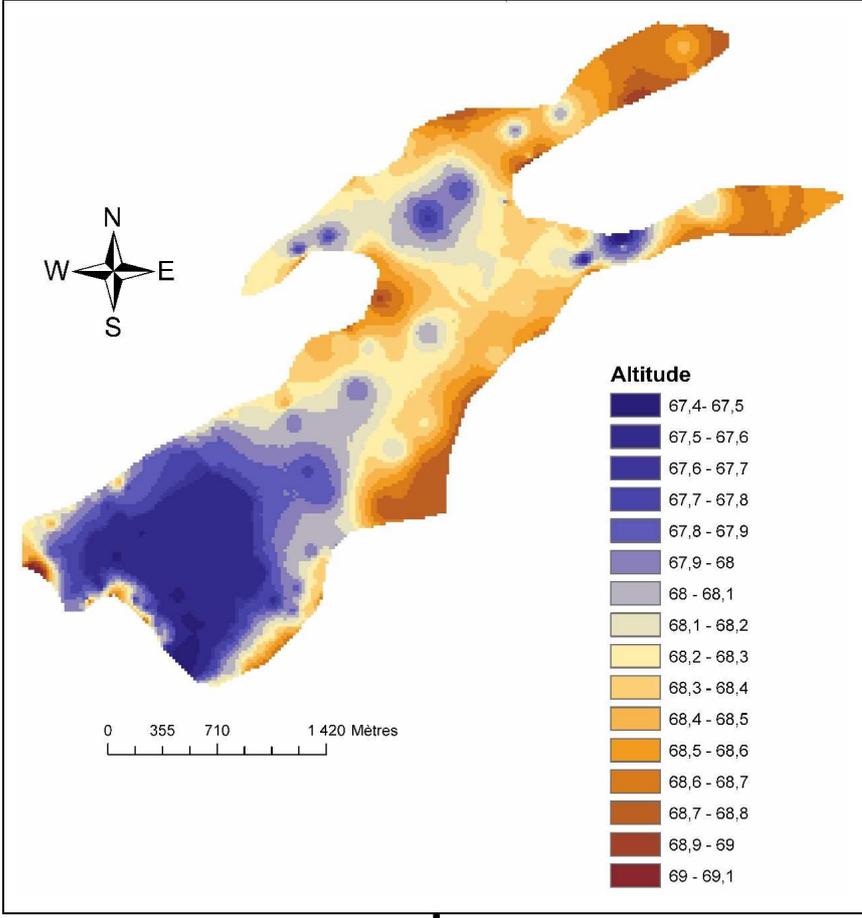


Disposant d'un jeu d'images satellites à haute résolution, nous avons appliqué la deuxième technique : une simple digitalisation à l'écran sur SIG. On applique alors un simple calage de ces différentes images à notre modèle numérique de terrain et on obtient le volume d'eau stockée au barrage à différentes dates (Fig.88).

Figure 88 : Méthode de détermination du volume d'eau du lac (apports de la télédétection et du SIG)



Fusion entre lame d'eau et MNT



Détermination du volume

4 652 573 m³

III. Evaluation du remplissage du lac de Mâle

L'hydrologie s'est donc attachée, d'une part à comprendre l'ensemble des phénomènes qui lient les précipitations survenant sur le bassin versant et les volumes d'eau mesurés au barrage, et d'autre part à la mise au point de modèles de simulation de comportement du bassin versant du lac de Mâle afin d'établir des prévisions sur le remplissage du lac à une pluie donnée.

Après avoir dans un premier temps décrit la méthodologie de l'exploitation de données terrain, nous nous intéressons à la simulation du remplissage du lac. Pour pouvoir comparer nos simulations à la vérité du terrain, nous avons caractérisé le volume expérimental de certains épisodes de pluies en 2006 par les données observées sur le terrain (relevé des hauteurs au barrage) que nous comparerons au volume simulé qui découle de notre modélisation.

Nous exposerons dans un premier temps les deux méthodes, puis nous argumenterons nos recherches par d'autres simulations.

III.1. Evaluation du volume expérimental du lac à partir des mesures limnimétriques et du modèle numérique de terrain

Nous nous intéressons aux remplissages du lac en 2006, durant les premiers épisodes pluvieux du 20/07 et 28/07. L'apport d'images satellitaires multi sources (Radarsat 1 et Spot V) du 26/07 et 01/08 2006, nous ont permis de discriminer la lame d'eau du lac.

La discrimination de la lame d'eau et sa fusion avec le modèle numérique de terrain nous a permis d'estimer le volume en m³ du lac aux deux dates (tab.14).

Figure 89 : Détermination du volume d'eau au barrage le 26/07/2006
par fusion entre le MNT et la lame d'eau

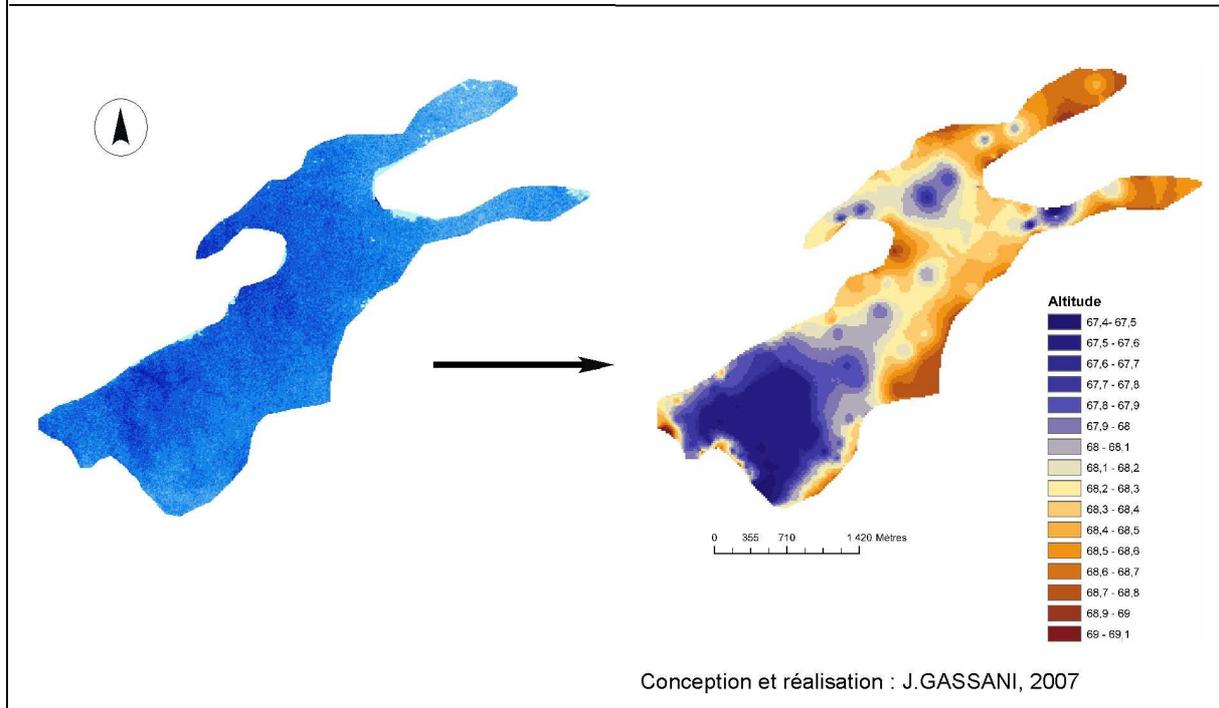
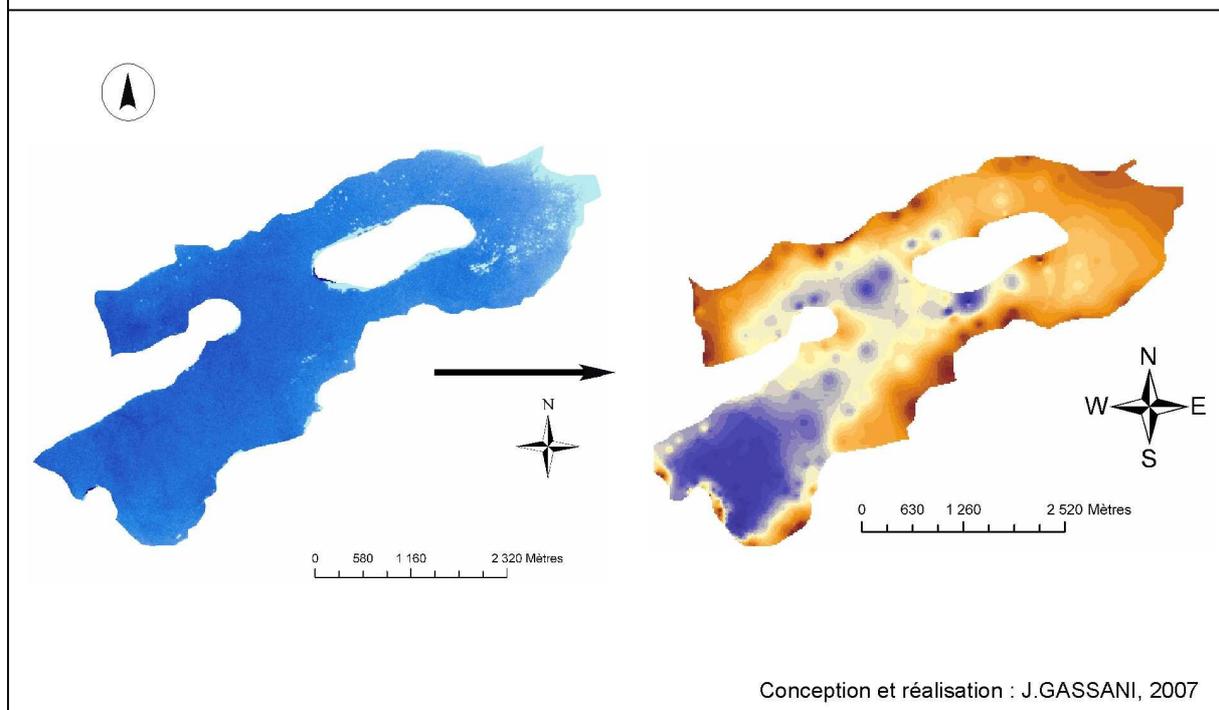


Figure 90 : Détermination du volume d'eau au barrage le 01/08/2006
par fusion entre la lame d'eau et le MNT par discrimination par télédétection



Les deux premiers épisodes pluvieux d'une moyenne de 25 et 20 mm sur le bassin versant de Mâle en 2006, ont apporté à la cuvette amont du lac de Mâle, 4 652 227 m³. Par contre l'épisode pluvieux du 28 juillet d'une moyenne de 32 mm a apporté à lui seul, un volume d'eau de 8 919 072 m³, amenant à un remplissage quasi maximum de la cuvette (80%), avec un total de 13 571 299 m³.

Tableau 14 : Superficie et volume d'eau déterminés à partir des deux images Spot 5

Date	Superficie (m²)	Volume (m³)
26/07/2006	6 131 129	4 652 227
01/08/2006	12 011 262	8 919 072

III.2. Evaluation du volume du lac par modélisation/simulation

L'objectif de cette modélisation hydrologique est d'élaborer un outil de simulation du volume d'eau stocké dans le lac amont. Pour cela on va associer les données terrains (pluviométrie, infiltrations) aux données des états de surfaces qui ont été systématiquement rentrés dans un système d'information géographique (SIG) qui, selon la Société française de Photogrammétrie et de télédétection, est "un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement c'est-à-dire géoréférencées. L'ensemble des informations géographiques intégrées dans le SIG forment une base de données géographiques."

III.2.1. Apport du SIG dans la simulation hydrologique

L'utilisation des SIG dans la modélisation hydrologique peut contribuer à une utilisation plus efficace des modèles de simulation. Ces modèles dit régionalisés décrit par Bambang 1989, prennent en compte la répartition spatiale des différents paramètres : état de surface, pluviométrie, infiltration, etc. Dans son principe le modèle vise à refléter les écoulements de chaque zone quels qu'en soient les paramètres.

La prise en compte de la distribution spatiale des caractéristiques des états de surface du bassin versant (infiltration, présence de trous d'eau) et de la pluie est donc à la base de cette conception.

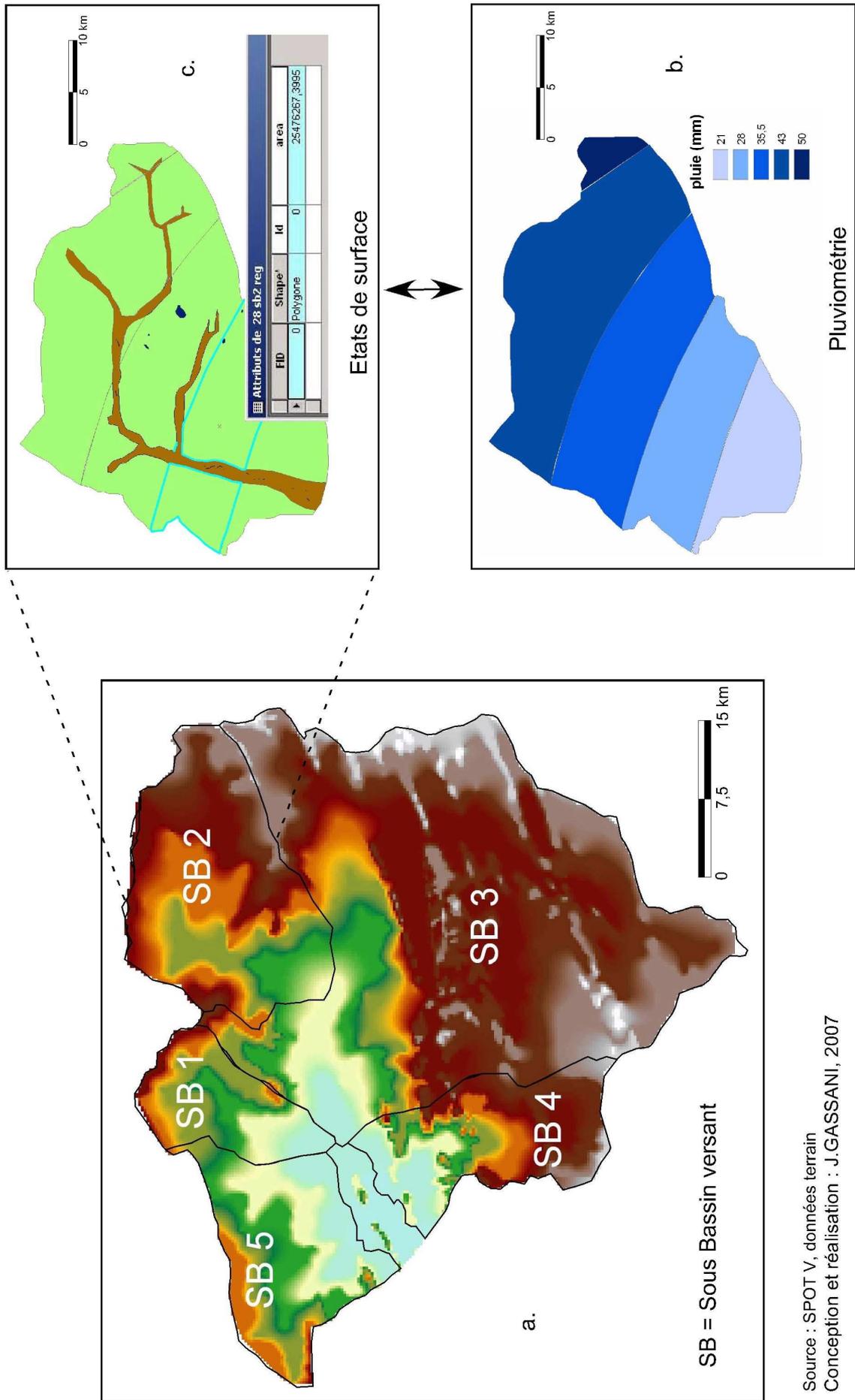
Pour spatialiser la réponse hydrologique du bassin versant, nous l'avons décomposé en cinq sous bassins (Fig. 91, a) que nous avons superposés à deux couches :

- i)* la carte des isohyètes (Fig. 91, b) obtenue par krigeage des données brutes enregistrées sur les 5 stations pluviographiques ;
- ii)* *ii)* la carte de répartition des états de surface, c'est-à-dire des infiltrations (Fig 91, c.).

On calcule de cette façon la superficie entre les différents isohyètes et des différents états surfaces (dunes vives, bas fond, dunes pédogénéisés, reg) leur correspondant par sous bassins versants.

De cette façon nous obtenons une répartition très précise de la surface de chaque état de surface pour un sous-bassin donné et une intensité de pluie donnée.

Figure 91 : Intégration dans le SIG de la distribution spatiale des caractéristiques des états de surface et de la répartition des pluies



Source : SPOT V, données terrain
Conception et réalisation : J.GASSANI, 2007

III.2.2. Calcul de la pluie nette en appliquant les différents paramètres

Nous avons calculé la pluie nette qui, selon le glossaire international d'hydrologie (1992), est la partie de l'averse qui atteint les cours d'eau par ruissellement. Cette pluie nette représente la quantité de pluie qui ruisselle strictement sur la surface du terrain lors d'une averse. Elle est déduite de la pluie totale, diminuée des fractions infiltrées dans les états de surface et stockées dans les multiples dépressions du bassin versant.

On sait après Chow (1964), Réménieras (1976) et Llamas (1993) que les eaux qui proviennent des précipitations peuvent atteindre le lit du cours d'eau par quatre voies différentes :

- l'écoulement de surface ou ruissellement direct,
- l'écoulement hypodermique ou ruissellement retardé,
- l'écoulement souterrain ou débit de base,
- l'alimentation directe des nappes d'eau libre par les précipitations.

Dans le contexte géologique des Mauritanides, il n'y a pratiquement aucun stockage en subsurface ou en profondeur, de sorte que l'écoulement hypodermique et l'écoulement souterrain sont tout à fait négligeables.

III.2.2.1. Choix du pas de temps

Les données brutes de pluie enregistrées correspondent à une mesure de la quantité de pluie tombée avec une résolution de 0,2 mm. Nous avons choisi de conserver l'ensemble des données brutes. Nous aurons donc un pas de temps variable mais une résolution pluviométrique maximale.

III.2.2.2. Choix de f_i d'infiltration

Le choix de l'infiltration initiale dépend du type de sol.

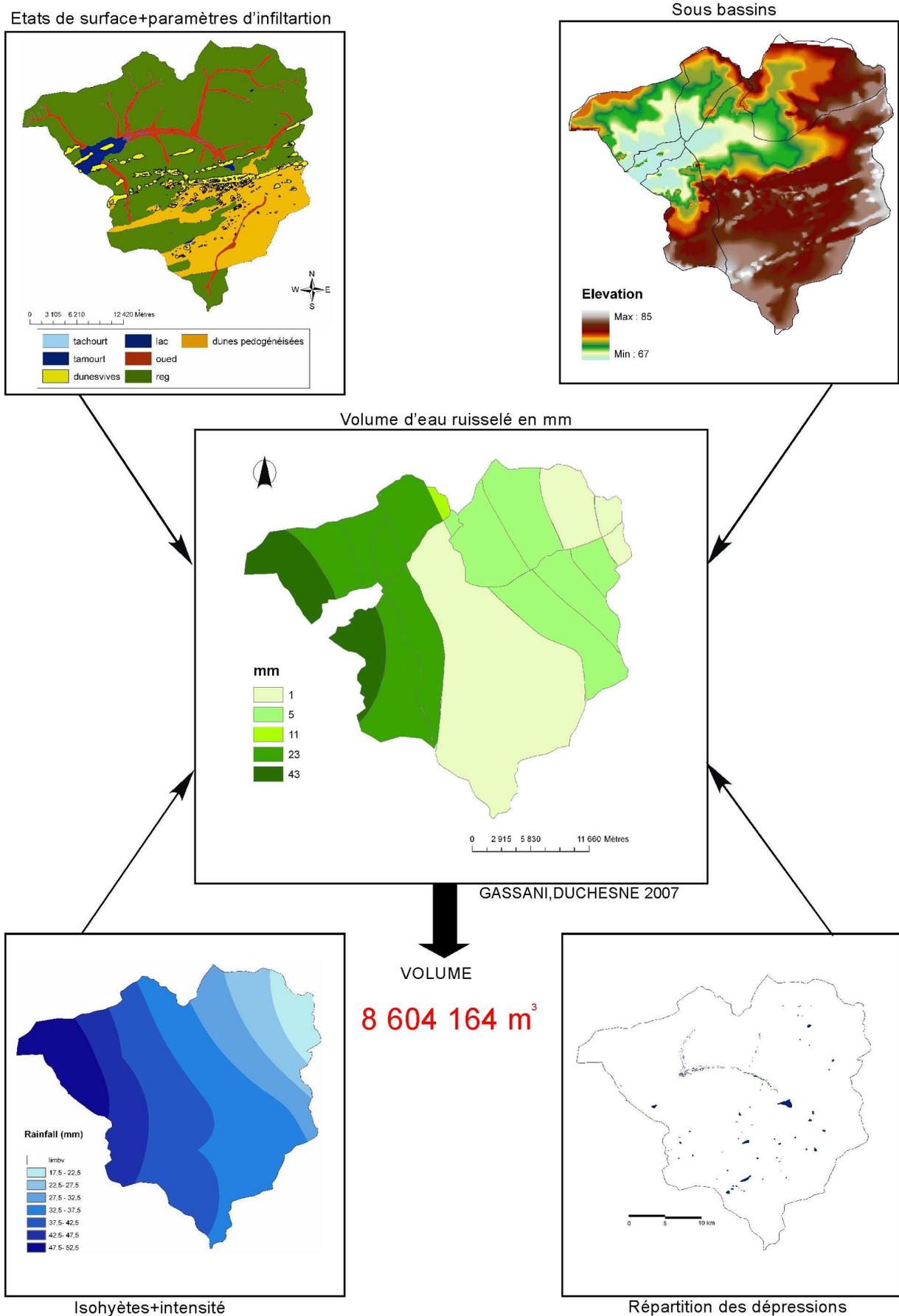
Sur le reg, les dunes et les dunes pédogénéisées, nous prendrons systématiquement comme valeur initiale f_0 la valeur mesurée lors des essais de terrain. En effet, comme nous l'avons montré au chapitre IV, leur ressuyage est très rapide, si bien que, même dans le cas où une pluie survient seulement 2 jours après la précédente, ce qui est rare, le sol a recouvré sa capacité d'infiltration initiale. En cours d'épisode, la valeur d'infiltration f_i utilisée est déduite de la loi mise en évidence au § I.C.2. Ci-dessus (Fig.92). Il est important de noter que, comme sur la figure 83, nous prenons en compte l'infiltration cumulée et non le temps.

Par contre, sur les bas-fonds, la teneur en eau reste élevée plusieurs jours après une pluie, en raison du taux élevé d'argile. C'est pourquoi nous prendrons systématiquement comme valeur d'infiltration la valeur minimale à saturation f_C , excepté pour la première pluie de la saison où le f_0 sera la valeur mesurée sur le terrain.

III.2.2.3. Carte des isohyètes

Elle est bien sûr déterminée pour chaque épisode puisque la pluviométrie totale et sa répartition spatiale varient beaucoup d'un épisode à l'autre

Figure 92 : Méthodologie de calcul du volume d'eau ruisselé sur le bassin versant



IV. Application à l'analyse de la répartition spatiale du ruissellement simulé du bassin versant du lac de Mâle

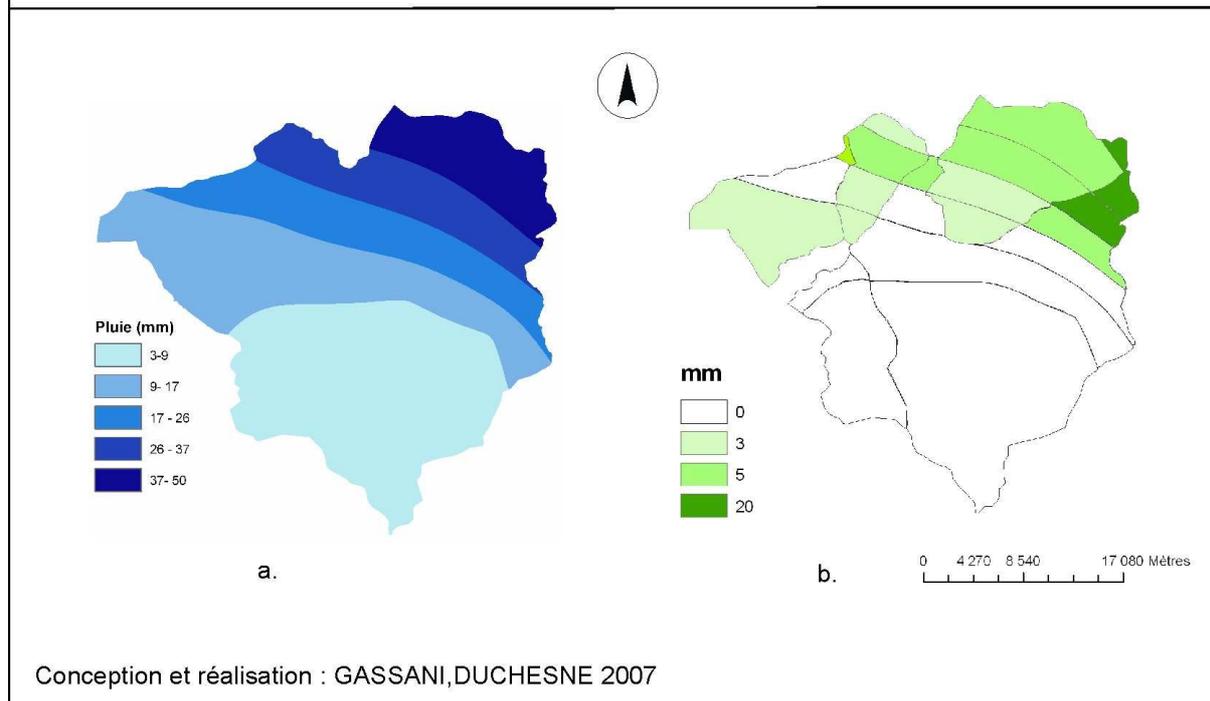
Dans cette partie nous allons analyser la distribution spatiale des écoulements durant la saison humide de 2006. Nous allons donc chercher à localiser, pour chaque évènement pluvieux, les zones principalement productrices de ruissellement, les zones de stockage et les zones de forte infiltration. Cette distribution spatiale des écoulements est le plus souvent conditionnée par la variabilité spatio-temporelle des différents états de surface.

Analyser la distribution de ces zones va aider à comprendre le comportement global des processus hydrologiques du bassin durant les pluies.

IV.1. Episode pluvieux du 16/07/2006

Le premier épisode pluvieux de la saison 2006 survient le 16 juillet et se répartit de façon très hétérogène sur le bassin versant comme on le voit sur les courbes isohyètes (Fig.93, a). C'est sur le nord-est que tombe le plus fort volume de précipitations, avec pour l'extrême nord-est une moyenne de plus de 40 mm. Par contre le sud du bassin est très peu touché par les précipitations, avec une moyenne de 5 mm. Après cet épisode pluvieux, on observe un très faible remplissage du lac, avec une hauteur à l'échelle limnimétrique de 68,46 mètres, ce qui représente un volume d'eau de 1 620 227 m³ seulement.

Figure 93 : Répartition spatiale des précipitations et du volume d'eau ruisselé le 16 juillet 2006

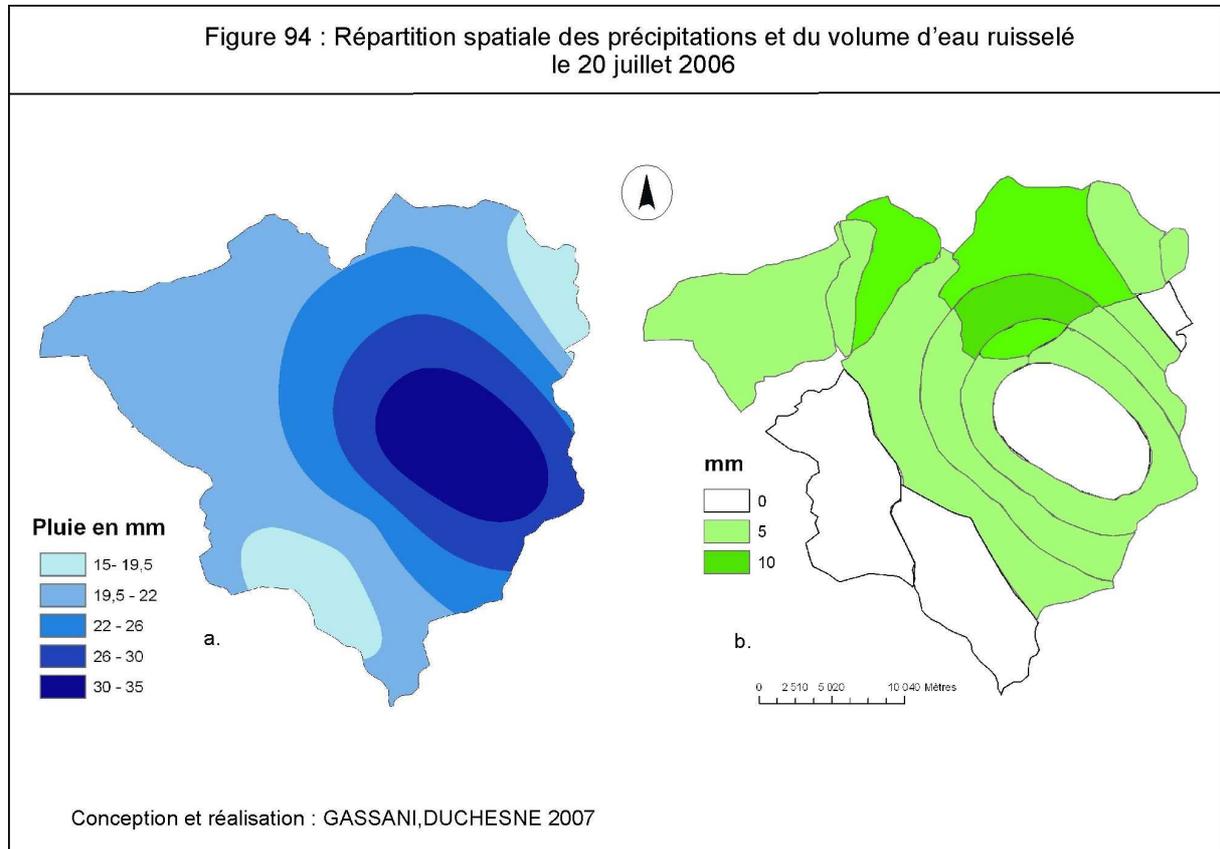


L'analyse du ruissellement (Fig.93, b) fait ressortir une localisation des écoulements dans le nord est. Au sud du bassin, l'insuffisance des pluies n'amène à aucun ruissellement, à cause du fort stockage dans les dépressions. Les zones du nord-est comportent plusieurs oueds (Fig.92) et un très grand nombre de tachourts, évidemment vides en ce début de saison des pluies. Les forts écoulements diffus générés par ces pluies intenses ont d'abord contribué à remplir les tachourts situées sur le trajet de l'eau de ruissellement en direction du lac. Ce laminage de la crue par les dépressions, d'environ 250 000 m³, diminue d'autant le volume d'eau qui arrive au lac.

IV.2. Episode pluvieux du 20/07/2006

L'évènement pluvieux du 20 juillet, second épisode de pluie de la saison, est quant à lui réparti très différemment. Cette fois, c'est le sud-est du bassin versant qui est touché par des précipitations d'une moyenne de 30 mm (fig 94, a) ; les dépressions de type tamourt situées au sud-est se remplissent donc. Le nord et l'ouest du bassin comptabilisent une moyenne de 15 mm.

La simulation du ruissellement fait observer un écoulement nul dans la zone la plus touchée par les précipitations (Fig. 94, b). Cette zone centrale du passage de la ligne de grains, d'une superficie de 72 km², se caractérise par 35 % de reg, 7 % de bas fonds, 14,5 % de dunes vives et 43 % de dunes pédogénéisées.



L'absence d'écoulement s'explique à la fois :

- par la forte présence de dunes, près de 60 %, qui présentent une très forte infiltration,
- et par la présence de nombreuses tamourts qui occupent une superficie de 1 156 131 m² et retiennent un volume d'eau d'environ 350 000 m³. Ces dépressions, localisées en majorité au sud-est, jouent sur cet épisode pluvieux un vrai rôle de rétention, avec au total plus de 850 000 m³ d'eau stockée sur l'ensemble du bassin versant.

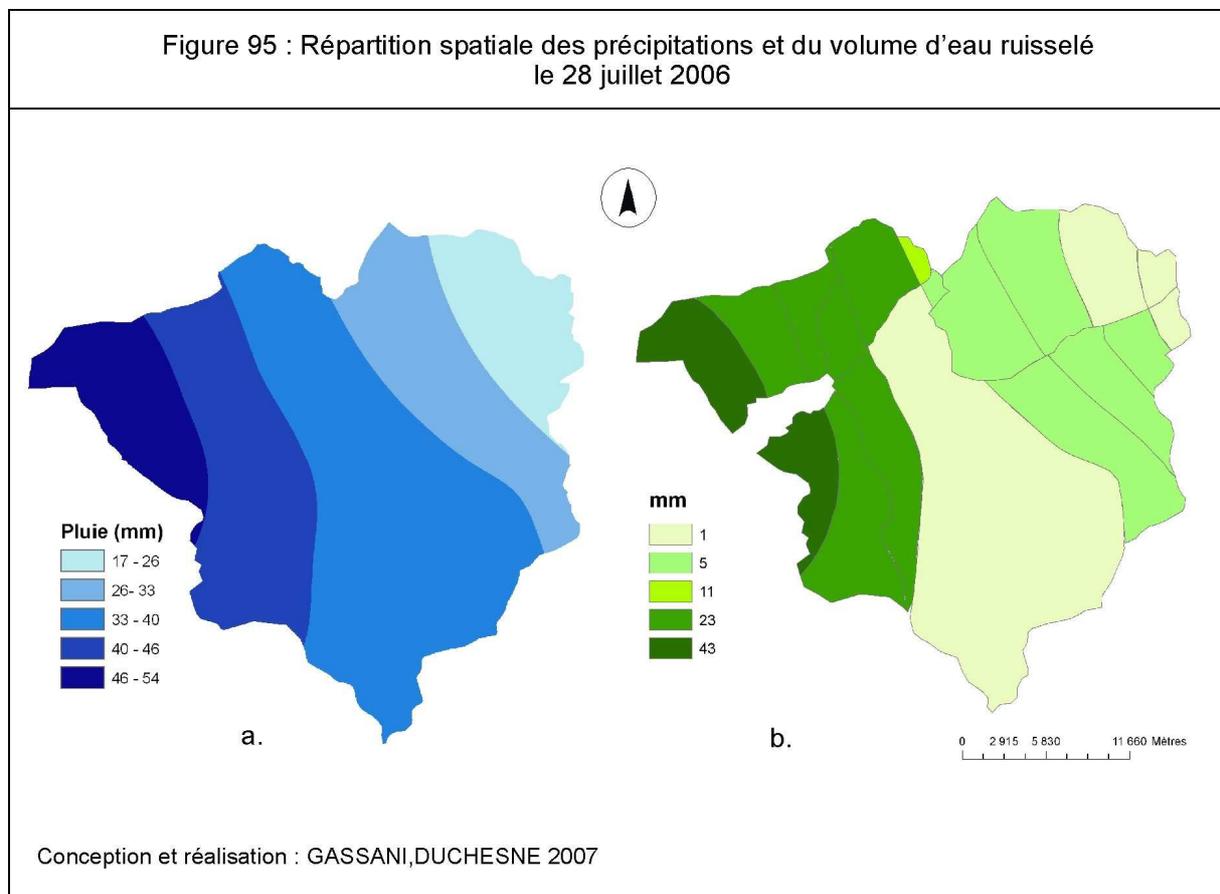
Il est à noter que les zones nord du bassin versant, regroupant les zones de reg et les grands talwegs, comprennent les plus forts volumes d'eau ruisselée bien que la pluviométrie y ait été plus faible qu'au sud, ce qui s'explique par leur forte capacité de ruissellement lors

d'évènements pluvieux supérieurs à 20 mm et au remplissage de leurs dépressions durant l'épisode précédent, qui ne peuvent plus retenir l'eau durant cet épisode.

Le volume d'eau stocké au lac lors de cet épisode est de 2 957 260 m³.

IV.3. Episode pluvieux du 28/07/2006

Le troisième épisode pluvieux de la saison se caractérise par d'importantes précipitations, correspondant à un gradient ouest-est. Ces moyennes vont de 50 mm à proximité du village de Mâle à environ 20 mm vers Lemoudou.



Tout d'abord il est à noter que cet évènement est très proche dans le temps des deux précédents, ce qui entraîne que les dépressions sont quasi pleines.

L'analyse du ruissellement fait apparaître trois types distincts de ruissellement (Fig.95, b) :

- le premier, proche de Mâle et correspondant à une forte représentation de reg, comprend les plus forts volumes ruisselés, avec environ 40 mm aux abords du lac. Ces zones de reg ont une

réponse hydrologique très forte quand ils sont touchés par de forts épisodes pluvieux, comme nous l'avons montré au tableau 13.

- le deuxième type correspond à la partie centrale du bassin versant qui, malgré une moyenne de pluie d'environ 30 mm, est peu touché par le ruissellement : environ 1mm. Cela s'explique par la très forte présence des dunes, environ 85 %, qui ont un très fort coefficient d'infiltration.

- le troisième est en grande majorité la partie reg au nord-est, qui a une réponse hydrologique moyenne puisqu'il est touché par une moyenne de pluie de 30 mm.

Cet évènement pluvieux a donc amené à un volume de $8\,804\,901\text{ m}^3$, ce qui remplit le lac pratiquement à son maximum avec une cote de 69,85 mètres.

IV.4. Comparaison diachronique du remplissage du lac par mesure expérimentale et simulation

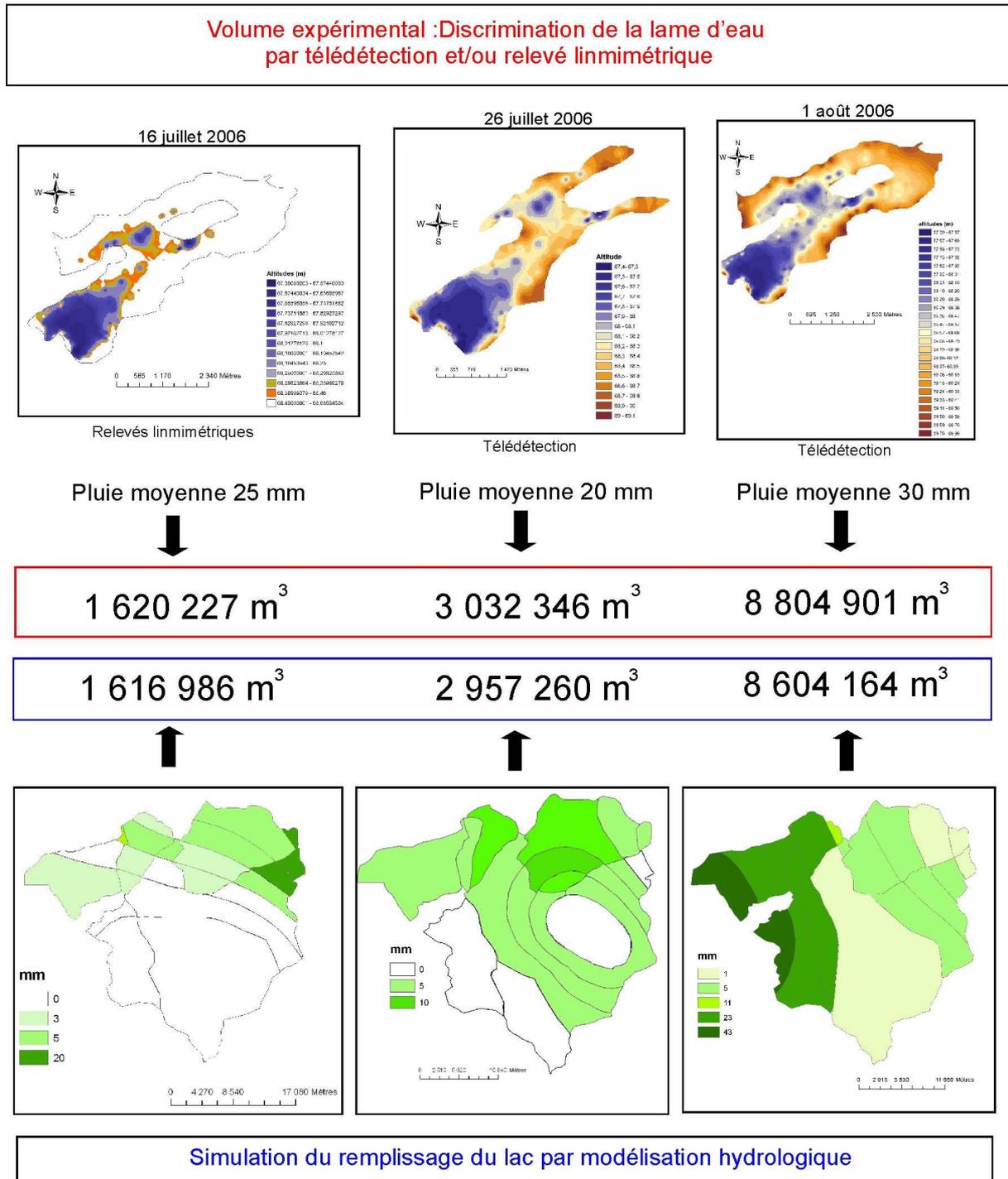
La figure 96 représente une synthèse du volume d'eau ruisselée au lac au début de la saison humide de 2006 par relevé au barrage des hauteurs limnimétriques et par simulation avec notre modèle.

La discrimination par images satellitales (26 juillet et 01 août 2006) ou relevé limnimétrique (17 juillet 2006) montre l'évolution du remplissage du lac durant les trois premiers épisodes pluvieux de la saison. Le 17 juillet, on observe un volume d'eau de $1\,620\,227\text{ m}^3$, obtenue par la hauteur lue au barrage et introduite dans le MNT. Le lac est à ce moment rempli à 10 %. Puis le 26 juillet on observe à nouveau un apport important. La surface en eau a été déduite par discrimination du plan d'eau sur une image Radarsat 1. Le volume ruisselé est cette fois-ci de $3\,032\,346\text{ m}^3$, soit un volume total stocké au lac de $4\,652\,573\text{ m}^3$ et un remplissage de 28 %. Le 1^{er} août on observe un volume d'eau ruisselé de $8\,804\,901\text{ m}^3$ avec un volume d'eau au lac de $13\,457\,474\text{ m}^3$. Le lac est alors rempli à 80 %.

La comparaison avec les simulations à la même date du ruissellement sur le bassin versant nous montre une évaluation des volumes d'eau très proche des valeurs mesurées (Fig 96). Ce résultat est très important puisqu'il permet de valider le modèle de fonction de production mis au point.

Il faut noter que, durant la saison des pluies 2006, il aura suffi de trois épisodes pluvieux, intenses, pour remplir le lac de Mâle.

Figure 96 : Synthèse du remplissage du lac de Mâle durant la saison des pluies 2006



V. Simulation du remplissage du lac par des épisodes fictifs aléatoires (examen du rôle des dépressions)

Nous avons montré comment la modélisation permettait d'améliorer nos connaissances sur le rôle des états de surface dans la réponse hydrologique du bassin versant

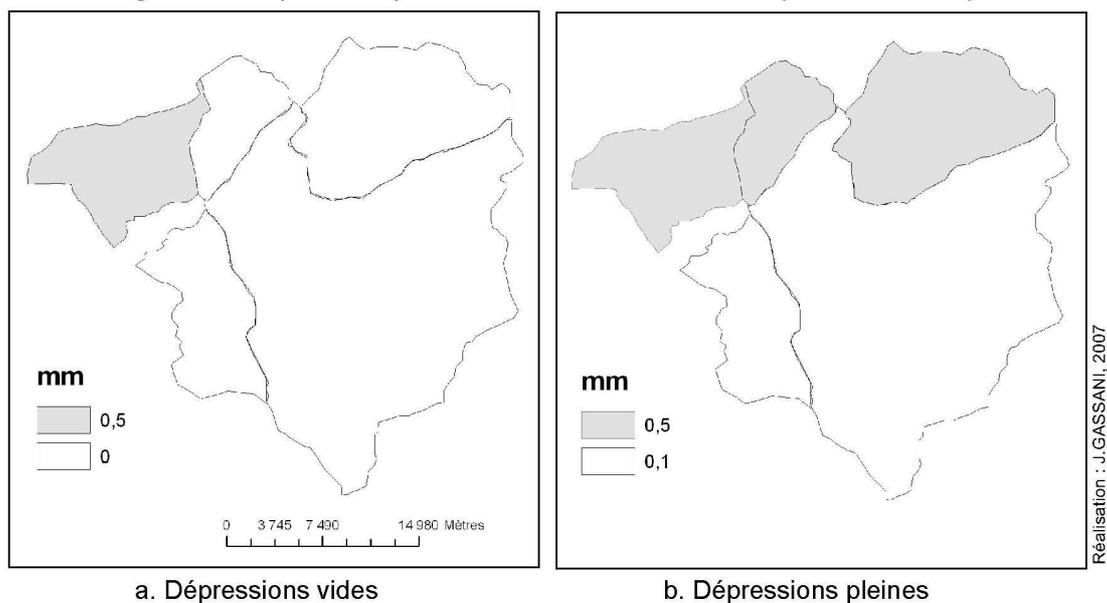
et sur le rôle de stockage des dépressions. Comme les pluies analysées au paragraphe précédent sont toutes d'une intensité moyenne à forte, il est intéressant de montrer la réaction du bassin versant à des pluies plus faibles ou plus fortes. C'est pourquoi nous allons simuler le remplissage du lac pour des pluies de 10, 20, et 40 mm. Pour éviter d'avoir à simuler un grand nombre d'épisodes pluvieux, à chaque simulation nous avons utilisé une pluie homogène. Les hyétogrammes de pluie utilisés sont ceux qui ont été présentés au paragraphe II.1.2 (Fig.81)

V.1. Analyse pour une pluie de 10 mm

Nous avons simulé le ruissellement dans le bassin versant en prenant en compte le rôle de stockage des dépressions sur la figure 97 a, et en considérant dans un second temps que nos dépressions sont remplies et ne jouent aucun rôle de stockage (fig. 97 b).

En analysant la figure a, on observe que le ruissellement est quasi nul, un seul sous-bassin enregistrant une pluie nette de 0,5 mm. On enregistre au total, sur cet épisode pluvieux, un volume d'eau ruisselé au lac de 30 000 m³ (Fig.98), ce qui est dérisoire eu égard au volume maximum de la retenue. Ce sont les zones de bas-fond qui produisent du ruissellement ; les zones de reg ne réagissent pas à ce type de pluie, trop faible en intensité pour produire du ruissellement.

Figure 97 : Répartition spatiale du volume d'eau ruisselé (Pluie de 10 mm)

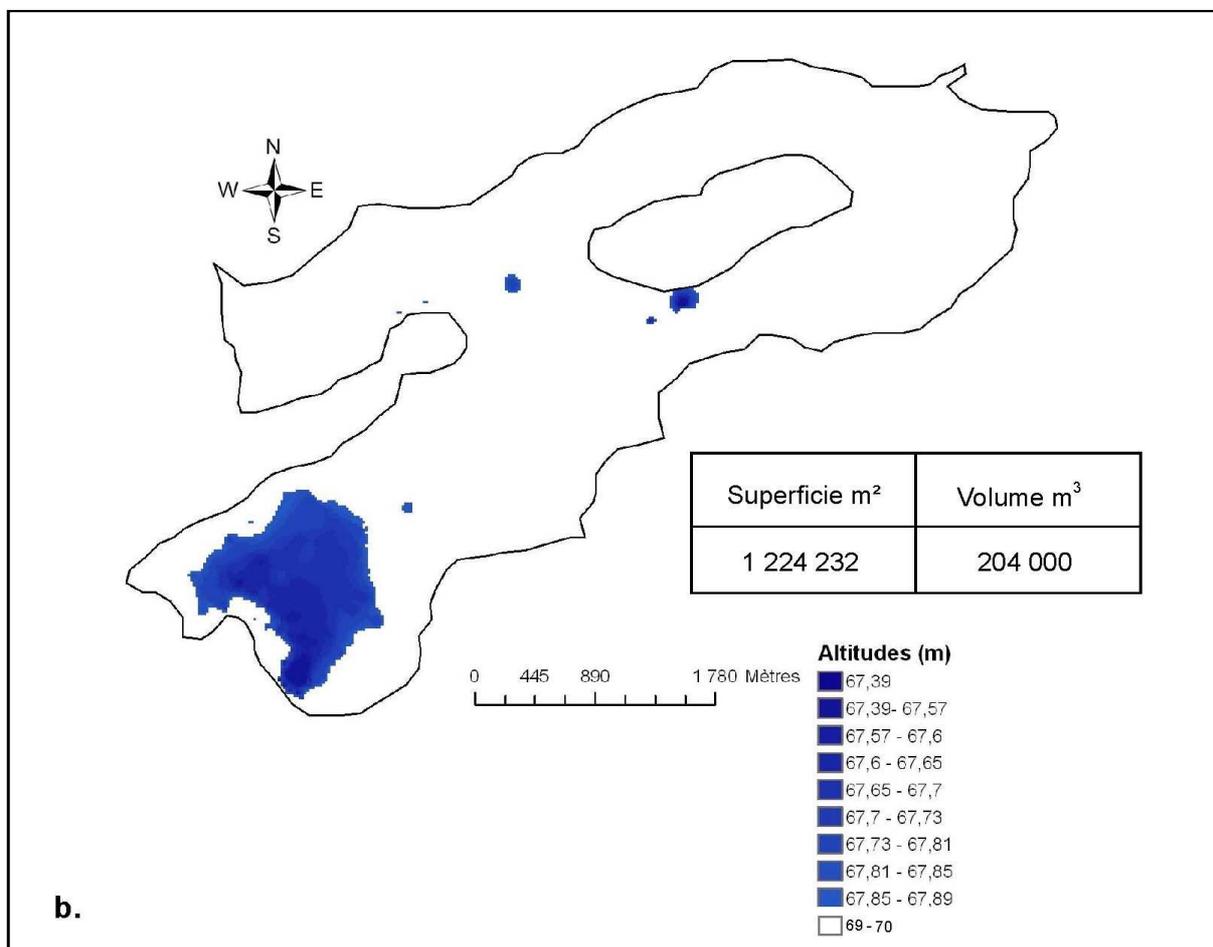
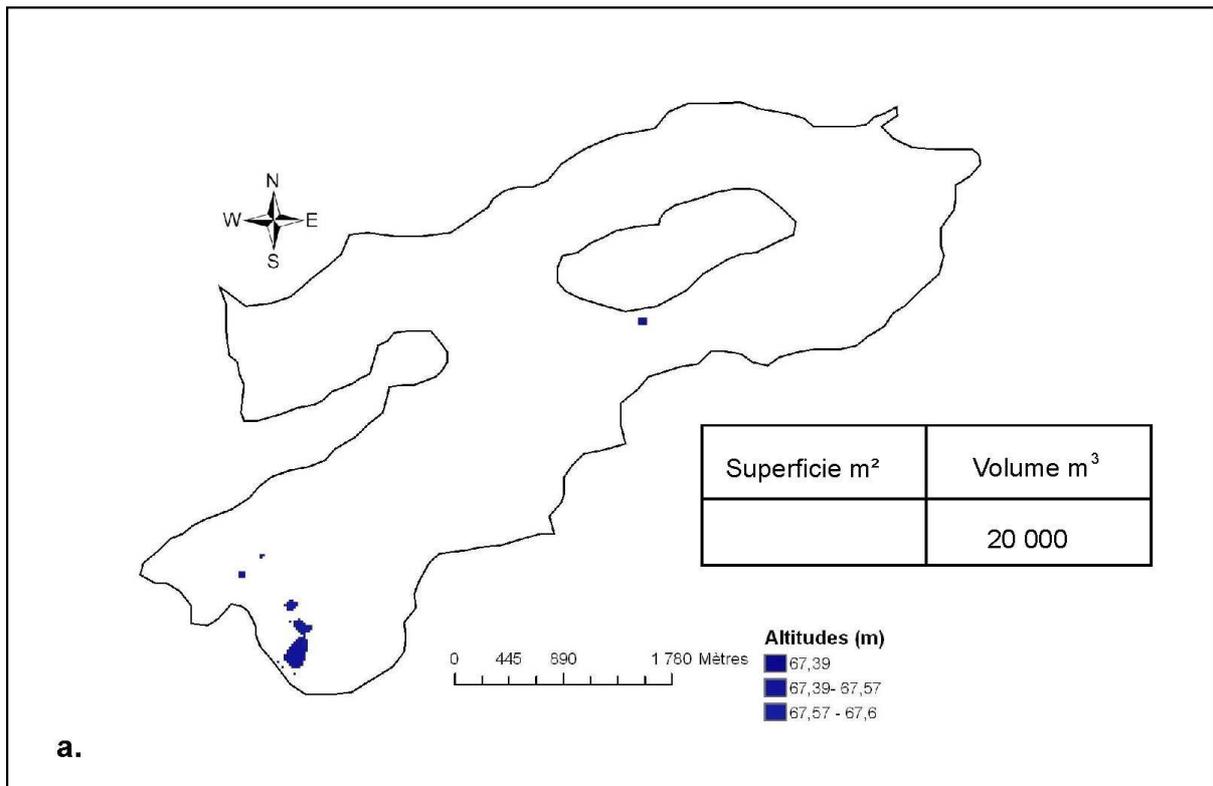


La figure (b) montre le ruissellement sur le bassin versant en émettant l'hypothèse que les dépressions ont été remplies par un évènement pluvieux antérieur. Le ruissellement est

toujours quasiment nul : trois sous-bassins sont touchés par un très faible ruissellement de 0,5 mm. Le volume total d'eau arrivé au lac est maintenant de 204 000 m³ (Fig.98) avec une superficie de 1 224 232 m².

Le stockage par les dépressions sur ce type de pluie joue un rôle majeur.

Figure 98 : Simulation du remplissage du lac de Mâle avec une pluie moyenne de 10 mm
 a. Avec dépressions (tamourts, tachourts) vides sur le bassin versant
 b. Avec dépressions remplies

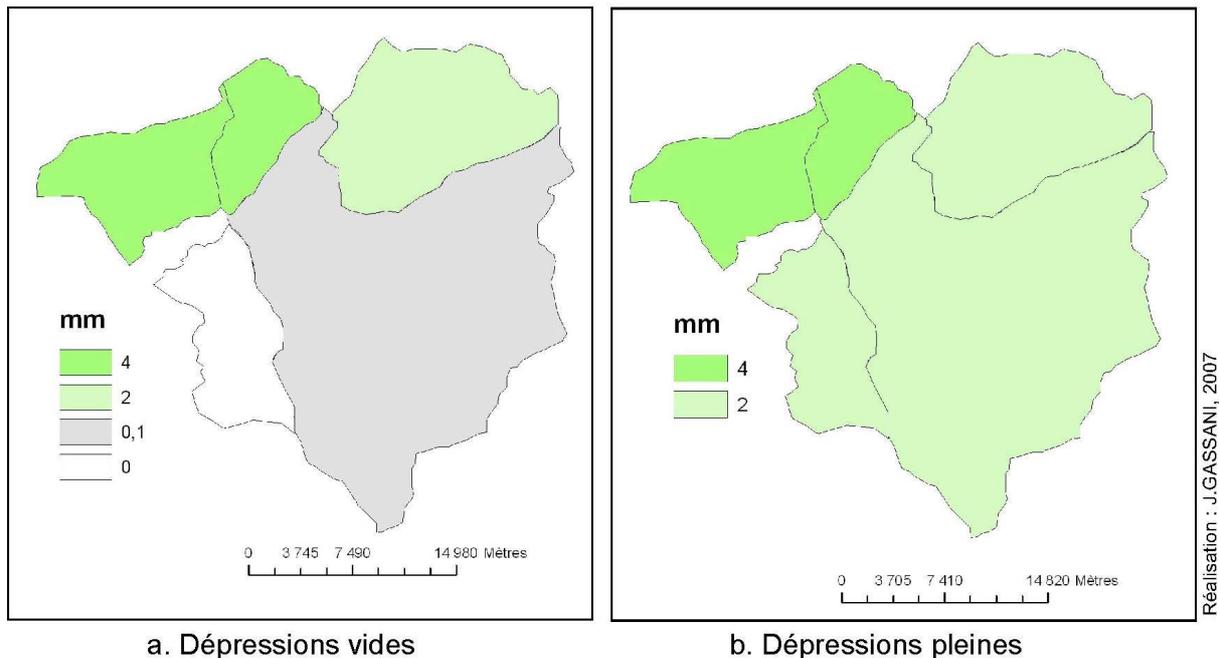


V.2. Analyse pour une pluie de 20 mm

L'analyse d'un évènement pluvieux de 20 mm fait apparaître un ruissellement très hétérogène sur le bassin versant, ce qui traduit bien l'influence des états de surface.

La figure 99, a avec la prise en compte des dépressions, montre au nord-ouest deux sous bassins touchés par une réponse hydrologique de 4 mm. Ces deux zones, composées en majorité de reg avec de très faibles zones de dépressions, commencent donc à réagir à des intensités de cet ordre, avec une production de ruissellement pour les regs d'environ 70 % et pour les oueds de 30 %. La partie sud du bassin a quant à elle des écoulements quasi nuls. Elle est en effet caractérisée par de grandes surfaces dunaires très perméables mais comprend aussi une importante concentration de tamourts.

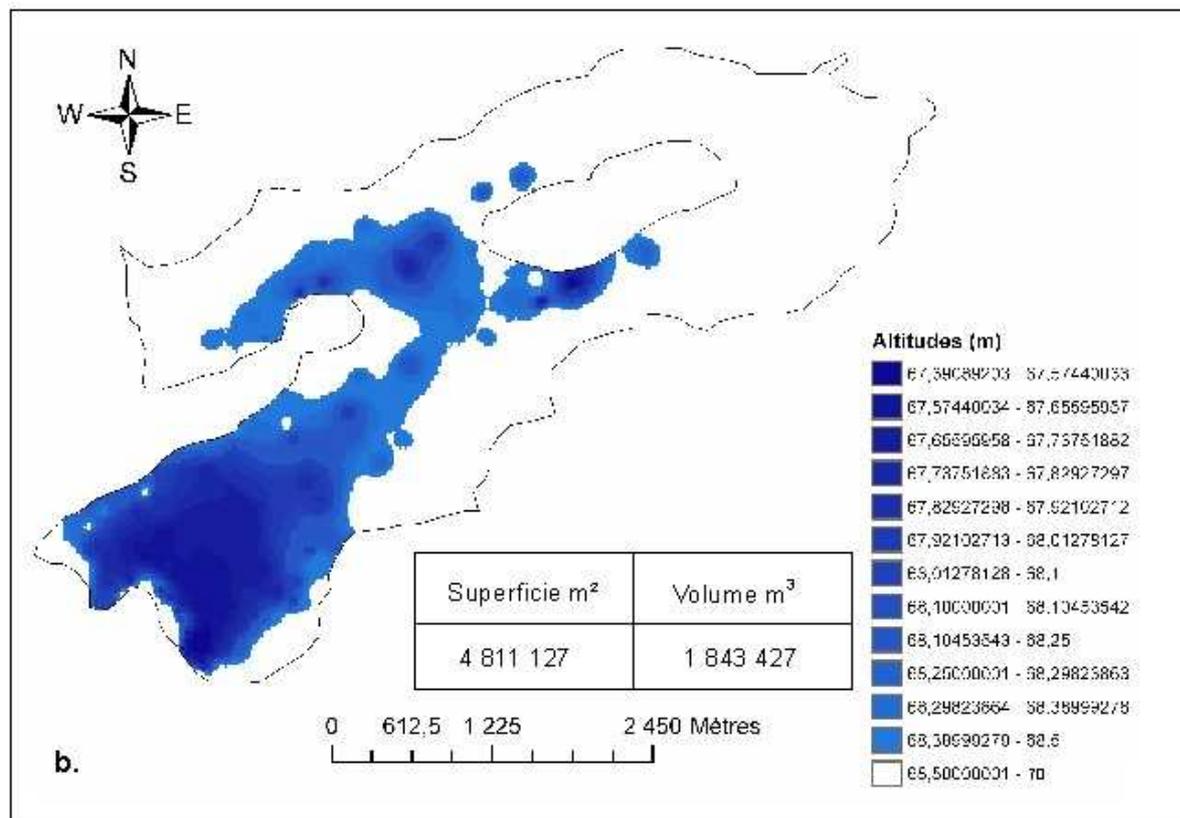
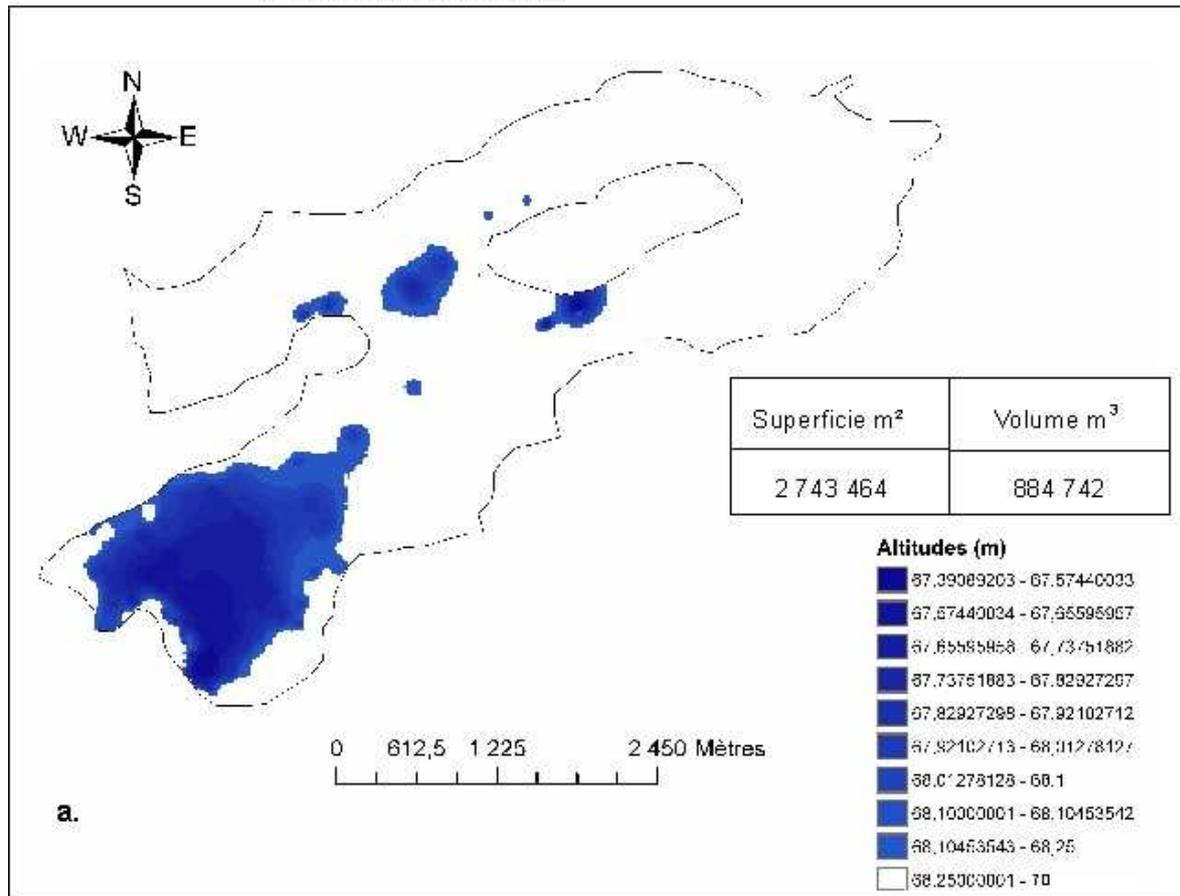
Figure 99 : Répartition spatiale du volume d'eau ruisselé (Pluie de 20 mm)



La figure 99 b, montre la carte des ruissellements et il n'existe aucune rétention par les dépressions. Cette fois tous les sous bassins sont soumis à un ruissellement faible.

La simulation de la pluie avec le remplissage des dépressions fait apparaître une surface d'eau de 2 743 464 m² (Fig.100, a) répartie dans les zones les plus profondes du lac amont à la cote 68,25 mètres. Le volume en eau est de 884 742 m³ et correspond à un remplissage de 5 % du lac.

Figure 100 : Simulation du remplissage du lac de Mâle avec une pluie moyenne de 20 mm
 a. Avec dépressions (tamourts, tachourts) vides sur le bassin versant
 b. Avec dépressions remplies



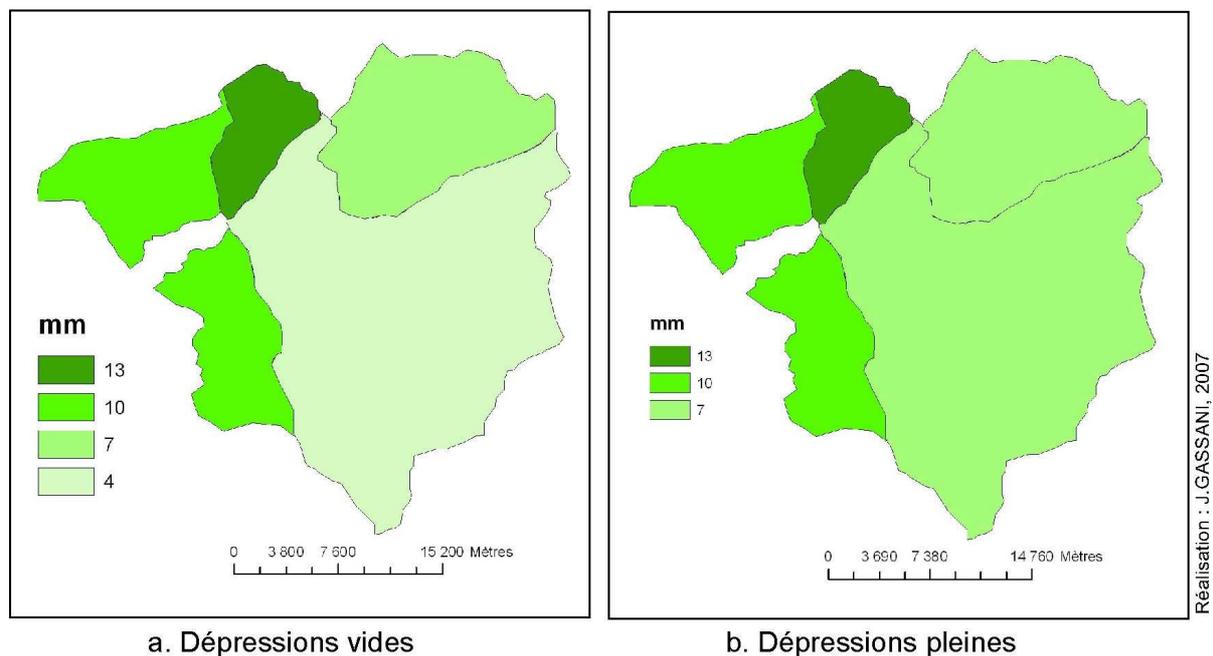
Par contre en analysant le remplissage du lac dans le cas où les dépressions ne sont pas prises en compte (dépressions déjà remplies), la surface en eau a pratiquement doublé à 4 811 127 m² soit un volume de 1 843 427 m³, ce qui correspond à 11 % du remplissage du lac.

On observe une différence de remplissage selon qu'on considère que les dépressions sont déjà remplies ou non. Le ruissellement généré par des pluies de 20 mm est donc très sensible à l'état initial des dépressions.

V.3. Analyse du remplissage pour une pluie de 40 mm

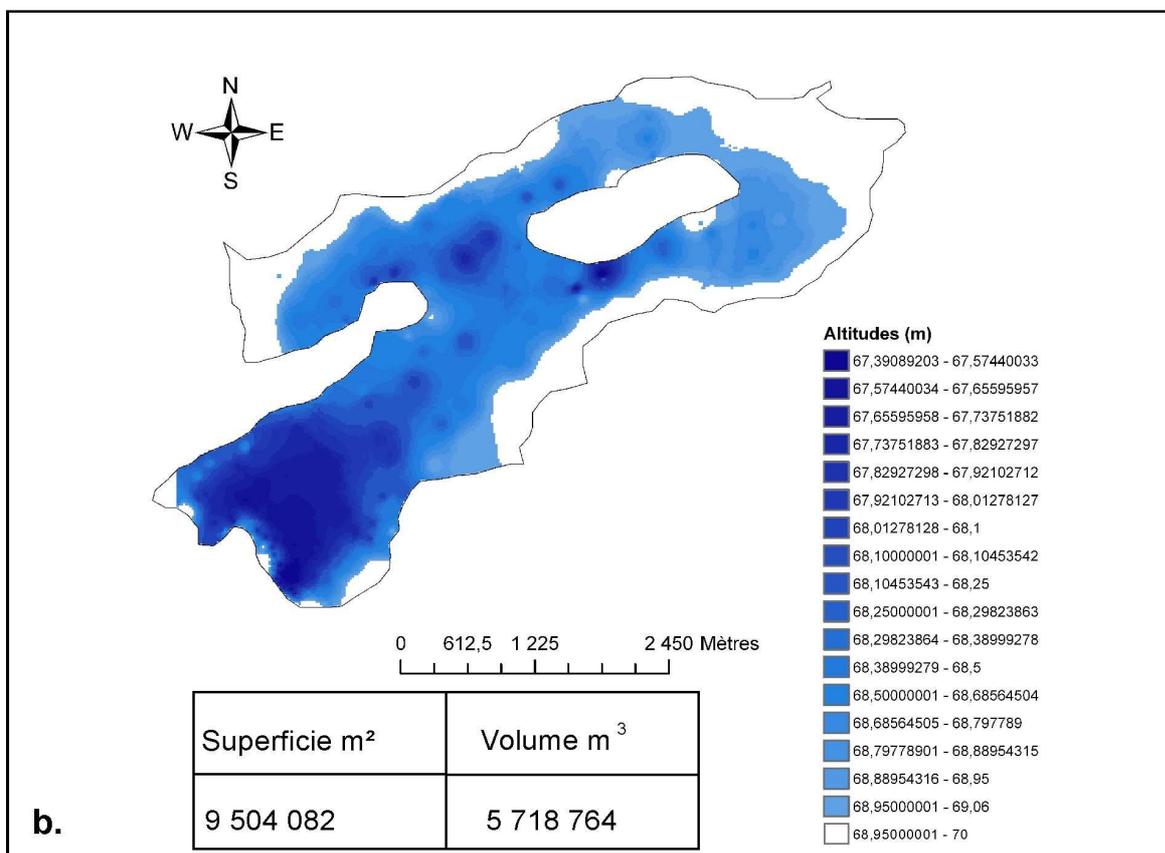
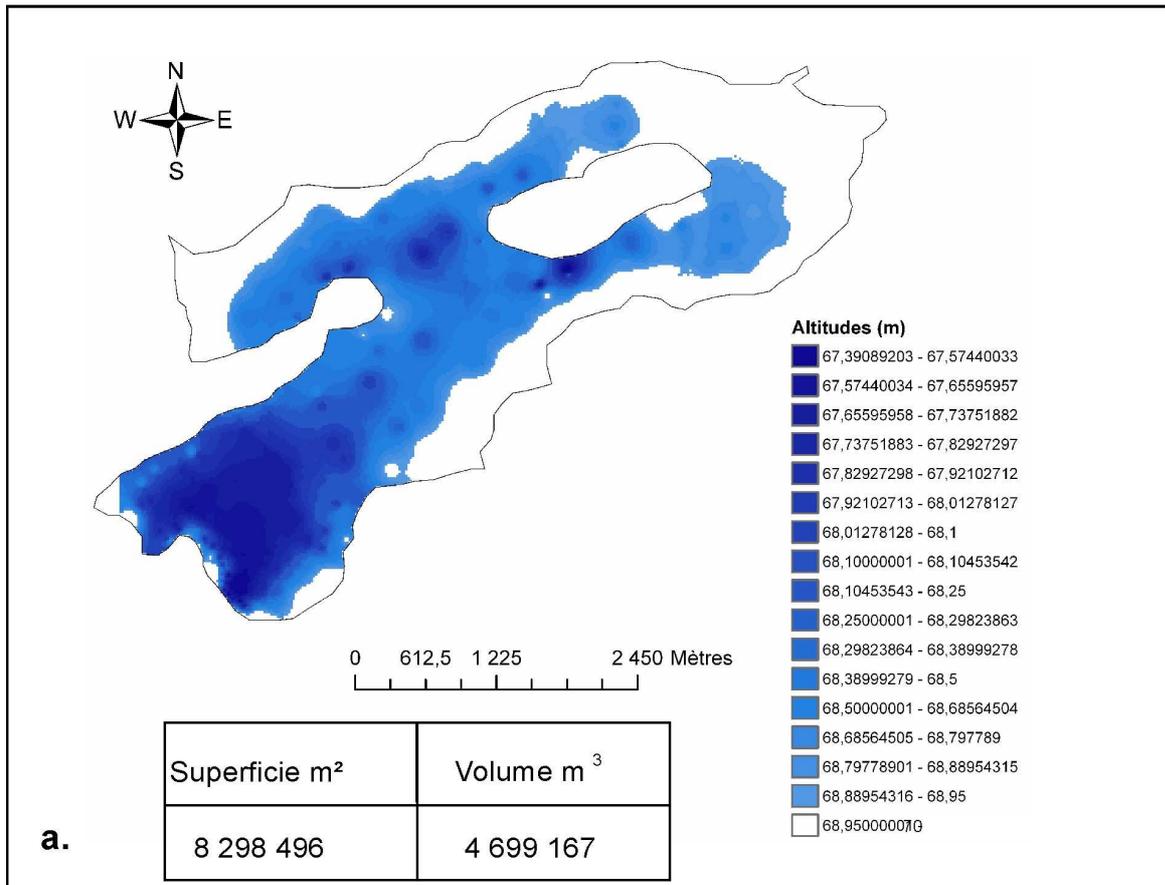
L'observation de la répartition spatiale du ruissellement dans le bassin versant de Mâle fait apparaître, pour les pluies d'environ 40 mm, une forte zone de production située dans l'ouest du bassin. La partie sud-est reste la zone la moins soumise au ruissellement, avec 4 mm.

Figure 101 : Répartition spatiale du volume d'eau ruisselé (Pluie de 40 mm)



En analysant le remplissage de la retenue avec une pluie de 40 mm, on observe un apport important. Avec les dépressions pleines, on enregistre un volume ruisselé de 4 699 167 m³.

Figure 102 : Simulation du remplissage du lac de Mâle avec une pluie moyenne de 40 mm
 a. Avec dépressions (tamourts, tachourts) vides sur le bassin versant
 b. Avec dépressions remplies



Ce dernier passe à 5 718 764 m³ quand les dépressions sont initialement vides, soit une différence de 21%. On vérifie bien que lors des fortes précipitations, la lame ruisselée est moins sensible au rôle de stockage des dépressions. Deux pluies de cette intensité, bien réparties dans le temps, peuvent remplir le lac de Mâle ; nous avons pu l'observer en 2001 où le remplissage du lac s'est effectué uniquement à la suite de deux pluies de l'ordre de 40 mm.

Conclusions partielles :

Le premier groupe de conclusions concerne la méthode de modélisation mise en œuvre pour simuler les débits ruisselés. La fonction de production utilisée a été présentée dans le § 1.2 ; elle est basée sur la spatialisation des pluies et des états de surface, ainsi que sur la répartition des dépressions. Le modèle utilisé étant déterministe, il fait appel à des variables hydrologiques clairement identifiées et mesurables :

- i) la répartition spatiale de l'intensité des pluies ;
- ii) le taux d'infiltration des différents types de sol ;
- iii) la taille et la répartition spatiale des dépressions. Enfin, les volumes ruisselés obtenus par cette modélisation peuvent être comparés aux volumes réellement ruisselés grâce au MNT du lac, à partir duquel nous avons pu établir la relation hauteur-volume de la retenue.

Les résultats du § IV ont montré que, pour tous les épisodes simulés, qui correspondent à une répartition des pluies très variable, les volumes ruisselés simulés étaient, pour les trois épisodes traités, très proches des volumes réels enregistrés. Ils permettent donc une validation indiscutable du modèle.

Le second groupe de conclusions concerne l'analyse du comportement du bassin versant.

Pour l'expliquer, nous avons montré au chapitre IV que le taux de remplissage du lac pouvait être très différent selon les années même avec un total pluviométrique annuel identique. Pour comprendre ce comportement à ce jour inexplicable, nous avons fait une hypothèse majeure sur le rôle de stockage des dépressions de surface, toujours nombreuses et importantes dans les régions sahéliennes, tant dans le lit majeur des oueds (tachourts) que dans l'ensemble du bassin (tamourts). L'excellent accord entre les volumes de ruissellement

observés et les volumes simulés valide également cette hypothèse, qui est largement prise en compte dans le modèle (§ 1.2 et Fig 96). Dans le cas d'épisodes pluvieux de faible intensité, les dépressions jouent un rôle fort de rétention puisque plus de 50 % du volume total ruisselé sur le bassin versant sont stockés pour une pluie de 20 mm. Par contre sur les fortes pluies, supérieures à 40 mm, le rôle de stockage ne joue plus qu'à 20 %. Ces dépressions ont une importante fonction de régulation des ruissellements sur le bassin versant.

La prise en compte des dépressions dans la modélisation hydrologique de ce type de bassin versant devient donc essentielle.

Ce résultat important est une bonne réponse à la proposition de constituer un inventaire des plans d'eau, petits et grands, et suivre leur évolution au cours du temps pour aller vers une gestion rationnelle de l'eau.

Une autre conclusion majeure concerne le rôle considérable de la répartition spatiale des pluies. Il est en effet rare que, dans un système de ligne de grains ou, plus généralement de S.C.M., la pluie soit homogène sur une surface aussi vaste que celle du bassin de Mâle (800 km²). Le modèle de fonction de production mis au point et validé montre donc combien il est important d'avoir pu disposer de 5 pluviomètres enregistreurs pour une telle superficie. L'objection du coût élevé d'un tel équipement peut facilement être contournée grâce au résultat du § 2.12 où nous avons montré que les hyétogrammes de pluie intenses étaient souvent proches d'un modèle théorique, facile à déduire du simple cumul de pluie donné par un pluviomètre totalisateur classique.

Enfin, un résultat plutôt inattendu concerne le comportement du reg. La valeur du taux d'infiltration assez élevé, surtout en début d'épisode ($f_0=0.0017\text{cm.s}^{-1}$) entraîne que, pour des pluies d'intensité modeste, la part infiltrée est loin d'être négligeable (§ 2.3.2.2). Nous avons pu montrer qu'indépendamment du rôle des cuvettes, pour des pluies de l'ordre de 10 mm, aucun ruissellement ne pouvait avoir lieu sur le reg, toute la pluie s'infiltrant. Le tableau 14 montre bien, par contre, que lorsque l'intensité des pluies augmente, le coefficient de ruissellement du reg croît rapidement. Par exemple, pour une pluie de 60 mm tombant sur le reg, le coefficient de ruissellement passe à 62 % ! Seule une modélisation à base physique pouvait rendre compte de ce comportement.

CONCLUSION

Comme nous l'avons dit en introduction, la Mauritanie est l'un des pays de l'Afrique de l'Ouest les moins étudiés au niveau de la modélisation hydrologique. Mais les lacunes en matière de recherche existent dans bien d'autres domaines. Les sciences physiques ou de l'environnement, les sciences humaines et sociales ne semblent en effet pas avoir choisi ce territoire comme champ d'investigation privilégié, même si Théodore Monod au début du XX^{ème} siècle avait embrassé, en chercheur érudit, ces disciplines et produit une grande quantité de connaissances sur la Mauritanie.

Un des principaux attraits de ce pays a donc été le caractère peu étudié de son espace et les perspectives que cela augurait. L'étude de l'évolution des zones humides dans ce milieu d'interface entre fleuve Sénégal et marges sahariennes, soumis à des évolutions climatiques contraignantes pour les hommes et les milieux, a donc constitué notre principal objectif.

Le trait majeur de la ressource en eau en Mauritanie est sa vulnérabilité. Plusieurs facteurs concourent à cette situation,

Dans le bassin versant de Mâle situé en bordure du grand bassin sédimentaire sénégal-mauritanien, il n'existe pas d'aquifère important. Il y a seulement quelques aquifères de fractures qui génèrent un débit de base négligeable pour alimenter les oueds. Dans ces conditions, l'alimentation des écoulements de surface par les pluies et leur stockage à l'amont des barrages sédimentaires naturels mais aussi artificiels (diguettes) se révèle essentiel pour la survie des populations locales.

L'évolution du climat depuis 40 ans s'est traduite dans un premier temps (1969-1992) par une diminution très importante des cumuls pluviométriques annuels. La raréfaction de la ressource en eau est donc très nette. Le réchauffement climatique, mis en évidence par les récents travaux du GIEC, est maintenant reconnu par tous et très perceptible en Afrique sahélienne. Un des aspects du réchauffement climatique sur notre espace d'étude est la diminution de la pluviométrie annuelle. Lorsqu'on étudie l'ensemble de la chronique, trois grandes périodes se détachent : une première période jusqu'aux années 1950 où la pluie est excédentaire mais où la variabilité interannuelle est forte ; une seconde de 1950 à 1969 où les précipitations sont encore excédentaires et la variabilité moins marquée et enfin de 1970 à 2005 où une période d'aridité s'installe et au cours de laquelle la pluviométrie est inférieure de 40 % à celle de la période 1934-1969.

Cette raréfaction de la ressource en eau a eu comme autre conséquence, la sédentarisation massive des éleveurs nomades, ce qui a accentué la pression sur ces milieux. Cette dégradation de ces écosystèmes par cette forte pression anthropique a causé dans l'ouest mauritanien des dégradations du milieu lié à la salinisation des sols (Jiddou, 2005).

Face à cette raréfaction de la ressource et à l'aggravation de sa répartition temporelle, et en vue de gérer au mieux les eaux de ruissellement, il était essentiel d'affiner nos connaissances sur la dynamique hydrologique de ces eaux de surface, en analysant la répartition et le fonctionnement des tamourts et tachourts. La modélisation est apparue comme un outil de caractérisation précieux du fonctionnement hydrologique du bassin versant de Mâle.

Les résultats auxquels elle nous a conduit sont originaux à plusieurs titres.

Nous avons d'abord mis en évidence le rôle majeur des dépressions dans le stockage des eaux de surface, alors que la bibliographie montre clairement que les travaux antérieurs sur ce sujet sont peu abondants. En utilisant un modèle déterministe, nous avons abouti à une compréhension des phénomènes physiques d'infiltration, de stockage en surface ou de ruissellement. Notre présence sur le terrain pendant deux saisons des pluies (2005 et 2006) nous a ensuite permis de valider par l'observation directe nos hypothèses de départ sur le rôle de rétention des dépressions.

La création d'un Modèle Numérique de Terrain des tachourts a permis de détailler les caractéristiques morphologiques de ces formes qui semblent typiques de cette partie du Sahel. Nous avons pu ainsi évaluer la micro-topographie de ces dépressions naturelles et en apprécier le volume de stockage, que nous avons ensuite pris en compte dans la modélisation hydrologique.

Le deuxième apport important de cette thèse concerne l'évolution de la pluviométrie. Il a été abondamment démontré que le réchauffement climatique s'était traduit dans le Sahel par une diminution importante du nombre de jours de pluie et du cumul annuel de pluie. Nous montrons en outre qu'il y a par contre une stabilisation des pluies extrêmes. On peut même penser, si on suit les conclusions des travaux du GIEC, que l'intensité de ces dernières devrait encore augmenter à l'avenir.

L'utilisation de l'imagerie radar est un autre apport de ce travail puisque nous avons montré que la télédétection active était un outil précieux pour la caractérisation et la compréhension de la dynamique des états de surface.

Il existe sur la zone de Mâle quatre ensembles géomorphologiques : les bas-fonds, les regs ainsi que les dunes vives et les dunes pédogénéisées.

L'imagerie radar permet également d'examiner la cohérence de ces ensembles, c'est-à-dire de repérer les zones stables et les zones non stables. Il serait intéressant d'appliquer cette méthodologie à l'ensemble du milieu sahélien afin de suivre les évolutions des différents types d'états de surface (humidité, rugosité et géométrie). Cela permettrait également de suivre l'évolution de la croissance de végétation.

La modélisation hydrologique, autre apport essentiel de notre travail, utilise de nombreux éléments détaillés dans les chapitres concernant la climatologie et les états de surface. Il est essentiel d'identifier les processus hydrologiques (pluies et ruissellement) et leurs parts respectives dans la réponse du bassin versant aux épisodes pluvieux, et donc dans les modalités de passage de l'impulsion pluviométrique à la réponse hydrologique. Pour ce faire, nous avons utilisé un modèle comprenant uniquement une fonction de production, c'est-à-dire que nous ne nous sommes intéressés qu'au volume ruisselé sur le bassin versant. Cette fonction de production est souple d'utilisation, et il est possible de l'appliquer, une fois les variables identifiées, à n'importe quelle partie du bassin versant. Cette souplesse d'utilisation résulte de son caractère déterministe : aucun calage en effet n'est requis ; il faut par contre que les variables soient bien identifiées et mesurées. On retrouve ici le gros avantage d'un modèle déterministe et son principal inconvénient. L'avantage est son application facile à n'importe quel bassin ou sous-bassin sans calage ; il ne requiert donc ni de longues séries de mesure antérieures à son utilisation ni de séparation entre jeu de données de calage et jeu de validation. L'inconvénient est qu'il faut avoir bien caractérisé les variables pertinentes sur le bassin ; ici, ce sont les états de surface, l'infiltrabilité, la micro-topographie.

Pour vérifier l'hypothèse de départ, nous avons donc calculé par modélisation le volume d'eau expérimental (c'est-à-dire le volume d'eau effectivement stocké) et le volume d'eau simulé.

Le SIG nous a permis de mettre au point notre modèle de simulation qui se base sur l'utilisation simultanée de quatre types d'information sur le bassin versant : les types d'états de surface, leur capacité d'infiltration, la distribution spatiale et le volume des dépressions,

ainsi que la distribution spatiale des isohyètes. La simulation permet de mettre en évidence le corollaire de l'hétérogénéité de la pluviométrie : l'hétérogénéité du ruissellement.

Les volumes d'eau ruisselés obtenus à partir des enregistrements au lac de Mâle sont en parfaite adéquation avec les volumes d'eau calculés au moyen de la modélisation hydrologique. La validation de notre modèle est donc probante.

Après avoir validé le modèle, nous avons examiné le rôle des dépressions naturelles ou anthropiques sur le bassin versant. Dans le cas de pluies faibles, le rôle des dépressions est déterminant puisqu'elles collectent l'ensemble du volume d'eau ruisselé et qu'elles privent ainsi le lac de l'eau ruisselée. Les dépressions naturelles ou anthropiques (tamourts, tachourts et retenues derrière diguettes) ont donc un rôle central dans le fonctionnement hydrologique du bassin versant et dans le remplissage du lac.

Différents travaux semblent indiquer que le changement climatique engendre une diminution des ressources en eau en milieu nord sahélien. A notre sens cette question n'est pas tranchée à l'heure actuelle notamment en ce qui concerne les stockages d'eaux de surface. S'il y a effectivement diminution du nombre de jours de pluie, nous avons montré qu'il y avait stabilisation des pluies extrêmes et même sans doute un risque d'aggravation de leur intensité selon le GIEC (2007). La création de notre modèle hydrologique nous a permis de constater que, d'après les caractéristiques géomorphologiques des bassins versants du Sud-Ouest mauritanien, ce sont ces pluies extrêmes qui permettent un remplissage optimum des lacs de stockage (Aleg, Mâle,...). Les pluies peu abondantes ne permettent pas en revanche ce remplissage optimum, le ruissellement étant infiltré et/ou stocké en amont par les dépressions.

Un des intérêts principaux de ce modèle est qu'il est facilement reproductible avec un logiciel de SIG et une matrice Excel hébergeant les différents types de données de base. Les ingénieurs agronomes du Ministère de l'Environnement et du développement rural de la République Islamique de Mauritanie pourraient utiliser cette méthode pour évaluer les ressources en eau disponibles sur les différents bassins versants du pays et affiner la compréhension des dynamiques hydrologiques. La méthode pourrait certainement être étendue aussi aux autres pays du Sahel. L'estimation précise des ressources hydrauliques et de leur dynamique devrait permettre la mise en place de programmes de rationalisation de l'agriculture et déboucher sur une amélioration des conditions d'existence d'une population locale en croissance.

En ce qui concerne le Sud mauritanien, il est possible d'améliorer la pertinence du modèle dans l'avenir, en affinant la caractérisation topographique des tamourts pour mieux suivre le volume d'eau stocké par les dépressions lors de chaque épisode pluvieux. En outre, sur des bassins versants plus hétérogènes que celui de Mâle ou plus étendus, il serait nécessaire de réaliser davantage de mesures d'infiltration.

Cette étude, qui a permis de mettre en évidence le rôle majeur des dépressions dans le remplissage des retenues d'eau, est facilement transposable à d'autres régions comme on l'a dit mais aussi certainement à d'autres problématiques comme la modélisation de la pollution par les nitrates ou les pesticides. Nous espérons que les résultats que nous avons obtenus, favoriseront le développement d'autres études qui permettront d'améliorer la gestion de la ressource en eau de surface en domaine sahélien.

BIBLIOGRAPHIE

.....

ADEFOTALU D.O, 1986. Rainfall Trends in Nigeria. *Theoretical and Applied Climatology*, 37: 205-219..

AGNEW C-T, CHAPPELL A, 1999. Drought in the Sahel, *Geojournal*, n°48, p. 299-311.

ALBERGEL J., CHEVALLIER P., LORTIC B - 1987- D'Oursi à Gargara : transposition d'un modèle de ruissellement dans le sahel (Burkina Faso). *Hydrologie Continentale*, vol.2 (2), p. 77-86

ALI A, AMANI A, LEBEL T, 2004. Estimation des pluies au Sahel : utilisation d'un modèle d'erreur pour évaluer réseaux sol et produits satellitaires, *Sécheresse*, vol. 15, n°3, p. 271-278.

ALPERT P, BEN-GAI T, BAHARAD A, BENJAMINI Y, YEKUTIELI D, COLACINO M, DIODATO L, RAMIS C, HOMAR V, ROMERO R, MICHAELIDES S. AND MANES A, 2002 The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values, *Geophysical Research Letters*, 29, 11, 31-1 - 31-4.

ALSDORF D, et al, 2000. Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon flood plain. *Nature*, 404, 174-177.

ALBERGEL J, CHEVALLIER P, LORTIC B, 1987. D'Oursi à Gargara : transposition d'un modèle de ruissellement dans le Sahel (Burkina Faso). *Hydrologie Continentale*, vol. 2, p 77-86.

ARCHAMBAULT J, 1951. Nappes de grès bigarrés de l'Ouest mauritanien. *Rapport BURGEAP* (Paris).

BAMBANG S-P, 1989. Apports de la télédétection à la conception de modèles de simulation en hydrologie *Ph.D. Thesis*. Lausanne : EPFL, 1989, 252 p.

BARBEY C, 1989. *Les ergs de la Mauritanie du sud-ouest et du nord du Sénégal*. Thèse d'état, Paris VII, 454p.

BÄRRING L, HULME M, 1991. Filters and Approximate Confidence Intervals for Interpreting Rainfall Anomaly indices, *Journal of climate*, vol. 4, p. 837-847.

BEAUDET, G., MICHEL, P., NAHON, D., OLIVA, P., RISER, J. AND RUELLAN, A. 1976. Formes, formations superficielles et variations climatiques récentes du Sahara occidental, *Revue de Géographie physique et Géologie dynamique*, 18 (2-3), 157-174.

BETSON R, 1964. What is watershed runoff ?, *Journal of Geophysical research*, vol 69, n°8.

BIELEC, Z., 2001. Long-term variability of thunderstorms and thunderstorm precipitation occurrence in Cracow, Poland in the period 1860–1995. *Atmos. Res.* 56, 161–170.

- BLYTH K, FLOODNET, 1997. A telenetwork for acquisition, processing and dissemination of earth observation data for monitoring and emergency management of floods. *Hydrological Processes*, vol. 11, p. 1359-1375.
- BODART C, GASSANI J, MARC S, OZER A, 2006. Contribution of sar interferometry (from ERS1/2) in the study of aeolian transport processes: the cases of Niger, Mauritania and Morocco, in *Actes du colloque "FRINGE" European Spatial Agency*, 6 p.
- BOIVIN P, 1990. Caractérisation de l'infiltrabilité d'un sol par la méthode Muntz : variabilité de la mesure, *Bulletin – Réseau Erosion (IRD)*, p. 14-24.
- BONN (F.), ROCHON (G.) - 1992 - *Précis de télédétection*, Vol. n°1 : Principes et méthodes, Québec, PUQ/AUPELF, 477 p.
- BOURGEAU-CHAVEZ L, KASISCHKE E, and SMITH K, 1996. Using satellite radar imagery to monitor flood conditions in wetland ecosystems of southern Florida. *Proceedings of The European Symposium on Satellite Remote Sensing III*, 23–26 Sept 1996, Taormina, Italy.
- BOURGEAU-CHAVEZ, L., KASISCHKE E [et al], 2000. Analysis of spaceborne SAR data for wetland mapping and flood monitoring in Virginia riparian ecosystems. *International Journal of Remote Sensing*, vol 22, p. 3665–3687.
- BOURGEAU-CHAVEZ L, SMITH K.B [et al], 2005. Remote monitoring of regional inundation patterns and hydroperiod in the greater everglades using synthetic aperture radar. *Wetlands*, vol. 25, p.176-191.
- BRUNETTI, B.M., BUFFONI, L., MAUGERI, M. AND NANNI, T., 2000. Precipitation intensity trends in northern Italy, *International Journal of Climatology* 20 1017-1031.
- BRUNETTI, M., MAUGERI, M. AND NANNI, T., 2001. Changes in total precipitation, rainy days and extreme events in northeastern Italy, *International Journal of Climatology* 21 861-871.
- CARBONNEL J.P, HUBERT P, 1985. Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'Ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 301, série II : 941-944.
- CARUBA R, DARS R, 1991. *Géologie de la Mauritanie*, Nice, CRDP, 321 p.
- CASENAVE A, VALENTIN C, 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration, Paris, *Editions de l'O. R. S. T. O. M.*, 211 p.
- CHAPPELL A, AGNEW C. T, 2004. Modelling climate change in West African Sahel rainfall (1931-90) as an artifact of changing station locations, *International Journal of Climatology*, vol. 24, p. 547-554.
- CHEVALLIER P, 1982. Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi, Haute Volta). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol XIX, n°4, p. 253-297.

- CENTRE DE TÉLÉDÉTECTION FAO, 1991. Principes d'imagerie radar, Rome, *FAO*, 80 p.
- CHEVALLIER P., CLAUDE J., POUYAUD B., BERNARD A., 1985. Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi, Burkina Faso (1976-1981). Paris, *ORSTOM*, n°190, 251 p.
- CHEVALLIER P. – 1985 – Analyse et modélisation du ruissellement en région sahélienne (Mare d'Oursi – Burkina Faso). Mémoire pour la société hydrotechnique de France, *ORSTOM*, Adiopodoumé, 73 p.
- CHOW V.T, 1964. Handbook of Applied Hydrology – A compendium of Water- Ressources Technology. *Mc Graw-Hill*, New York. United States. 1418p.
- CLAUDE J, GROUZIS M, MILLEVILLE P, 1991. Un espace sahélien. La mare d'Oursi. Burkina Faso, Gap, *Editions de l'ORSTOM*, 241 p.
- CLAUDE J., BERNARD A., LOINTIER M, 1981. Etude hydrologique de sept bassins versants alimentant la Mare d'Oursi, année 1980. *ORSTOM*, Ouagadougou, 97 p.
- COMITAS, 1988. Glossaire des termes officiels de la Télédétection aérospatiale in *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 112, 63 pages
- COMITÉ INTERAFRICAIN D'ÉTUDES HYDRAULIQUES, 1990. Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965, Paris, Editions de *l'O. R. S. T. O. M*, 314 p.
- COMITÉ INTERAFRICAIN D'ÉTUDES HYDRAULIQUES, 1990. Précipitations journalières de 1966 à 1980, Paris, Editions de *l'O. R. S. T. O. M*, 177 p.
- COUREL M-F, 1984. Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. *Thèses d'état*, Université de Paris I, 407p.
- DACOSTA, H, KANDIA, K-Y, 2002. La variabilité spatio-temporelle des précipitations au Sénégal depuis un siècle. *IAHS Publ.*, 274, 499–506.
- DAI A, LAMB P. J, TRENBERTH K. E [et al.], 2004. The recent Sahel drought is real, *International Journal of Climatology*, vol. 24, p. 1323-1331.
- DELAHAYE D, 2002. Apport de l'analyse spatiale en géomorphologie. Modélisation et approche multiscalaire des risques. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches sous la direction d'Y. Guermond, Université de Rouen, vol 1, 259 p.
- DEMARÉE G. R, 1990. An Indication of Climatic Change as Seen from the Rainfall Data of a Mauritanian Station, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 42, p. 139-147.
- DESCONNET J.-C, GALLE S, LEDUC and PEUGEOT C, 1996. Les processus de redistribution des eaux en région sahélienne : l'hydrologie dans l'expérience Hapex-Sahel, P. Chevallier and B. Pouyaud (Editors), *Tropical Hydrology : geoscience and tool for sustainability*. Miscellaneous to the memory of J. Rodier. *IAHS Publ.*, p. 125-137.

DIELLO, P., MAHE, G., PATUREL, J.E., DEZETTER, A., DELCLAUX, F., SERVAT, E., OUATTARA, F., , 2005. Relationship between rainfall and vegetation indexes in Burkina Faso: a case study of the Nakambe basin. , *Hydrological Sciences Journal*, 50, 207-221.

DUCHESNE J., GASSANI J., OZER P., 2006. From the micro-topography organisation to runoff modelling and to water reservoir management, International Symposium on Drylands Ecology and Human Security (ISDEHS), Dubai, December 4-7, 2006.

EASTERLING, D.R., J.L. EVANS, P.YA. GROISMAN, T.R. KARL, K.E. KUNKEL, AND P. AMBENJE, 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3), 417-425 (March 2000).

ELGHADI A, BALLOUCHE A, 2004. Temps perturbé d'hiver et sécheresse sahélienne : l'exemple d'une station mauritanienne (Aleg, Brakna), *Norois*, n°191, p. 111-119.

FOFANA M.L, TOURE A.A, 1994. Quelques aspects du changement climatique du Mali. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 7 : 318-322.

FUSTEC E, LEFEUVRE JC, 2000. *Fonctions et valeurs des zones humides*, Paris, Dunod, 426 p.

GASSANI J, 2003. *La dynamique de la végétation associée au lac d'Aleg (Brakna, Mauritanie) par télédétection satellitaire et aérienne*, Mémoire de maîtrise sous la direction TAÏBI A-N, Université d'Angers, 103 p.

GASSANI J, 2004. *Apport de la télédétection à l'analyse et à la gestion des risques naturels sur la zone du lac d'Aleg (Brakna, Mauritanie)*, Master Dissertation, sous la direction de OZER A, Université de Liège, 80 p.

GASSANI J, 2004. *Etude statistique des précipitations de la zone du lac d'Aleg (Brakna, Mauritanie)*, Rapport d'étude, Université de Liège, 10 p.

GIRARD M-C, GIRARD C, 2000. *Traitement des données de télédétection*, Paris, Dunod, 529 p.

GLEMIN E, ROYER R, 2002. Du diagnostic à la gestion durable des ressources naturelles d'une zone humide en milieu sahélien, le cas du lac d'Aleg (Brakna, Mauritanie). Mémoire de maîtrise de géographie. Université d'Angers, 147p.

GROISMAN, P.YA., R.W. KNIGHT, AND T.R. KARL, 2001: Heavy precipitation and high streamflow in the contiguous United States: trends in the 20th century. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 219-246.

GROTEN S, 1993. NDVI-crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso. *International Journal of Remote Sensing*, 14 : 1495-1515.

GUYOT G, 1989. Signatures spectrales des surfaces naturelles. *Collection télédétection N°5*, 178 p.

HAIDER, S. S., S. SAID, U. C. KOTHYARI and M. K. ARORA, (2004), Soil moisture estimation using ERS 2 SAR data: a case study in the Solani River catchment, *Hydrological Sciences–Journal*, p. 49.

HAYLOCK, M.R., T.C. PETERSON, L.M. ALVES, T. AMBRIZZI, Y.M.T. ANUNCIÇÃO, J. BAEZ, V.R. BARROS, M.A. BERLATO, M. BIDEGAIN, G. CORONEL, V. CORRADI, V.J. GARCIA, A.M. GRIMM, D. KAROLY, J.A. MARENGO, M.B. MARINO, D.F. MONCUNILL, D. NECHET, J. QUINTANA, E. REBELLO, M. RUSTICUCCI, J.L. SANTOS, I. TREBEJO, AND L.A. VINCENT, 2006: Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. *Journal of climate*, 19, 1490-1512.

HORTON R, 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *EOS trans A.G.U.*, 14: 446-460.

HOUNTONDJI Y.C., SOKPON N. & OZER P., 2006. Analysis of the vegetation trends using low resolution remote sensing data in the Sahel (1982-1999) for the monitoring of desertification. In : Proceedings of the 1st International Conference on Remote Sensing and Geoinformation Processing in the Assessment and Monitoring of Land Degradation and Desertification. (RODER A. & HILL J., eds.). *Remote Sensing Department, University of Trier, Germany*, pp. 167-174.

HOUNTONDJI Y.-C, SOKPON N, OZER P, 2006. Analysis of the vegetation trends using low resolution remote sensing data in Burkina Faso (1982-1999) for the monitoring of desertification. *International journal of remote sensing*, vol. 27, n°5-6, pp. 871-884

HOUNTONDJI, Y.-C., OZER, P., 2007, Trends in extreme rainfall events in Benin (West Africa), 1960-2000. *Hydrological Sciences Journal*, à paraître.

HUFF F, 1967. Time distribution of rainfall in heavy storm. *Water resource*: 3,4, p.1007-1019

HULME, M. 2001. Climatic perspectives on Sahelian desiccation: 1973-1998, *Global Environmental Change*, 11, 19-29.

HUNAUULT S, 2001. De la ressource en eau à sa gestion dans le cadre d'une zone humide en milieu sahélien. Le cas du lac de Mâle (Brakna, Mauritanie). Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université d'Angers.128 p.

IMHOFF M.L., VERMILLON C [et al.], 1987. Monsoon Flood Boundary Delineation and Damage Assessment Using Space Borne Imaging Radar and Landsat Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53, p. 405-413

IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 p.

- JOANNES, H, PARNOT, RANTUA, F, ET SOW, N.A. 1986. Possibilité d'utilisation de la télédétection dans le domaine de l'eau en Afrique . *CRTO - CIEH Ouagadougou*, Série hydrologie. 141p
- JONES P.D, HULME M, 1996. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: Methods and illustrations. *International Journal of Climatology*, 16 :361-377
- JOUVE P, CORBIER-BARTHAUX C, CORNET A, 2002. Lutte contre la désertification dans les projets de développement. Un regard scientifique sur l'expérience de l'AFD en Afrique sub-saharienne et au Maghreb, Montpellier, *CSFD, AFD*, 162 p.
- KARTIWA B, 2004. Modélisation du fonctionnement hydrologique des bassins versants : application sur des bassins versants de Java et Sumatra (Indonésie), Thèse de Doctorat sous la direction de Jean DUCHESNE, Université d'Angers, 197 p.
- KASISCHKE E, BOURGEOU-CHAVEZ L, 1997. Monitoring South Florida wetlands using ERS-1 SAR imagery. *Photogrammetric Engineering And Remote Sensing*, vol. 63(3), p. 281-291.
- KASISCHKE E, et al., 2003. Effects of seasonal hydrologic patterns in south Florida wetlands on radar backscatter measured from ERS-2 SAR imagery. *Remote Sensing Of Environment*, vol 88(4), p. 423-441.
- KIAGE L.M, WALKER N.D [et al.], 2005. Applications of Radarsat-1 synthetic aperture radar imagery to assess hurricane-related flooding of coastal Louisiana. *International Journal of Remote Sensing*, vol 26, p. 5359-5380.
- KOHLER, M.A., AND R.K. LINSLEY. 1951. Predicting runoff from storm rainfall. U.S. Weather Bureau, Res.Paper No. 34.
- KUNKEL, K.E., D.R. EASTERLING, K. REDMOND, AND K. HUBBARD, 2003: Temporal variations of extreme precipitation events in the United States, 1895-2000. *Geophysical research letters*, 30 (17), CLM 5 1-4 [1900, doi:10.1029/2003/GL018052, 2003] (Sept. 1 2003).
- LAMB P-J, 1982. Persistence of subsaharan drought. *Nature*, 299 : 46-48.
- LE BARBE L, LEBEL T, 1997. Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990, *Journal of Hydrology*, vol. 188-189, p. 43-73.
- LEBEL T, AMANI A, TAUPIN J.D, 1996. La pluie au Sahel : une variable rebelle à la régionalisation. In : Intéractions surface continentale/ atmosphère : l'expérience Hapex-Sahel.
- LEBEL, T, A. AMANI AND L. LE BARBÉ, 1998: Rainfall variability in the Sahel: a matter of scales. EGS April 1998, Nice.
- LECONTE R [et al.], 2004. Mapping near-surface soil moisture with RADARSAT-1 synthetic aperture radar data. *Water Resour. Res.*, 40, W01515, doi: 10.1029/2003WR002312.

LE DREZEN Y, 2001. *Diagnostic de la gestion des ressources végétales dans un terroir sahélien. Le cas du lac de Mâle (Brakna, Mauritanie)*. Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université d'Angers. 140 p.

LE HEGARAT S, WEISSE A [et al.], 2002. Soil Moisture Estimation from ERS/SAR Data: Toward an Operational Methodology, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 40.

Llamas J, 1993. *Hydrologie générale, Principes et Applications*. Gaétan Morin Editeur, Boucherville, Québec, Canada, 527p.

MANTON MJ, 2001. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast asia and the south pacific: 1961–1998. *International Journal Of Climatology* 21: 269–284 (2001).

MOEREMANS B [et al], (1999). *Integration of the Use of Spaceborne Radar Images in WAMM Project (Water Management Model)*. DHI Software Conference & DHI Software Courses. Helsinki, Denmark.

MOGUEDET G, DUBOST D, 1998. *Rapport de mission en Mauritanie*. Université d'Angers, 35 p.

MOREL R, 1995. La sécheresse en Afrique de l'Ouest, *Revue de Géographie de Lyon*, vol. 70, n°3-4, p. 215-222.

MOREL R, 1998. Début de la sécheresse en Afrique de l'Ouest. In : *Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology*.

MUSY A, SOUTTER M, 1991. *Physique du sol*, Presses polytechniques Universitaires Romandes, Lausanne.

NDONG J-B, 1995. L'évolution de la pluviométrie au Sénégal et les incidences de la Sécheresse récente sur l'environnement, *Revue de Géographie de Lyon*, vol. 70, n°3-4, p. 193-198.

NEW, M., B. HEWITSON, D. B. STEPHENSON, A. TSIGA, A. KRUGER, et al, 2006. Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 111(D14).

NIANG AJ, OZER P, OZER A, 2007. Fifty years of landscape evolution in Southwestern Mauritania by means of aerial photos. *Journal of Arid Environments*.

NIASSE M, AFOUBA A, AMANI A, 2004. *Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification*. Eléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation. Cambridge, UICN/BRAO, 82 p.

NICHOLSON S. E, 1985. Sub-Saharan Rainfall 1981-84, *Journal of climate and applied meteorology*, vol. 24, p. 1388-1391.

NICHOLSON S.E, 1989. Long-term changes in African rainfall. *Weather*, 44 : 44-56.

NICHOLSON S. (2005). On the question of the 'recovery" of the rains in the West African Sahel, *Journal of Arid Environments*, 63, 615-641.

NOUACEUR Z, 1995. Disparités pluviométriques, sécheresse et modification des équilibres de l'environnement mauritanien, *Revue de Géographie de Lyon*, vol. 70, n°3-4, p. 239-245.

OLANIRAN O.J, SUMNER G.N, 1989. Climatic change in Nigeria: variation in rainfall receipt per rainday. *Weather*, 44: 242-248.

OLIVRY J.C, 1983. Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux Iles du Cap-Vert. Examen des quelques séries de longue durée (débits et précipitations). *Cahiers ORSTOM, série Hydrologique* : 47-69.

OULD JIDDOU M, 2005. *Caractérisations hydrologique et hydrogéologique du sud-ouest mauritanien. Apport de l'analyse de données géophysiques – Diagnostic et gestion conjointe des ressources en eaux superficielles et souterraines*. Thèse de Doctorat sous la direction de Gérard MOGUEDET, Université d'Angers, 224 p.

OZER P, 2000. *Les lithométéores en région sahélienne*, Liège, GEO-ECO-TROP, 317 p.

OZER P., GASSANI J., HOUNTONDI Y.C., NIANG A.J. & AMBOUTA K., 2007. La désertification est-elle en recul au Sahel?. *Bois et Forêts des Tropiques*, 293: 23-28.

PALOC H, 1962. Carte hydrogéologique du bassin du sud-ouest mauritanien au 1/500 000 ème et notice explicative. D'après les travaux d'Elouard P. BRGM-Dakar.

PERARD J, BOKO M, OUNDENOU C, HERNANDEZ K, 2002. Mise en évidence du rôle des « précipitations tardives » dans la variabilité pluviométrique du bassin béninois du Niger (Afrique de l'Ouest), *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, vol. 14, p. 127-133.

PETTITT A.N, 1979. A non-parametric approach to the change-point problem, *Applied Statistics*, vol 28, p. 126-135.

PEUGEOT C, ESTEVES M., GALLE S, RAJOT J.-L and VANDERVAERE J.-P, 1997. Runoff generation processes : results and analysis of field data collected at the East Central Supersite of the HAPEX-Sahel experiment, *Journal of Hydrology*, vol 188-189 (HAPEX-Sahel Special Issue), p. 179-202.

PEUGEOT C, CAPPALAEERE B, VIEUX B, SEGUIS L, and MAIA A, 2003. Hydrologic process simulation of a semiarid, endoreic catchment in Sahelian West Niger: 1. Model-aided data analysis and screening, *Journal of Hydrology*, vol 219(1-4), p 224-243.

POLIDORI L, 1997. *Cartographie radar*, Amsterdam, Gordon and Breach Science Publishers, 287 p.

PROSPERO J.M. and P.J. Lamb, 2003: African droughts and dust transport to the Caribbean: climate change implications. *Science*, vol 302, p. 1024-1027.

RIBSTEIN P, 1990. *Modèles de crues et petits bassins versants au Sahel*, Paris, Editions de l'O. R. S. T. O. M, 317 p.

- REMENERIAS G, 1976. *L'hydrologie de l'ingénieur*. Eyrolles. Paris, 456p.
- RETAILLE D, 1984. La sécheresse et les sécheresses au Sahel, *L'Information Géographique*, vol. 48, p. 137-144.
- SAGNA P, 1994. L'évolution de la mousson et des précipitations au Sénégal de 1974 à 1993. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 7 :311-317.
- SÉGUIS L, CAPPELAERE B, PEUGEOT C, VIEUX B, 2002. Impact on Sahelian runoff of stochastic and elevation-induced spatial distributions of soil parameters, *Hydrological Processes*, vol. 16, p. 313-332.
- SÉGUIS L, CAPPELAERE B, MILÉSI G [et al.], 2004. Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment, *Hydrological Processes*, vol. 18, p. 3401-3413.
- SELESHI Y., CAMBERLIN P., 2006 : «Recent changes in dry spell and extreme rainfall events in Ethiopia.», *Theoretical and Applied Climatology*, 83, 1-4, 181-191.
- SIVAKUMAR M. V. K, HATFIELD J. L, 1990. Spatial Variability of Rainfall at an Experimental Station in Niger, West Africa, *Theoretical end Applied Climatology*, vol. 42, p. 33-39.
- TAIBI A-N, 1997. *Le piémont sud du djebel Amour (Atlas saharien, Algérie), apport de la télédétection satellitaire à l'étude d'un milieu en dégradation*. Thèse de Doctorat en Géographie physique et télédétection. Université Denis Diderot Paris VII, 310 p.
- TAÏBI A.N., GASSANI J., ELGHADI A. V., BALLOUCHE A., MOGUEDET G., OULD BABA M.L., OULD JIDDOU M., 2005. Diagnostic de la dynamique des ressources hydriques de surface et des processus de « désertification » du lac d'Aleg et son bassin versant (Brakna, Mauritanie) par télédétection multitemporelle, *Télédétection*, vol. 5, n°1-2-3, p. 35-45.
- TAPSOBA D, 1997 : Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques Ouest Africains et de leur récent changement. *Université. Paris XI (ORSAY)*. Février 1997
- TAUPIN J.D, AMANI A, LEBEL T, 1998. Variabilité spatiale des pluies au Sahel : une question d'échelles, *Water resources variability in Africa during the XXth century*.
- TOUPET CH, LACLAVERE G, 1977. Atlas de la République Islamique de Mauritanie. Ed Jeune Afrique, Paris, 63 p.
- UICN, 2004. Rapport annuel. Ouagadougou, *UICN*, 19 p.
- VAES, G., P. WILLEMS, AND J. BERLAMONT, 2002. 100 years of rainfall registration: are there trends ? *Water Science and Technology*, 45(2), 55-61.

VALENTIN C. 1981. *Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertiques Agadès: Niger*. Thèse 3e cycle, Paris 7, ORSTOM, Paris, série Etudes et Thèses, édit. 1985, 259 p.

VANNITSEM S, DEMARÉE G, 1991. Détection et modélisation des sécheresses au Sahel, *Hydrologie continentale*, vol. 6, n°2, p. 155-171.

WOLSKI P, SAVENIJE H, MURRAY-HUDSON M, GUMBRICHT T, 2006. Modelling of the flooding in the Okavango Delta, Botswana, using a hybrid reservoir-GIS model, *Journal of Hydrology*, vol.331, p. 58-72.

ZEBKER, H.A. and R.M. GOLDSTEIN. 1986. Topographic mapping from interferometric SAR observations, *J. Geophys. Res.*, 91 (B5), 4993-4999.

ZHANG, X., HOGG, W.D., MEKIS, E, 2001. Spatial and temporal characteristics of heavy precipitation events over Canada. *J. of Climate*, 14, 1923-1936.

SITES INTERNET DE REFERENCE

http://www.arras.inra.fr/pages/methode_du_las_sols.htm#Groupe3

http://unstats.un.org/unsd/cdb/cdb_years_on_top.asp?srID=13660&Ct1ID=&crID=478&yrID=2007

<http://esa.un.org/unpp/p2k0data.asp>

<http://unstats.un.org>

http://unstats.un.org/unsd/cdb/cdb_da_itypes_cr.asp?country_code=478

<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries/mauritania/tables.pdf#tab1>

<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Counprof/Mauritania/mauritaniaFR.htm>

<http://www.appeldoffres-mauritanie.com/aointer.html#>

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Présentation de l'espace régional.....	p. 4
Figure 2 : Géomorphologie de la Mauritanie.....	p. 11
Figure 3 : Zones humides du Brakna (Mauritanie).....	p. 16
Figure 4 : Espace d'étude régional : la Wilaya du Brakna.....	p. 18
Figure 5 : Evolution de la population en Mauritanie entre 1950 et 2050.....	p. 19
Figure 6 : Evolution de la population au Brakna et en Mauritanie entre 1988 et 2005.....	p. 20
Figure 7 : Evolution de la population au Brakna entre 1977 et 2005.....	p. 21
Figure 8 : Population de la Mauritanie et de Nouakchott entre 1977 et 2005.....	p. 22
Figure 9 : Distribution de la population dans la wilaya du Brakna.....	p. 23
Figure 10 : Evolution de la population de la région du Brakna entre 1977 et 2000.....	p. 25
Figure 11 : Répartition et typologie de l'agriculture et du pastoralisme dans le sud mauritanien.....	p. 28
Figure 12 : Schéma de la dynamique de l'eau et de la végétation des lacs du Brakna.....	p. 32
Figure 13 : Dynamique hydrologique et localisation des activités agricoles sur l'emplacement d'un lac au Brakna (Aleg).....	p. 34
Figure 14 : Localisation du peuplement et des tribus dans le bassin versant du lac de Mâle.....	p. 45
Figure 15 : Circulation atmosphérique saisonnière en Afrique de l'Ouest.....	p. 52
Figure 16 : Répartition mensuelle des précipitations de 1960 à 2005 (valeur absolue et en pourcentage).....	p. 53
Figure 17 : Localisation des stations pluviométriques de la Mauritanie.....	p. 55
Figure 18 : Evolution des précipitations en Mauritanie de 1935 à 2004 exprimée en fonction de l'indice d'anomalie pluviométrique' calculé sur 10 stations (d'après la méthode de LAMB 1982).....	p. 57

Figure 19 : Précipitations annuelles en Mauritanie (d'après la méthode de JONES & HULME 1996), moyennes des sous-séries pluviométriques avant et après le point de rupture de 1969, ainsi que pour les sous-séries 1970-1992 et 1993-2004 (données provenant de 10 stations).....	p. 57
Figure 20 : Evolution de la localisation des isohyètes en Mauritanie (1950-1969 et 1970-1989).....	p. 60
Figure 21 : Tendances de la pluviométrie annuelle (A), du nombre de jours de pluie (B), et de l'intensité pluviométrique moyenne par jour de pluie (C) en Mauritanie de 1935 à 2004.....	p. 67
Figure 22 : Cf. Figure 21 pour les tendances de la fréquence des pluies intenses (A), l'intensité des pluies intenses (B), et la proportion des jours de pluies intenses (C)	p. 68
Figure 23 : Cf. Figure 21 pour les tendances de la fréquence des pluies extrêmes (A), l'intensité des pluies extrêmes (B), et la proportion des jours de pluies extrêmes (C)	p. 69
Figure 24 : Localisation des stations pluviométriques sur le bassin versant de Mâle	p. 72
Figure 25 : Précipitations annuelles de la station de Mâle de 1998 à 2006.....	p. 74
Figure 26 : Evolution du nombre de jours de pluie à la station de Mâle de 1998 à 2006.	p. 75
Figure 27 : Répartition des intensités de l'averse du 15/07/2005 à la station de Zagora.....	p. 78
Figure 28 : Répartition des intensités de l'averse du 15/07/2005 à la station de Mâle.....	p. 78
Figure 29 : Répartition des intensités de l'averse du 05/09/2006 à la station de Djekouba.....	p. 78
Figure 30 : Distribution des volumes précipités entre 2005-2006 en fonction du temps (diagrammes de Huff) pour les fortes pluies de Mâle, Zagora, Oumraïm et Djekouba.....	p. 80
Figure 31 : Volume précipité par rapport au temps.....	p. 79
Figure 32 : Répartition spatiale journalière des pluies après quatre évènements pluvieux durant la saison humide 2006.....	p. 81
Figure 33 : Répartition spatiale saisonnière de la pluviométrie (juillet-octobre 2006).....	p. 83
Figure 34 : Modèle numérique de terrain du bassin versant du lac de Mâle.....	p. 90

Figure 35 : Le spectre électromagnétique.....	p. 91
Figure 36 : Réponses spectrales des éléments naturels.....	p. 93
Figure 37 : Principe de l'imagerie radar.....	p. 94
Figure 38 : Niveau de pénétration du signal SAR sur la végétation en fonction des longueurs d'onde.....	p. 96
Figure 39 : Influence des états de surfaces sur la diffusion des ondes radar SAR...	p. 97
Figure 40 : Composition colorée du bassin versant du lac de Mâle, 25 septembre 2006 (2,5m).....	p. 99
Figure 41 : Classification supervisée par les canaux BV, R et PIR de Spot 5, 22 septembre 2005.....	p. 101
Figure 42 : Répartition des unités paysagères du bassin versant de Mâle (%).....	p. 102
Figure 43 : Unités paysagères du bassin versant du lac de Mâle.....	p. 103
Figure 44 : Image Radarsat 1 du bassin versant de Mâle, 26 juillet 2006.....	p. 105
Figure 45 : Localisation des sites de mesures sur le bassin versant.....	p. 106
Figure 46 : Diagramme de la distribution représentative des zones de bas-fond	p. 108
Figure 47 : Courbe granulométrique des surfaces de reg	p. 109
Figure 48 : Diagramme de la distribution granulométrique des zones de dunes vives	p. 111
Figure 49 : Diagramme de la distribution représentative des zones de bas-fond....	p. 112
Figure 50 : Principe de l'interférométrie SAR.....	p.114
Figure 51 : Variations de la cohérence sur les différentes unités de paysage.....	p.115
Figure 52 : Schématisation de la variation de la cohérence.....	p.116
Figure 53 : Evolution de l'humidité pondérale dans trois types unités paysagères du bassin versant du lac de Mâle.....	p.118

Figure 54 : Localisation des sites test dans les différentes unités paysagères par caractérisation du signal.....	p. 120
Figure 55 : Variation du signal de rétrodiffusion des acquisitions d'images RADARSAT 1 (juin à octobre 2006), selon les différents types d'unités paysagères.....	p. 122
Figure 56 : Analyse temporelle de la rétrodiffusion du signal RADARSAT	p. 124
Figure 57 : Exemple de localisation des tamourts et tachourts.....	p. 128
Figure 58 : Précipitations annuelles à la station de Mâle (1998-2006).....	p. 129
Figure 59 : Schématisation de l'évolution annuelle de la surface en eau du lac de Mâle après analyse diachronique d'images Landsat (2000-2004).....	p. 130
Figure 60 : Relation entre la surface en eau et les évènements pluvieux (nombre et intensité) entre 2002 et 2003.....	p. 132
Figure 61 : Répartition des pluies journalières en 2001 à la station de Mâle.....	p. 133
Figure 62 : Répartition des pluies journalières en 2004 à la station de Mâle	p. 134
Figure 63 : Schématisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant du lac de Mâle	p. 136
Figure 64 : Localisation et visualisation des tachourts durant la saison humide.....	p. 137
Figure 65 : Semis des points des levés topographiques au théodolite d'un réseau de tachourts.....	p. 138
Figure 66 : Modèle Numérique de Terrain des tachourts (8 km Est de Mâle).....	p. 139
Figure 67 : Profil en long d'une partie du réseau de tachourts (MNT entre A et B).	p. 140
Figure 68 : Modèle Numérique de Terrain, tachourts extraites.....	p. 141
Figure 69 : Evolution des hauteurs d'eau des trois tachourts du 16/07/2006 au 27/07/2006.....	p. 144
Figure 70 : Dépressions en eau, image multispectrale Spot à 2,5 m de résolution...	p. 145
Figure 71 : Discrimination des tachourts sur le bassin versant de Mâle.....	p. 146
Figure 72 : Discrimination des tamourts sur le bassin versant de Mâle.....	p. 147
Figure 73 : Fusion des masques des tachourts et des tamourts discriminées.....	p. 148

Figure 74 : Transformation de la pluie brute en hydrogramme de crue (Musy 2000).....	p. 152
Figure 75 : Répartition des dépressions sur le bassin versant au cours d'un épisode pluvieux.....	p. 153
Figure 76 : Méthodologie des mesures du ruissellement	p. 155
Figure 77 : Hyétogramme de pluie SCM et d'orage isolé (2006).....	p. 157
Figure 78 : Hyétogramme expérimental.....	p. 158
Figure 79 : Ajustement du hyétogramme de pluie à la loi Gamma	p. 159
Figure 80 : Calage de la loi Gamma à différents types d'épisodes pluvieux.....	p. 160
Figure 81 : Hyétogrammes simulés pour une pluie totale de (a) : 10 mm ; (b) : 20 mm ; (c) : 30 mm ; (d) : 40 mm et (d) : 50 mm.....	p. 161
Figure 82 : Relevé limnimétrique du barrage de Mâle durant la saison humide en 2006.....	p. 162
Figure 83 : Infiltration en mm/s du reg en fonction du temps	p. 166
Figure 84 : Points obtenus par théodolite du lac amont de Mâle (mai 2006).....	p. 170
Figure 85 : Modèle numérique du lac amont de Mâle (mai 2007).....	p. 171
Figure 86 : Relation hauteur/volume du lac de Mâle	p. 172
Figure 87 : Méthode de discrimination par masque de l'eau libre.....	p. 174
Figure 88 : Méthode de détermination du volume d'eau du lac (apports de la télédétection et du SIG).....	p. 175
Figure 89 : Détermination du volume d'eau au barrage le 26/07/2006 par fusion entre le MNT et la lame d'eau.....	p.177
Figure 90 : Détermination du volume d'eau au barrage le 01/08/2006 par fusion entre le MNT et la lame d'eau par discrimination par télédétection.....	p.177
Figure 91 : Intégration dans le SIG de la distribution spatiale des caractéristiques des états de surface et de la répartition des pluies.....	p.180
Figure 92 : Méthodologie de calcul du volume d'eau ruisselé sur le bassin versant	p.183
Figure 93 : Répartition spatiale des précipitations et du volume d'eau ruisselé le 16 juillet 2006.....	p.185

.Figure 94 : Répartition spatiale des précipitations et du volume d'eau ruisselé le 20 juillet 2006.....	p. 186
Figure 95 : Répartition spatiale des précipitations et du volume d'eau ruisselé le 28 juillet 2006.....	p. 187
Figure 96 : Synthèse du remplissage du lac de Mâle durant la saison des pluies 2006.....	p. 189
Figure 97 : Répartition spatiale du volume d'eau ruisselé (Pluie de 10 mm).....	p. 190
Figure 98 : Simulation du remplissage du lac de Mâle avec une pluie moyenne de 10mm.....	p. 192
Figure 99 : Répartition spatiale du volume d'eau ruisselé (Pluie de 20 mm)	p. 193
Figure 100 : Simulation du remplissage du lac de Mâle avec une pluie moyenne de 20mm.....	p. 194
Figure 101 : Répartition spatiale du volume d'eau ruisselé (Pluie de 40 mm)	p. 195
Figure 102 : Simulation du remplissage du lac de Mâle avec une pluie moyenne de 40mm.....	p. 196

TABLE DES PHOTOGRAPHIES

.....	
Photo 1 : Barrage (20 km à l'Ouest de Mâle).....	p. 30
Photo 2 : Barrage et lac de Mâle.....	p. 30
Photo 3 : Diguette (1km à l'Est de Mâle).....	p. 36
Photo 4 : Cultures derrière diguettes.....	p. 37
Photo 5 : Une tachourt à l'Est de Mâle.....	p. 38
Photo 6 : Une tamourt à l'Est de Mâle.....	p. 39
Photo 7 : Cultures sous pluies à l'Est de Mâle	p. 40
Photo 8 : Cultures maraîchères en aval du lac de Mâle	p. 40
Photo 9 : Elevage sédentaire près de Mâle.....	p. 41
Photo 10 : Nomade, à l'Est de Mâle.....	p. 43
Photo 11 : Station de Zagora avec les deux types de pluviomètres.....	p. 73
Photo 12 : Dunes vives et dunes pédogénéisées (septembre2006).....	p. 87
Photo 13: Plateau et glacis, Est de Mâle.....	p. 88
Photo 14 : Tachourt en eau, Est de Mâle.....	p. 89
Photo 15 : Etat de surface des zones de bas-fonds avant et pendant la saison humide	p. 109
Photo 16 : Plateau et glacis (reg), Est de Mâle	p. 110
Photo 17 : Evolution des états de surface durant la saison sèche et humide.....	p. 113
Photo 18 : Tamourts (saison sèche, saison humide).....	p. 127
Photo 19 : Tachourts (saison sèche, saison humide).....	p. 127
Photo 20 : Remplissage du lac par deux évènements pluvieux (2001).....	p. 133
Photo 21 : Remplissage du lac, saison humide 2004.....	p. 134
Photo 22 : Lac de Mâle vide.....	p. 135
Photo 23 : Repère au centre des tachourts pour estimer la hauteur d'eau.....	p. 142

Photo 24 : Ecoulement en nappe sur l'espace couvert par le MNT des tachourts....	p. 143
Photo 25 : Stockage d'eau par les tachourts suite à l'écoulement de nappes.....	p. 143
Photo 26 : Relevés limnimétriques au barrage de Mâle.....	p. 162
Photo 27 : Dispositif permettant les mesures d'infiltration.....	p. 164

TABLE DES TABLEAUX

.....	
Tableau 1 : Indicateurs de population des pays frontaliers de Mauritanie.....	p. 17
Tableau 2 : Surfaces agricoles du Brakna/Mauritanie.....	p. 29
Tableau 3 : Localisation par coordonnées géographiques des stations pluviométriques.....	p. 55
Tableau 4 : Evolution pluviométrique des mois de juin à octobre selon différentes périodes pluviométriques homogènes.....	p. 61
Tableau 5 : Typologie des différents indices pluviométriques.....	p. 63
Tableau 6 : Analyse des indices pluviométriques sur les 10 stations.....	p. 65
Tableau 7 : Tendances des 9 indices sur la période 1935-2004.....	p. 66
Tableau 8 : Analyse d'une averse à la station de Zagora.	p. 76
Tableau 9 : Classement des intensités maximum atteintes pour t=30 min.....	p. 77
Tableau 10 : Date d'acquisition des images RADARSAT1.....	p. 104
Tableau 11 : Dynamique de la superficie saisonnière du lac de Mâle.....	p. 131
Tableau 12 : Valeur des paramètres d'infiltration pour les différents états de surface.....	p. 167
Tableau 13 : Production du ruissellement sur les différents types d'états de surface selon la quantité de précipitations.....	p. 168
Tableau n° 14 : Superficie et volume d'eau des 2 images Sopt 5.....	p. 178

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Moyens utilisés et méthodologie.....	p. 230
Annexe 2 : Convention RAMSAR sur les zones humides.....	p. 233
Annexe 3 : Extraits de fichier source de la pluviométrie d'Aleg.....	p. 240
Annexe 4 : Extrait traitement granulométrie laser de l'échantillon d'un oued.....	p. 243
Annexe 5 : Extraits de fichier source du MNT du réseau de tachourts.....	p. 244
Annexe 6 : Extraits de fichier source du MNT du lac de Mâle.....	p. 245

Moyens utilisés et méthodologie

Afin de pouvoir réaliser une étude complète du territoire, nous avons dû effectuer de nombreux et réguliers séjours sur le terrain et mettre en œuvre des méthodes et des techniques d'études très variées. Nous avons ainsi combiné les savoirs empiriques, les expérimentations de terrain rigoureuses ainsi que l'utilisation de technologies d'imageries satellitaires très performantes.

Moyens utilisés

Sources documentaires

- Examen approfondi de la littérature scientifique pour appréhender avec précision les différentes caractéristiques géomorphologiques, hydrologiques et écologiques de la zone d'étude.
- Cartes IGN 1/200000^{ème} de Mauritanie, fond IGN topographique 1958.
- Recueil de données démographiques sur les sites internet de l'ONS (Office National de la Statistique de Mauritanie), de l'office statistiques démographique de l'ONU (Unstats), du PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement) et de la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture).
- Acquisition d'images spot 5, 0 et 2,5 mètres de résolution (7 images) durant la saison des pluies 2006 par le projet Oasis Spot images.
- Acquisition d'images radarsat 1 (7 mètres de résolution) par l'université de Miami (8 images).
- Entretiens à Nouakchott avec Mohamed Ould Abdalahi, Ingénieur agronome, afin de cerner les pratiques agricoles sur l'espace d'étude.

Dates des séjours sur la zone d'étude et objectifs des missions

- 15 février au 15 mars 2003 : Analyse de la dynamique de la végétation du lac d'Aleg.
- 1 au 30 juillet 2004 : Mission financée par la coopération belge au développement, analyse de la dynamique hydrologique du lac d'Aleg.
- Novembre 2004 au 3 mai 2005 : Pratique des wilayas du Sud-Ouest de la Mauritanie, examen des différents espaces d'étude, examen des collaborations possibles et définition du

projet de thèse ; (15 au 22 mars 2005 : Evaluation de la mise en place de stations pluviométriques et du suivi hydrologique du lac de Mâle).

- 1 juillet au 1 octobre 2005 : Suivi hydrologique, manutention des pluviomètres électroniques et études géomorphologiques.

- 3 au 20 mars 2006 : Levées topographiques de dépressions, mesures d'infiltrations.

- 10 juillet au 25 septembre 2006 : Suivi hydrologique (dépressions et lac), manutention des pluviomètres électroniques, mesures d'humidité relative, prélèvements de sols.

- 27 mai au 1 juin 2007 : levée topographique du lac de Mâle.

Au total 14 mois et 15 jours de présence sur le terrain en 4 ans.

Activités réalisées sur le terrain

- Données climatiques recueillies à la SAM (Société des Aéroports de Mauritanie), données de précipitations mensuelles et journalières depuis 1925.

- Nombreux entretiens formels et informels réalisés auprès des autorités locales (hakem de Mâle), des responsables des divers villages du bassin versant de Mâle et des habitants de l'espace d'étude.

- Installations de cônes pyramidaux pour mesurer l'apport en poussières éoliennes durant la saison des pluies 2005 (juillet, août, septembre) et la saison sèche (mars, avril, et mai 2006) à Nouakchott.

- Installation de quatre pluviomètres manuels et cinq pluviomètres automatiques durant les années 2005 et 2006 (Mâle, Zagora, Lemoudou, Oumraim, Djektouba).

- Vérification terrain des résultats de traitements de télédétection entre 2005 et 2006.

- Installation et suivi bi-quotidien de l'échelle limnimétrique installée au barrage du lac de Mâle.

- Photographies des diverses formes de dépressions naturelles et de micro barrages anthropiques avant et après la saison des pluies afin d'évaluer les fonctionnements de ces éléments.

- Evaluations des pratiques agricoles et d'élevage des populations du bassin versant de Mâle.

- Suivi pendant dix jours de l'évolution de la hauteur d'eau de trois dépressions entre le 16 et 26 juillet 2006.

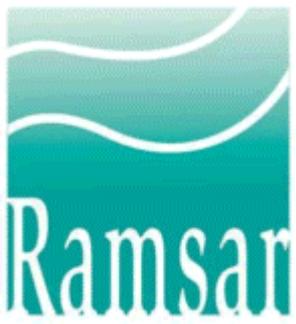
- Mesures topographiques du lac de Mâle et de différentes dépressions à l'aide d'un théodolite et d'un GPS.

Traitements réalisés en laboratoire

- Mesure de l'humidité des différents types de sols au Centre National d'Étude et de Recherches Vétérinaires (à Nouakchott) ainsi que pesage de 180 échantillons journaliers de poussière éolienne.
- Analyse de ces échantillons au SCIAM (Service Commun d'Imagerie et d'Analyse Microscopiques) de la faculté de Médecine d'Angers. Méthode utilisée : Microscope à Balayage Electronique.
- Granulométrie réalisée au laboratoire GEOPHEN de l'Université de Caen au moyen d'un granulomètre laser.
- Examen de la corrélation des mesures d'humidité relative réalisées sur le terrain et des d'images Radarsat à la même période au laboratoire LSEA à l'Université d'Angers.

Formations complémentaires

- Mai 2006, Mise à jour des connaissances en analyse spatiale (SIG) au laboratoire Télédétection et Géomorphologie, Université de Liège (Belgique).
- Février 2007, Séjour de formation au traitement des images radar, Université de Miami (Etats-Unis).



La Convention sur les zones humides

Convention relative aux zones humides d'importance internationale

Convention relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau

Ramsar, Iran, 2.2.1971
telle qu'amendée par le protocole du 3.12.1982
et les amendements de Regina du 28.5.1987
Copie certifiée conforme

Paris, le 13 juillet 1994
Directeur de l'Office des Normes internationales et des Affaires juridiques Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO)

Les Parties contractantes,

Reconnaissant l'interdépendance de l'Homme et de son environnement;

Considérant les fonctions écologiques fondamentales des zones humides en tant que régulateurs du régime des eaux et en tant qu'habitats d'une flore et d'une faune caractéristiques et, particulièrement, des oiseaux d'eau;

Convaincues que les zones humides constituent une ressource de grande valeur économique, culturelle, scientifique et récréative, dont la disparition serait irréparable;

Désireuses d'enrayer, à présent et dans l'avenir, les empiétements progressifs sur ces zones humides et la disparition de ces zones;

Reconnaissant que les oiseaux d'eau, dans leurs migrations saisonnières, peuvent traverser les frontières et doivent, par conséquent, être considérés comme une ressource internationale;

Persuadées que la conservation des zones humides, de leur flore et de leur faune peut être assurée en conjuguant des politiques nationales à long terme à une action internationale coordonnée;

Sont convenues de ce qui suit:

Article Premier

1. Au sens de la présente Convention, les zones humides sont des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres.
 2. Au sens de la présente Convention, les oiseaux d'eau sont les oiseaux dont l'existence dépend, écologiquement, des zones humides.
-

Article 2

1. Chaque Partie contractante devra désigner les zones humides appropriées de son territoire à inclure dans la Liste des zones humides d'importance internationale, appelée ci-après, "la Liste", et qui est tenue par le Bureau institué en vertu de l'article 8. Les limites de chaque zone humide devront être décrites de façon précise et reportées sur une carte, et elles pourront inclure des zones de rives ou de côtes adjacentes à la zone humide et des îles ou des étendues d'eau marine d'une profondeur supérieure à six mètres à marée basse, entourées par la zone humide, particulièrement lorsque ces zones, îles ou étendues d'eau ont de l'importance en tant qu'habitat des oiseaux d'eau.
 2. Le choix des zones humides à inscrire sur la Liste devrait être fondé sur leur importance internationale au point de vue écologique, botanique, zoologique, limnologique ou hydrologique. Devraient être inscrites, en premier lieu, les zones humides ayant une importance internationale pour les oiseaux d'eau en toutes saisons.
 3. L'inscription d'une zone humide sur la Liste est faite sans préjudice des droits exclusifs de souveraineté de la Partie contractante sur le territoire de laquelle elle se trouve située.
 4. Chaque Partie contractante désigne au moins une zone humide à inscrire sur la Liste au moment de signer la Convention ou de déposer son instrument de ratification ou d'adhésion conformément aux dispositions de l'article 9.
 5. Toute Partie contractante a le droit d'ajouter à la Liste d'autres zones humides situées sur son territoire, d'étendre celles qui sont déjà inscrites, ou, pour des raisons pressantes d'intérêt national, de retirer de la Liste ou de réduire l'étendue des zones humides déjà inscrites et, le plus rapidement possible, elle informe de ces modifications l'organisation ou le gouvernement responsable des fonctions du Bureau permanent spécifiées par l'article 8.
 6. Chaque Partie contractante tient compte de ses engagements, sur le plan international, pour la conservation, la gestion, et l'utilisation rationnelle des populations migratrices d'oiseaux d'eau, tant lorsqu'elle désigne les zones humides de son territoire à inscrire sur la Liste que lorsqu'elle exerce son droit de modifier ses inscriptions.
-

Article 3

1. Les Parties contractantes élaborent et appliquent leurs plans d'aménagement de façon à favoriser la conservation des zones humides inscrites sur la Liste et, autant que possible, l'utilisation rationnelle des zones humides de leur territoire.
 2. Chaque Partie contractante prend les dispositions nécessaires pour être informée dès que possible des modifications des caractéristiques écologiques des zones humides situées sur son territoire et inscrites sur la Liste, qui se sont produites, ou sont en train ou susceptibles de se produire, par suite d'évolutions technologiques, de pollution ou d'une autre intervention humaine. Les informations sur de telles modifications seront transmises sans délai à l'organisation ou au gouvernement responsable des fonctions du Bureau permanent spécifiées à l'article 8.
-

Article 4

1. Chaque Partie contractante favorise la conservation des zones humides et des oiseaux d'eau en créant des réserves naturelles dans les zones humides, que celles-ci soient ou non inscrites sur la Liste, et pourvoit de façon adéquate à leur surveillance.
 2. Lorsqu'une Partie contractante, pour des raisons pressantes d'intérêt national, retire une zone humide inscrite sur la Liste ou en réduit l'étendue, elle devrait compenser autant que possible toute perte de ressources en zones humides et, en particulier, elle devrait créer de nouvelles réserves naturelles pour les oiseaux d'eau et pour la protection, dans la même région ou ailleurs, d'une partie convenable de leur habitat antérieur.
 3. Les Parties contractantes encouragent la recherche et l'échange de données et de publications relatives aux zones humides, à leur flore et à leur faune.
 4. Les Parties contractantes s'efforcent, par leur gestion, d'accroître les populations d'oiseaux d'eau sur les zones humides appropriées.
 5. Les Parties contractantes favorisent la formation de personnel compétent pour l'étude, la gestion et la surveillance des zones humides.
-

Article 5

1. Les Parties contractantes se consultent sur l'exécution des obligations découlant de la Convention, particulièrement dans le cas d'une zone humide s'étendant sur les territoires de plus d'une Partie contractante ou lorsqu'un bassin hydrographique est partagé entre plusieurs Parties contractantes. Elles s'efforcent en même temps de coordonner et de soutenir leurs politiques et réglementations présentes et futures relatives à la conservation des zones humides, de leur flore et de leur faune.
-

Article 6

1. Il est institué une Conférence des Parties contractantes pour examiner et promouvoir la mise en application de la présente Convention. Le Bureau dont il est fait mention au paragraphe 1 de l'article 8 convoque des sessions ordinaires de la Conférence à des intervalles de trois ans au plus, à moins que la Conférence n'en décide autrement, et des sessions extraordinaires lorsque la demande écrite en est faite par au moins un

- tiers des Parties contractantes. La Conférence des Parties contractantes détermine, à chacune de ses sessions ordinaires, la date et le lieu de sa prochaine session ordinaire.
2. La Conférence des Parties contractantes aura compétence:
 - a. pour discuter de l'application de la Convention;
 - b. pour discuter d'additions et de modifications à la Liste;
 - c. pour examiner les informations sur les modifications des caractéristiques écologiques des zones humides inscrites sur la Liste fournies en exécution du paragraphe 2 de l'article 3;
 - d. pour faire des recommandations, d'ordre général ou particulier, aux Parties contractantes, au sujet de la conservation, de la gestion et de l'utilisation rationnelle des zones humides, de leur flore et de leur faune;
 - e. pour demander aux organismes internationaux compétents d'établir des rapports et des statistiques sur les sujets à caractère essentiellement international concernant les zones humides;
 - f. pour adopter d'autres recommandations ou résolutions en vue de promouvoir le fonctionnement de la présente Convention.
 3. Les Parties contractantes assurent la notification aux responsables, à tous les niveaux, de la gestion des zones humides, des recommandations de telles Conférences relatives à la conservation, à la gestion et à l'utilisation rationnelle des zones humides et de leur flore et de leur faune, et elles prennent en considération ces recommandations.
 4. La Conférence des Parties contractantes adopte un règlement intérieur à chacune de ses sessions.
 5. La Conférence des Parties contractantes établit et examine régulièrement le règlement financier de la présente Convention. A chacune de ses sessions ordinaires, elle adopte le budget pour l'exercice suivant à une majorité des deux tiers des Parties contractantes présentes et votantes.
 6. Chaque Partie contractante contribue à ce budget selon un barème des contributions adopté à l'unanimité des Parties contractantes présentes et votantes à une session ordinaire de la Conférence des Parties contractantes.
-

Article 7

1. Les Parties contractantes devraient inclure dans leur représentation à ces conférences des personnes ayant la qualité d'experts pour les zones humides ou les oiseaux d'eau du fait des connaissances et de l'expérience acquises par des fonctions scientifiques, administratives ou par d'autres fonctions appropriées.
 2. Chacune des Parties contractantes représentées à une Conférence dispose d'une voix, les recommandations, résolutions et décisions étant adoptées à la majorité simple des Parties contractantes présentes et votantes; à moins que la présente Convention ne prévoie d'autres dispositions.
-

Article 8

1. L'Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources assure les fonctions du Bureau permanent en vertu de la présente Convention, jusqu'au moment

où une autre organisation ou un gouvernement sera désigné par une majorité des deux tiers de toutes les Parties contractantes.

2. Les fonctions du Bureau permanent sont, notamment:
 - a. D'aider à convoquer et à organiser les conférences visées à l'article 6;
 - b. de tenir la Liste des zones humides d'importance internationale, et recevoir des Parties contractantes les informations prévues par le paragraphe 5 de l'article 2, sur toutes additions, extensions, suppressions ou diminutions relatives aux zones humides inscrites sur la Liste;
 - c. de recevoir des Parties contractantes les informations prévues conformément au paragraphe 2 de l'article 3 sur toutes modifications des conditions écologiques des zones humides inscrites sur la Liste;
 - d. de notifier à toutes les Parties contractantes toute modification de la Liste, ou tout changement dans les caractéristiques des zones humides inscrites, et prendre les dispositions pour que ces questions soient discutées à la prochaine conférence;
 - e. d'informer la Partie contractante intéressée des recommandations des conférences en ce qui concerne les modifications à la Liste ou des changements dans les caractéristiques des zones humides inscrites.
-

Article 9

1. La Convention est ouverte à la signature pour une durée indéterminée.
 2. Tout membre de l'Organisation des Nations Unies, de l'une de ses institutions spécialisées, ou de l'Agence internationale de l'énergie atomique, ou toute Partie au statut de la Cour internationale de Justice peut devenir Partie contractante à cette Convention par:
 - a. signature sans réserve de ratification;
 - b. signature sous réserve de ratification, suivie de la ratification;
 - c. adhésion.
 3. La ratification ou l'adhésion seront effectuées par le dépôt d'un instrument de ratification ou d'adhésion auprès du Directeur général de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (ci-après appelé le "Dépositaire").
-

Article 10

1. La Convention entrera en vigueur quatre mois après que sept Etats seront devenus Parties contractantes à la Convention conformément aux dispositions du paragraphe 2 de l'article 9.
 2. Par la suite, la Convention entrera en vigueur, pour chacune des Parties contractantes, quatre mois après la date de sa signature sans réserve de ratification, ou du dépôt de son instrument de ratification ou d'adhésion.
-

Article 10 bis

1. La présente Convention peut être amenée à une réunion des Parties contractantes convoquée à cet effet en conformité avec le présent article.
 2. Des propositions d'amendement peuvent être présentés par toute Partie contractante.
 3. Le texte de toute proposition d'amendement et les motifs de cette proposition sont communiqués à l'organisation ou au gouvernement faisant office de bureau permanent au sens de la Convention (appelé(e), ci-après "le Bureau"), et sont communiqués par le Bureau sans délai à toutes les Parties contractantes. Tout commentaire sur le texte émanant d'une Partie contractante est communiqué au Bureau dans les trois mois suivant la date à laquelle les amendements ont été communiqués aux Parties contractantes par le Bureau. Le Bureau, immédiatement après la date limite de présentations des commentaires, communique aux Parties contractantes tous les commentaires reçus à cette date.
 4. Une réunion des Parties contractantes en vue d'examiner un amendement communiqué en conformité avec le paragraphe 3 est convoquée par le Bureau à la demande écrite d'un tiers du nombre des Parties contractantes. Le Bureau consulte les Parties en ce qui concerne la date et le lieu de la réunion.
 5. Les amendements sont adoptés à la majorité des deux tiers des Parties contractantes présentes et votantes.
 6. Lorsqu'il a été adopté, un amendement entre en vigueur, pour les Parties contractantes qui l'ont accepté, le premier jour du quatrième mois suivant la date à laquelle deux tiers des Parties contractantes ont déposé un instrument d'acceptation auprès du Dépositaire. Pour toute Partie contractante qui dépose un instrument d'acceptation après la date à laquelle deux tiers des Parties contractantes ont déposé un instrument d'acceptation, l'amendement entre en vigueur le premier jour du quatrième mois suivant la date du dépôt de l'instrument d'acceptation de cette Partie.
-

Article 11

1. La Convention restera en vigueur pour une durée indéterminée.
 2. Toute Partie contractante pourra dénoncer la Convention après une période de cinq ans après la date à laquelle elle sera entrée en vigueur pour cette Partie, en faisant par écrit la notification au Dépositaire. La dénonciation prendra effet quatre mois après le jour où la notification en aura été reçue par le Dépositaire.
-

Article 12

1. Le Dépositaire informera aussitôt que possible tous les Etats ayant signé la Convention ou y ayant adhéré:
 - a. des signatures de la Convention;
 - b. des dépôts d'instruments de ratification de la Convention;
 - c. des dépôts d'instruments d'adhésion à la Convention;
 - d. de la date d'entrée en vigueur de la Convention;
 - e. des notifications de dénonciation de la Convention.
2. Lorsque la Convention sera entrée en vigueur, le Dépositaire la fera enregistrer au Secrétariat des Nations Unies conformément à l'article 102 de la charte.

EN FOI DE QUOI les soussignés, dûment mandatés à cet effet, ont signé la présente Convention.

FAIT à Ramsar le 2 février 1971 en un seul exemplaire original dans les langues anglaise, française, allemande et russe, tous les textes étant également authentiques*, lequel exemplaire sera confié au Dépositaire qui en délivrera des copies certifiées conformes à toutes les Parties contractantes.

* Conformément à l'Article final de la Conférence ayant adopté le Protocole, le Dépositaire a présenté à la seconde Conférence des Parties des versions officielles de la Convention en langues arabe, chinoise et espagnole, établies en consultation avec les Gouvernements intéressés et avec l'assistance du Bureau.

Bureau de la Convention de Ramsar, Rue Mauverney 28, CH-1196 Gland, Suisse (Tél. +41 22 999 0170, fax +41 22 999 0169, e-mail : ramsar@ramsar.org). Publié décembre 1996, Dwight Peck, Ramsar.

Annexe 3 : Extraits de fichier source pluviométrie Aleg

pluviométrie	1922	174	MM
--------------	------	-----	----

DATE	Jan	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct
1						
2						
3						
4						
5				35		
6						
7			3			3
8						
9						
10						
11				8		
12						
13						
14					10	
15						
16						
17			18			
18				19		
19						
20					6	4,5
21				4,5		4,5
22		5,5		34,5		
23						
24						
25						
26						
27						
28				2		
29			13			
30						
31						
TOTAL		5,5	34	103	16	12
Jour de pluie		1	3	6	2	3
Total nb jours	15					
Total pluie	170,5					

		pluviométrie		1967		12 MM	
				Année incomplète			
DATE	Jan	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9			12				
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
31							
TOTAL			12				
Jour de pluie			1				
Total nb jours		1					
Total part		12					

pluviométrie 1974

289,9 MM

DATE	Jan	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct
1						
2						
3						
4					8	10
5				5		
6						
7						
8					12	
9				18,2		
10					4,2	
11						
12			41,7			
13			10,3			
14						
15					32	
16						
17					30,9	
18						
19						
20						
21				38,5		
22				5		
23				10		
24						
25						
26			44,1	20		
27						
28						
29						
30						
31						
TOTAL			96,1	96,7	87,1	10
Jour de pluie			3	6	5	1
Total nb jours	15					
Total pluie	289,9					

Annexe 4 : Extrait traitement granulométrie laser de l'échantillon d'un oued.

LS	23/03/2007 13:33
File name:	horizon hu_02_01.\$ls
File ID:	horizon humife
Sample ID:	
Operator:	
Bar code:	
Comment 1:	etuve
Comment 2:	
Instrument:	LS 200, VSM Plus
Run number:	1
Start time:	16/03/2007 13:47
Run length:	60
Optical model:	Fraunhofer.rfz
Obscuration:	13
PIDS Obscur:	
Obscuration:	High
Serial Number:	6893
From	0.375
To	2000
Volume	100
Mean:	15.57
Median:	9.422
D(0,0):	0.755
Mean/Median ratio:	1.652
Mode:	26.14
S.D.:	15.75
Variance:	247.9
C.V.:	101.2
Skewness:	1.414
Kurtosis:	1.390
d10:	1.783
d50:	9.422
d90:	39.92
Specific Surf. Area:	13420
% <	Size
10	1.78
25	3.72
50	9.42
75	22.8
90	39.9
% >	Size
10	39.9
25	22.8
50	9.42
75	3.72

Annexe 5 : Extrait de fichier source du MNT du réseau de tachourts

x	y	z
679,767	1879,198	74
655,501	1819,826	73,422
652,831	1821,479	73,45
652,587	1813,219	73,363

623,218	1775,985	73,451
628,255	1781,967	73,422
622,623	1774,287	73,486
625,921	1777,233	73,497
623,899	1774,128	73,507
623,124	1771,411	73,54
622,197	1773,56	73,554

620,873	1786,85	73,51
618,2	1800,23	73,513
626,349	1794,813	73,543
624,825	1808,432	73,53
632,168	1804,805	73,551
630,265	1816,25	73,541

644,632	1775,836	73,488
646,852	1770,345	73,498
639,545	1766,578	73,486
641,583	1760,042	73,482
628,462	1762,138	73,477
636,503	1751,722	73,491

603,897	2087,986	73,244
601,136	2080,267	73,231
599,321	2072,415	73,25
598,252	2068,812	73,354
595,439	2060,494	73,42

545,095	2097,299	73,685
542,887	2097,218	73,733
543,729	2093,95	73,679
541,173	2093,451	73,737
541,752	2090,912	73,674
539,544	2090,41	73,718
540,237	2088,567	73,724

544,554	2099,372	73,644
540,213	2090,494	73,522
543,534	2096,5	73,605
539,591	2089,186	73,492
538,733	2086,608	73,632

Annexe 6 : Extrait de fichier source du MNT du lac de Mâle

S1	X	Y	Z
S0	673794,000	1873593,000	72,000
S2	674262,172	1874136,177	67,784
S4	674000,800	1873388,796	71,987

S105	673573,306	1874354,495	67,616
S106	673434,927	1874174,545	69,083
S107	673520,630	1874395,630	67,630
S108	673395,116	1874198,415	68,384

S170	673513,500	1874070,674	71,675
S171	673528,570	1874087,949	69,867
S172	673555,549	1874107,262	68,524
S173	673586,497	1874151,799	67,767
B28	674945,879	1874386,985	69,883
B29	674920,961	1874428,278	69,368

B183	677193,323	1878193,632	69,385
B184	677159,209	1877958,083	68,785
B185	677151,012	1877770,659	68,631
B186	677208,131	1877600,341	68,618
B187	677234,208	1877559,163	69,383
B188	677182,162	1877497,451	69,448

B217	674885,643	1876461,858	68,229
B218	674837,821	1876526,835	67,850
B219	674735,551	1876705,106	68,343
B220	674587,884	1876983,261	68,733
B221	674475,829	1877167,421	69,347
B222	674160,854	1877183,279	69,549

B242	673331,228	1876438,021	69,887
B243	673401,244	1876217,864	69,424
B244	673437,605	1876032,302	69,680
B245	673465,414	1875810,946	69,779
B246	673485,805	1875671,465	69,625
B247	673540,225	1875660,129	69,243

TABLE DES MATIERES

Introduction	p. 3
I. La zone d'étude	p. 4
II. Justification de l'étude	p. 5
III. Objectifs	p. 7
Chapitre I : Contexte physique et conditions du peuplement	p. 9
I.) Contexte physique général de la Mauritanie	p. 10
II.) Les ressources en eau	p. 12
III) Le cadre humain	p. 17
III.1. Population de la Mauritanie	p. 17
III.1.1. Evolution de la population nationale et de celle du Brakna	p. 19
III.1.2. Evolution de la répartition spatiale des populations du Brakna	p. 21
III.2. L'agriculture	p. 26
III.2.1. Au niveau national	p. 26
III.3. L'agriculture et le pastoralisme au Brakna	p. 29
III.3.1. Les cultures de décrue derrière barrage	p. 29
III.3.2. Dynamique saisonnière intra annuelle de la végétation du lac d'Aleg	p. 31
III.3.2.1. Dynamique de la végétation des ceintures internes des lacs	p. 32
III.3.2.2. Dynamique de la couverture végétale de la ceinture externe du lac	p. 35
III.3.3. Les cultures derrière diguettes	p. 36
III.3.4. Les dépressions naturelles	p. 37
III.3.5. Les cultures pluviales ou dièri	p. 39
III.3.6. Les cultures maraîchères irriguées	p. 40
III.3.7. L'élevage	p. 41
III.3.7.1. L'élevage familial sédentaire	p. 41
III.3.7.2. La transhumance	p. 42
III.3.7.3. Le nomadisme	p. 42
Chapitre II : Les précipitations	p. 49
I. Caractéristiques générales	p. 50
II. Analyse des variations interannuelles des précipitations à l'échelle nationale	p. 54
III. Analyse des tendances aux pluies extrêmes en Mauritanie (1935-2004)	p. 61
III.1. Données et méthodes	p. 62
III.2. Résultats	p. 64
IV. Caractéristiques climatiques de la zone d'étude (Bassin versant du lac de Mâle)	p. 70
IV.1. Introduction	p. 70
IV.2. Analyse des pluies journalières	p. 73

IV.3. Analyse des intensités	p. 75
IV.4. Les formes de pluie	p. 77
IV.5. Analyse de la répartition spatiale des averses entre 2005 et 2006	p. 80

Chapitre III : Dynamique des unités de paysage **p. 85**

I. Caractérisation des unités paysagères	p. 87
I.1. Le système dunaire	p. 87
I.2. Les plateaux et glacis	p. 88
I.3. Les bas-fonds	p. 88
II. La télédétection comme outil de compréhension de la dynamique des états de surface	p.90
II.1.Principes physiques de la télédétection	p.90
II.1.1. Le rayonnement électromagnétique	p.91
II.1.2. Le spectre électromagnétique	p.91
II.1.3. Propriétés spectrales des objets	p.92
II.1.3.1.La végétation	p.92
II.1.3.2. L'eau	p.92
II.1.3.3. Les objets minéralisés	p.92
II.2. Principes de l'imagerie radar	p.93
II.2.1. L'image radar SAR	p.95
II.2.2. Traitement des états de surface par SAR	p.96
II.2.3. Analyse du changement du signal de rétrodiffusion des états de surface	p.97
II.3. Cartographie des états de surface par télédétection passive	p.98
II.3.1. Les traitements d'images Spot pour la cartographie des unités de paysage	p.98
II.3.1.1. La composition colorée	p.98
II.4.1. La classification supervisée	p.100
II.4. La télédétection active par Radarsat 1, outil complémentaire à la discrimination Des états de surface	p.104
III. Caractérisation et dynamique des unités de paysage (bas-fond, dune, reg)	p.106
III.1. Granulométrie des zones de bas-fond	p.107
III.2. Granulométrie des reg des plateaux et glacis	p.109
III.3. Les systèmes dunaires	p.110
III.3.1. Les dunes vives	p.110
III.3.2. Les dunes pédogénéisées	p.111
IV. La dynamique temporelle des différentes unités de paysage et états de surface	p.112
IV.1. Analyse de l'humidité pondérale des unités de paysage durant la saison humide	p.116
IV.1.1. Les zones de bas-fond	p.117
IV.1.2. Les zones de reg et de dunes	p.119
IV.2. Suivi des différentes unités de paysage avant et pendant l'hivernage 2006 avec les images Radarsat 1	p.120
IV.2.1. Durant la saison sèche	p.121
IV.2.2. Durant la saison humide	p.123
IV.2.2.1. Acquisition du 26 juillet	p.123
IV.2.2.2. Acquisition du 19 août	p.125
IV.2.2.3. Acquisition du 19/08 et 25/09 et 06/10	p.126
V. Dynamique fonctionnement des bas-fonds	p.127
V.1. Suivi du rôle des bas-fonds dans le remplissage du lac par données multisources	p.129
V.2. Un remplissage interannuel du lac très aléatoire	p.131
V.3. Caractérisation géomorphologique des dépressions	p.135
V.3.1. Création d'un modèle numérique de terrain des tachourts	p.137

V.3.2. Suivi de la dynamique de remplissage des tachourts durant la saison des pluies 2006	p.142
V.3.3. Discrimination et spatialisation des dépressions	p.144
V.3.3.1. Méthodologie	p.144
Chapitre IV : Modélisation Hydrologique	p.150
I. La modélisation Pluie-débit	p.151
I.1.Méthode déterministe	p.152
I.2. Démarche	p.153
II. Acquisition et exploitation des données	p.156
II.1.. Pluviométrie	p.156
II.1.1. Stations de mesure	p.156
II.1.2. Analyse des pluies	p.156
II.2 Relevé limnimétrique au barrage	p.161
II.3. Mesure d'infiltration	p.163
II.3.1. Méthode utilisée	p.163
II.3.2. Capacité d'infiltration	p.165
II.3.2.1. La loi de Horton	p.165
II.3.2.2. Le traitement des résultats	p.166
II.3.2.3. L'infiltration retenue	p.167
II.4. Suivi du remplissage du lac	p.169
II.4.1. Levé topographique du lac	p.169
II.4.2. Suivi du remplissage par limnimétrie	p.171
II.4.3. Suivi du remplissage par images satellitales	p.173
III. Evaluation du remplissage du lac de Mâle	p.176
III.1 Evaluation du volume expérimental du lac à partir des mesures limnimétriques et du modèle numérique de terrain	p.176
III.2. Evaluation du volume du lac par modélisation/simulation	p.178
III.2.1. Apport du SIG dans la simulation hydrologique	p.178
III.2.2. Calcul de la pluie nette en appliquant les différents paramètres	p.181
III.2.2.1. Choix du pas de temps	p.181
III.2.2.2. Choix de d'infiltration f_i	p.181
III.2.2.3. Carte des isohyètes	p.182
IV. Application à l'analyse de la répartition spatiale du ruissellement simulé du bassin versant du lac de Mâle	p.184
IV.1. Episode pluvieux du 16/07/2006	p.184
IV.2. Episode pluvieux du 20/07/2006	p.185
IV.3. Episode pluvieux du 28/07/2006	p.187
IV.4. Comparaison diachronique du remplissage du lac par mesure expérimentale et simulation	p.188
V. Simulation du remplissage du lac par des épisodes fictifs aléatoires (examen du rôle des dépressions)	p.189
V.1. Analyse pour une pluie de 10 mm	p.190
V.2. Analyse pour une pluie de 20 mm	p.193
V.3. Analyse pour une pluie de 40 mm	p.195
Conclusion	p.199