



Répartition spatiale, gestion et exploitation des eaux souterraines : cas du département de Katiola, région des savanes de Côte d'Ivoire

Talnan Coulibaly

► To cite this version:

Talnan Coulibaly. Répartition spatiale, gestion et exploitation des eaux souterraines : cas du département de Katiola, région des savanes de Côte d'Ivoire. Sciences de la Terre. Université Paris-Est, 2009. Français. NNT : 2009PEST1034 . tel-00638690

HAL Id: tel-00638690

<https://theses.hal.science/tel-00638690>

Submitted on 7 Nov 2011

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.

Université Paris Est

THÈSE

pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Paris Est

Spécialité : Sciences de l'Information Géographique

Présentée et soutenue publiquement par

Talnan Jean Honoré COULIBALY

le 09 juillet 2009

Répartition spatiale, Gestion et Exploitation des eaux souterraines

Cas du département de Katiola, région des savanes de Côte d'Ivoire

Jury :			
Qualité	Nom et Prénoms	Grade, Organisme d'appartenance	Lieu d'exercice label Labo, adresse
Directeurs de Thèse	DEROIN Jean-Paul	Professeur, Univ. Paris-Est Marne la Vallée	EA 4119 G2I Univ. Paris-Est Marne la Vallée (France)
	SAVANE Issiaka	Professeur, Univ. d'Abobo-Adjamé Côte d'Ivoire	Géosciences & Environnement Univ. d'Abobo-Adjamé Côte d'Ivoire
Rapporteur	CHOROWICZ Jean	Professeur Emérite, Univ. Pierre et Marie Curie (Paris 6)	UMR CNRS 7193 ISTeP Univ P et M Curie (Paris 6, France)
Rapporteur	DHONT Damien	Maître de conférences HDR Univ. de PAU et Pays de l'Adour	UMR CNRS 5212 MIGP Univ. de PAU et Pays de l'Adour (France)
Examineur	KONATE Souleymane	Docteur, Univ. d'Abobo-Adjamé Côte d'Ivoire	Directeur de la Station de Recherche en Ecologie Lamto (Côte d'Ivoire)

AVANT-PROPOS

Nous avons entamé ce travail en 2006, un an avant l'accord de paix, c'est-à-dire en pleine crise ivoirienne. L'année suivante, soit en mars 2007 l'accord de paix de Ouagadougou (Burkina) fut signé. Nos travaux de terrain se sont poursuivis jusqu'à fin 2008. L'intérêt pour nous n'était de pas de braver qui que se soit. Il était tout simplement important pour nous d'aller sur le terrain comme tous les scientifiques du monde, observer, expérimenter et recueillir des données dans le cadre de nos travaux sur les ressources en eau. A notre arrivée nous nous sommes signalés auprès des autorités militaires, et c'est avec leur accord que nous avons mené nos travaux de recherche. Compte tenu de la situation du pays, nous avons constitué une équipe à effectif très réduit, composée de Coulibaly Talnan Jean Honoré, doctorant et Wakayangtchin Dieudonné, technicien. Pour la logistique, nous avons choisi une moto, moyen de transport léger, facile à dépanner et qui a accès à toutes les zones, même les plus reculées.

Le travail de terrain a été difficile à cause de la crise politico-militaire. Les conséquences de ce conflit sur le terrain se sont manifestées d'une part, par la méfiance des populations face à nous et à nos interrogations. D'autre part, par l'absence presque totale des autorités administratives chargée de l'agriculture et des « eaux et forêts ». Malgré ces inconvénients, les sorties de terrain furent un succès.

Remerciements

Au terme de ce travail de recherche qui a conduit à la présentation de cette thèse, il nous paraît nécessaire de témoigner notre sincère reconnaissance à toutes les personnes, institutions et organismes qui, par leur soutien scientifique, matériel, financier, moral et spirituel ont contribué à la réalisation des présents travaux.

A l'endroit du **Professeur Jean-Paul DEROIN**, directeur de cette thèse, nous lui exprimons nos sentiments de gratitude pour l'attention et l'intérêt soutenus qu'il a accordés à ce travail de recherche, et ce en dépit de ses nombreuses charges académiques et administratives. Ses critiques, observations et orientations scientifiques nous ont été fort utiles. Ses encouragements ont été pour nous de véritables sources de motivation.

Au **Professeur Issiaka SAVANE**, co-directeur de thèse, Doyen de l'UFR-SGE, nous voudrions tout simplement dire merci. Nous avons bénéficié non seulement de son soutien scientifique pour les questions environnementales et hydrogéologiques mais également de ses conseils avérés. Qu'il trouve ici, l'expression de notre profonde gratitude.

Je remercie les rapporteurs de cette thèse **Damien DHONT** et **Jean CHOROWICZ** pour la rapidité avec laquelle ils ont lu mon manuscrit et l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Je suis très sensible à la présence dans ce jury du Professeur **Jean CHOROWICZ**. Merci également aux autres membres du jury qui ont accepté de juger ce travail : **Damien DHONT** et **Souleymane KONATE**, directeur du Laboratoire d'Ecologie Tropicale de Côte d'Ivoire (LAMTO).

A Monsieur **OUATTARA N'golo Idriss**, nous adressons nos sincères remerciements pour sa constante sollicitude et ses qualités humaines. Il a été toujours présent à mes côtés chaque fois que le besoin s'en faisait sentir. Nous voudrions lui témoigner notre reconnaissance infinie pour nous avoir conduit vers l'aboutissement de cette thèse.

Au **Docteur COULIBALY Kapo Martin**, nous voudrions témoigner notre reconnaissance pour ses constants soutiens à l'élaboration de cette thèse. Il n'a cessé de nous prodiguer conseils, critiques, suggestions et répliques dans des discussions souvent passionnées mais enrichissantes que nous avons eues avec lui. Nous lui sommes profondément reconnaissant et le prions d'accepter nos vifs remerciements.

Mes remerciements vont également à l'endroit de Monsieur **Thierry DEROIN** du Muséum d'histoire naturelle de France pour le travail effectué sur l'identification des plantes rencontrées sur les plans d'eau, et à Monsieur **Bertin YAO** de la Direction de la Géologie en Côte d'Ivoire pour les cartes qu'il nous a fournis sur le département de Katiola.

Que **Frédéric Kaveh**, **Clélia Bilodeau**, **Niamien David**, ainsi que tous nos amis

étudiants stagiaires du Laboratoire, trouvent ici, l'expression de notre reconnaissance et de notre amitié.

Que les populations de Katiola, Timbé, Niakaramandougou, Tafiré, Fronan qui nous ont ouvert spontanément les portes de leur maison soient remerciées pour leur hospitalité et leur disponibilité sans lesquelles nous n'aurions pas pu recueillir les données nécessaires à la réalisation de cette thèse.

A nos parents, qu'ils sachent que leurs sacrifices financiers et matériels, leurs conseils et leurs prières n'ont pas été vains. Qu'ils trouvent ici nos remerciements les plus fraternels et les plus cordiaux. Nous voudrions particulièrement témoigner notre reconnaissance à mes frères **Fatogoma, Nicolas, Taltio Augustine, Pétin Louis**; la grande famille **Coulibaly** et à ma femme **Touré Karidja**

Nous ne saurions terminer cette liste sans exprimer à l'endroit du Service informatique de l'université d'Abobo-Adjamé et de tous nos amis, aînés et connaissances, en particulier **Yao Kouamé Gérard, Diallo Koffi, Doumbia Zoumana**, notre profonde gratitude.

Cette thèse, aussi importante soit-elle, n'est qu'une étape dans la carrière que nous souhaitons embrasser. Aussi, à nos Maîtres et à toutes les personnes dont nous avons toujours bénéficié des conseils et critiques, voudrions-nous réitérer notre volonté et notre disponibilité à continuellement apprendre à leur côté.

Que Dieu tout puissant, le Miséricordieux que je sers, bénisse chacun de nous pour sa contribution à la réalisation de cette thèse. **Amin...**

Je tiens à remercier **l'Agence Universitaire de la Francophonie** pour avoir financé cette thèse.

Résumé

La région de Katiola, située au centre de la Côte d'Ivoire est affectée par des variations climatiques. Cette région d'une superficie de 9.452 kilomètres carré est à cheval sur deux bassins versants, à l'ouest le bassin du Bandama et à l'est le bassin du Comoé. Malgré le manque actuel de ressources en eau, cette zone connaît une intense activité anthropique qui exige une mobilisation et une utilisation de cette ressource : périmètres sucriers dans les localités de Tafiré, parcelles de riz irriguées et activités pastorales dans tout le département.

Ce travail a pour objectif de localiser, à l'aide de la géostatistique et de la télédétection, les sites potentiels des puits et forages à créer. Les outils de la télédétection ont permis d'identifier les caractéristiques hydrogéologiques des formations géologiques en place. Une connaissance de la productivité des formations géologiques par l'étude des relevés de forages et de la télédétection peut permettre une meilleure compréhension des aquifères. L'objectif de cette étude est de mettre en place des valeurs de référence devant servir comme outils de gestion, de surveillance et d'aide à la prise de décision. Il s'agit également de rentabiliser le coût des forages en proposant un maximum d'ouvrages ayant des chances de succès et d'établir un lien entre ces informations (espacement, longueur, connectivité) et la circulation de l'eau souterraine.

Le traitement des images a permis de faire une cartographie assez détaillée des limites de bassin versant, du réseau hydrographique, et d'établir l'ordre des cours d'eau selon Strahler. Le calcul de l'Index Topographique d'Humidité montre bien la corrélation entre la topographie et les sols. Malgré l'étendue de notre zone d'étude, il a été possible de trouver une corrélation entre les index topographiques, la répartition des champs et les caractéristiques du sol. Ces résultats ont permis d'avoir une nette amélioration de la classification des sols et de l'occupation à partir de l'analyse d'images LANDSAT. Les images LANDSAT ont également permis de suivre le phénomène d'eutrophisation et de disparition des plans d'eau dû au changement climatique. Nous avons pu établir l'ordre d'apparition des végétaux sur les plans d'eau, ceci jusqu'à la disparition totale du cours d'eau.

Mots clés : Géostatistique, télédétection, SRTM, LANDSAT, puits et forages, vallée du Bandama, Katiola, Côte d'Ivoire.

Abstract

The Katiola region, located in central Côte d'Ivoire, suffers climatic variations. This region has an area of 9,452 km². It is straddling two watersheds, the Bandama basin to the West, and the Comoé basin to the East. Despite the lack of water resources, this area is experiencing an intense mobilization and use of water: sugar stores in the localities of Tafiré, paddy fields and irrigated pastoral activities across the department.

This work aims to locate potential sites for drilling wells using geostatistics and remote sensing. An understanding of the productivity of geologic formations by studying the records of boreholes and remote sensing can provide a better understanding of the aquifers in these formations. The objective of this study is also to establish benchmarks to serve as management tools, monitoring and even aid in decision making. The goal is also to make a maximum of successful drillings, and establish a link between these informations (spacing, length, connectivity) and groundwater movements.

This study presents the potential of the DEM SRTM images. Their processing allowed us to make a fairly detailed mapping of the boundaries of catchments, drainage network, and establish the order of watercourses according to the Strahler classification. The calculation of the Topographic Index Humidity shows the correlation between topography, soil and soil quality. Despite the size of our study area, it was possible to find a correlation between the topographic indices, the distribution of fields and soil characteristics. These results enabled us improving soil classification and occupation from LANDSAT imagery. Using LANDSAT images, we also monitored the eutrophisation and disappearance of surficial water bodies in the department. We could follow the order of appearance of plants on the water, until the total disappearance of the watercourse.

Table des matières

AVANT-PROPOS.....	2
Remerciements.....	3
Résumé	5
Abstract.....	6
Table des matières	7
Liste des tableaux	11
Liste des Figures.....	12
Liste des annexes	15
INTRODUCTION	16
INTRODUCTION	17
MILIEU D'ETUDE.....	20
1-Présentation du milieu d'étude	20
1.1-Localisation et découpage du site	20
1 .2 - La structuration administrative.....	21
1 .3 - Infrastructure routière	21
1 .4 - Population et besoins en points d'eau	21
1. 5-Milieus naturels.....	26
1.5.1 – Climatologie.....	26
1.5.2 – Hydrologie	27
1.5.3 – Végétation	28
1.5.4 – Géomorphologie.....	30
1.5.5 - Cadre géologique	31
1.5.5.1 - Unités géologiques	32
1.5.5.2- Caractéristiques structurales et hydrogéologique.....	35
1.5.6-Prospection hydrogéologique à partir des linéaments photogéologiques	36
Conclusion partielle	38

1.6-Concept de télédétection	38
1.6.1.- Les images de télédétection.....	39
1.6.2- Les conditions climatiques en télédétection.....	40
1.6.3- Choix des images	40
1.7- Concept de géostatistique.....	43
1.7.1- Principes de la géostatistique.....	43
1.7.2- Statistiques exploratoires et géostatistique.....	43
1.7.3- La stationnarité	44
1.7.4- Hypothèse intrinsèque.....	45
1.7.5- Le variogramme.....	45
1.7.6- Le krigeage	46
DEUXIEME PARTIE : APPROCHE METHODOLOGIQUE	48
2. MATERIELS ET METHODES	49
2.1-MATERIELS	49
2.1.1- Les données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)	49
2.1.2 - Les données LANDSAT	50
2.1.3 - Les données hydrogéologiques (relevés de puits et forages)	52
2.1.4 - Les données pluviométriques	54
2.1.5 - Les données cartographiques.....	55
2.1.6 - Logiciels de traitements	56
2.1.6.1- R	56
2.1.6.2- Mapwindow GIS	56
2.2-METHODES	57
2.2.1-Les corrections radiométriques et géométriques	57
2.2.2-La photo-interprétation.....	58
2.2.3- Les techniques de classification.....	59
2.2.4 –Traitements des images	60
2.2.4.1-Description des méthodes de traitement.....	60
2.2.4.2-Traitement des images LANDSAT	60
2.2.4.3- Traitement des images SRTM.....	61
2.2.4.4- Description et rôle des informations extraites	64
2.2.5-Traitement des données pluviométriques.....	68

2.2.6 -Traitement des données de puits et forages.....	69
La loi de Benford	70
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	71
3.1-RESULTATS DU TRAITEMENT DES RELEVES PLUVIOMETRIQUES.....	72
3.1.1- Caractéristique et évolution générale de la pluviométrie	72
3.1.2- Conclusion partielle	80
3.2-RESULTATS DU TRAITEMENT DES IMAGES SRTM.....	81
3.2.1-Caractérisation du relief du département de Katiola.....	82
3.2.2-Carte des sols cultivables	83
3.2.3-Principaux cours d'eau du département	85
3.2.4-Le réseau de drainage (ordre des cours d'eau selon Strahler)	87
3.2.5-Bassin hydrologique du département de Katiola	88
3.2.6-Conclusion partielle	90
3.3-RESULTATS DU TRAITEMENT DES IMAGES MULTISPECTRALES.....	92
3.3.1-Première observation.....	92
3.3.2- Deuxième observation.....	102
3.3.3-Conclusion partielle	103
3.4-RESULTATS DU TRAITEMENT DES RELEVES DE PUIITS ET FORAGES.....	104
3.4.1- Analyse et interprétation statistique	104
3.4.2- Analyse et interprétation qualitative	104
3.4.3-Carte du réseau de linéaments	106
3.4.4- Répartition de la profondeur de socle sur la zone d'étude	107
3.4.5-Modèle de répartition spatiale des débits	111
3.4.5.1-Variogramme omnidirectionnel	112
3.4.6-Productivité (débit) en fonction de profondeur de l'ouvrage	114
3.4.7- Caractéristiques des débits des puits et forages.....	116
3.4.8- Caractéristiques des puits et forages en fonction des formations	119
3.4.9- Conclusion partielle	122
CONCLUSION GENERALE	124
Perspectives	126
Bibliographie.....	127

<i>Annexes</i>	135
----------------------	-----

Liste des tableaux

Tableau I: Répartition de la population par sous préfecture (zone rurale et zone urbaine).....	24
Tableau II : Situation de l'hydraulique villageoise par sous-préfecture du département de Katiola en 2001	24
Tableau III: Récapitulatif des capteurs landsat.....	51
Tableau IV: Synthèse des données de puits et forages collectés sur le département de Katiola	54
Tableau V: Tableau des valeurs de pluviométrie utilisées dans le cadre de cette étude	55

Liste des Figures

Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude	20
Figure 2 : Approvisionnement à partir de puisard à Timbé.....	22
Figure 3 : Approvisionnement à partir d'une pompe à pédale Fononkaha.....	23
Figure 4: Village construit suivant le critère traditionnel à Kowara sous-préfecture de Katiola	26
Figure 5: Le fleuve du Bandama à Marabadiassa	28
Figure 6: Répartition de la végétation sur le département de Katiola	29
Figure 7: Mont Niangbo	31
Figure 8: Carte géologique du département de Katiola à 1/200 000 (reduite).....	33
Figure 9 : Exemple 1 de roche du complexe volcano-sédimentaire du Birimien dans la sous préfecture de Timbé	34
Figure 10: Profil des aquifères au sein des roches de socle.....	38
Figure 11: Exemple de puits rencontré fréquemment dans les champs et les campements	53
Figure 12: Puits équipé d'une pompe à manivelle	53
Figure 13: Forage non encore équipé	54
Figure 14 : Direction de calcul de l'algorithme de connexité huit.....	62
Figure 15: Exemple de comblement de trou ou de fermeture de puits par l'algorithme d8	63
Figure 16: Schéma d'interprétation d'un fichier à partir de l'algorithme de connexité huit	64
Figure 17: Ordre des cours d'eau selon Strahler	65
Figure 18: Pluviométrie annuelle de la sous-préfecture de Katiola de 1949 à 2000.....	75
Figure 19: Pluviométrie annuelle de la sous-préfecture de Tortiya de 1977 à 2002.....	75
Figure 20: Pluviométrie annuelle de la sous-préfecture de Tafiré de 1950 à 1998.....	76
Figure 21: Pluviométrie annuelle de la sous-préfecture de Seguela 1921 à 1996	77
Figure 22: Pluviométrie annuelle de la sous-préfecture Niakaramandougou de 1959 à 2000 .	77
Figure 23: Pluviométrie annuelle de la sous-préfecture de Mankono de 1937 à 2000	78
Figure 24: Pluviométrie annuelle de la sous-préfecture de Dabakala de 1922 à 2000	79
Figure 25: Pluviométrie annuelle de la sous-préfecture de Bouaké de 1910 à 2000	79
Figure 26 : Modèle numérique de terrain du département de Katiola, vue en 3d.....	82
Figure 27: Relief du département de Katiola.....	83

Figure 28 : Carte du réseau hydrographique et des terres potentiellement cultivables.....	84
Figure 29 : Carte d'occupation des sols par les champs superposée au réseau de drainage d'ordre 4.....	85
Figure 30: Réseau hydrographique permanent de la vallée du Bandama.....	86
Figure 31 : Phénomène d'érosion sur la digue du barrage de Kafiné	87
Figure 32: L'ordre des cours d'eau selon strahler.....	88
Figure 33: Bassins versants du département de Katiola	90
Figure 34: Disparition de cours d'eau	95
Figure 35: Végétaux numérotés en fonction de l'ordre d'apparition dans le cours d'eau.....	96
Figure 36: Les eaux non polluées apparaissent en noir tandis que les eaux polluées par les plantations sucrières apparaissent en bleu ciel	99
Figure 37: Nadanakaha village créé par migration de population situé dans la sous-préfecture de Niakaramandougou	100
Figure 38: Disparition des cours d'eau (photo réalisé en mai 2008).....	101
Figure 39: Barrage à vocation agricole, cartographié grâce aux images Landsat à Kafine sous- préfecture de Niakaramandougou.....	102
Figure 40: Distribution selon Benford de débits, de profondeurs de socle, de types d'ouvrage et profondeur totale.....	105
Figure 41 : Carte du réseau de lineaments.....	107
Figure 42: Modèle numérique des courbes de niveaux statiques des puits et forages exécutés sur le département de Katiola, en millimètres.....	108
Figure 43: Modèle numérique des niveaux statiques des puits et forages exécutés sur le département de Katiola, obtenus par krigeage	109
Figure 44: Légende du modèle numérique des niveaux statiques de la figure 43 en millimètres	110
Figure 45: Variance du modèle numérique des niveaux statiques exprimant les erreurs d'estimation.....	111
Figure 46 :Variogramme omnidirectionnel	112
Figure 47 :Variogramme suivant les quatre directions principales de l'espace.....	113
Figure 48: Carte du modèle numérique des débits obtenus par krigeage.....	114
Figure 49: Légende du modèle numérique des débits de la figure 48.....	115
Figure 50: Dispersion autour des valeurs du modèle numérique des débits.....	115
Figure 51: Débit moyen en fonction de la profondeur	117
Figure 52: Débit moyen en fonction de l'aquifère	118

Figure 53: Débit moyen en fonction de la géomorphologie	119
Figure 54: Puits et forages en fonction de la profondeur de socle, du débit et du type d'altération	120
Figure 55 : Puits et forages en fonction de la profondeur de socle, du débit et des formations	121
Figure 56: Puits et forages exécutés sur le degré carré de Katiola en fonction de la profondeur totale, du débit et du type d'altération	121
Figure 57: Puits et forages exécutés sur le degré carré de Katiola en fonction de la profondeur totale, du débit et des formations géologiques	122

Liste des annexes

Annexe 1 : Tableau détaillé des populations par versant en fonction du lieu d'habitation.

Annexe 2 : Carte des villes et villages du département de versant

INTRODUCTION

INTRODUCTION

La modélisation des changements environnementaux ainsi que la mise en place d'initiatives de gestion rationnelle des ressources naturelles et humaines dans les domaines de l'aménagement du territoire et de la politique de développement passent par une meilleure connaissance de l'occupation du sol et de son utilisation. C'est dans cette optique que se fait ressentir le besoin croissant de cartographier et décrire avec précision la couverture et l'occupation du sol afin d'organiser l'espace et de préserver les ressources naturelles (Corbane *et al.*, 2004). La cartographie géologique est à la base de toute prospection du sol et du sous-sol. Bien qu'elles soient précises, les méthodes conventionnelles de cartographie et d'exploration nécessitent un travail long, laborieux, coûteux et souvent à haut risque (El Harti *et al.*, 2004). La nature des formations géologiques qui sont témoins d'une présence d'eau ou encore qui contrôlent les propriétés hydrogéologiques des aquifères est encore complexe malgré les études hydrogéologiques qui ont été réalisées pour mieux comprendre leurs interactions. L'identification des formations qui contrôlent l'écoulement et la compréhension des puits et forages qui produisent plus que d'autres dans une même formation sont des questions encore difficiles à résoudre. Des outils récents, tels que la télédétection et la géostatistique, permettent une meilleure compréhension des systèmes hydrogéologiques et une bonne connaissance de la géométrie des différents aquifère en milieu de socle. La télédétection est une discipline ayant pour objet l'analyse des informations portées par les rayonnements électromagnétiques issus de la surface de la Terre ou de celle d'autres planètes, captés à distance par des instruments aéroportés ou spatiaux (Chorowicz, 1980). Cet outil développe des techniques et des méthodes qui interviennent à plusieurs niveaux : 1) le choix et l'acquisition des données, 2) le traitement des données, incluant leur mise en forme et leur restitution (chaîne de traitement de l'image), 3) l'analyse et l'interprétation des données, incluant la photo-interprétation. Cette définition exclut de la télédétection les autres mesures physiques de types acoustique, sismique, magnétique, gravimétrique, radiométrique (rayonnement gamma) et électrique, mais inclut les photographies aériennes et la vidéographie (Chorowicz et Deroin 2003). La télédétection constitue donc une source d'informations très importante en sciences de la terre. Elle permet la distinction spatiale et spectrale des caractéristiques structurales et géologiques (Gwyn, 1989 in Merzouk *et al.*, 1990). En géomorphologie et géologie, la cartographie par télédétection spatiale est devenue incontournable et complémentaire des travaux de terrain. Depuis quelques années, le

développement des Systèmes d'Information Géographique (SIG) permet de disposer d'un référentiel géographique précis et fiable et, dans la mesure du possible, transposable en tout point du globe (Chorowicz et Deroin, 2003). La vue synoptique que permet cette technique est un atout important pour l'interprétation à l'échelle régionale (Merzouk *et al.*, 1990).

La géostatistique, quant à elle, est une discipline à la frontière entre les mathématiques et les sciences de la terre. Son premier domaine d'utilisation a été l'estimation des gisements miniers. Son domaine d'application actuel est beaucoup plus large et tout phénomène spatialisé peut être étudié à l'aide de la géostatistique.

La télédétection et la géostatistique seront utilisées comme méthode et moyen d'investigation, pour contribuer à la connaissance des aquifères, de l'écoulement et la gestion des eaux souterraines.

Les objectifs de la présente étude dont le thème est « Répartition spatiale, Gestion et Exploitation des eaux souterraines : *Cas du département de versant, région des savanes de Côte d'Ivoire* » ; sont (1) de rentabiliser le coût des forages en proposant le maximum d'ouvrages ayant des chance de succès, (2) d'établir un lien entre les formations et la circulation de l'eau souterraine, (3) de mettre en place des modèles pouvant servir comme outils de gestion, de surveillance et voire même d'aide à la prise de décision.

Ces perspectives sont très grandes et demandent de gros moyens d'investigation. Nous utiliserons dans cette étude des données de puits, de forages et des images satellitaires réalisés sur notre zone d'étude.

Cette étude s'articule autour de trois axes principaux :

- i. l'examen des images satellitaires, afin d'extraire l'évolution des cours d'eau, les bassins versants et le réseau hydrographique ;
- ii. l'analyse statistique de l'évolution de la pluviométrie en utilisant le réseau de mesure pluviométrique des bassins versants de notre zone d'étude;
- iii. la simulation géostatistique des paramètres des données de puits et forages visant à identifier les différents aspects et paramètres conditionnant les débits. Ce mémoire se subdivise en trois grandes parties :

La première partie de cette étude sera avant tout introductive et consistera en une présentation de la zone d'étude. Elle décrira notre étude dans son contexte climatique et géologique. Les caractéristiques hydroclimatiques et hydrogéologiques propres à notre zone d'étude seront évoqués.

La deuxième partie présentera le matériel, les méthodes et les données de base de l'étude. En effet, de nombreuses méthodes existent pour aborder notre problématique. Le choix opéré

sera fonction des objectifs poursuivis mais aussi du degré de précision des résultats attendus. Elle détaillera les techniques de mesure, de calcul, d'estimation et de validation. L'analyse concernera l'ensemble des données, la vérification de la cohérence des données collectées par une étude comparative des mesures de différentes sources.

La *troisième partie*, présentera les résultats issus des différentes méthodes de travail. On suivra une démarche séquentielle pour étendre les résultats ponctuels à toute la zone d'étude. Ce chapitre aura trait à une généralisation spatiale et temporelle des principaux résultats et marquera, en quelque sorte, le terme de notre démarche.

En définitive, l'analyse de l'ensemble des résultats permettra de mieux organiser le suivi des paramètres hydrogéologiques établis dans l'espace et le temps par la combinaison de modèles hydrogéologiques et des techniques de télédétection spatiale.

MILIEU D'ETUDE

1-Présentation du milieu d'étude

1.1-Localisation et découpage du site

La région de versant est comprise entre les longitudes 5° et 6° ouest et les latitudes 8° et 9° nord, ce qui correspond à la zone UTM 30 Nord. Ce département est situé à environ quatre cent kilomètres d'Abidjan (capitale économique de la Côte d'Ivoire) et à cent quarante kilomètres de Yamoussoukro (capitale politique) (Geomines, 1982).

Le département fait partie de la région administrative dite « région de la vallée du Bandama », située au Centre-Nord de la Côte d'Ivoire. Il est limité par les départements de Bouaké et de Béoumi au Sud, de Ferkéssédougou au Nord, de Korhogo au Nord-Ouest, de Mankono à l'Ouest et de Dabakala à l'Est. Il couvre une superficie totale de 9 452 km² (figure 1).

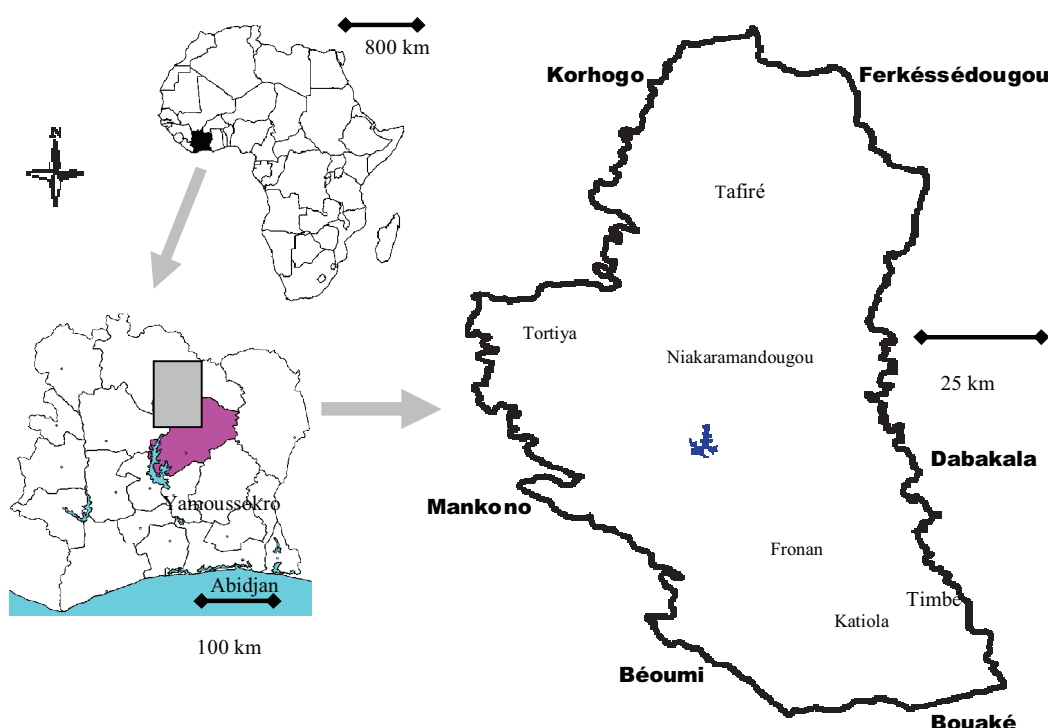


Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude

1.2 - La structuration administrative

Le département de Katiola est composé de six sous-préfectures presque alignées du Sud au Nord. Dans la partie extrême Sud se trouve, la sous-préfecture de Katiola, chef-lieu du département, et celle de la sous-préfecture de Timbé. Au Nord de ces deux sous-préfectures et dans l'autre moitié Sud du département, se trouve celle de Fronan. Au Nord de la sous-préfecture de Fronan, se situe celle de Niakaramandougou (ou Niakara), dans la zone centre du département. A l'ouest de la sous-préfecture de Niakaramandougou, se trouve celle de Tortiya. Enfin, au Nord de la sous-préfecture de Niakaramandougou, est située celle de Tafiré, (Monographie du département de Katiola, 2003)

1.3 - Infrastructure routière

Le département, dans sa partie Est, est traversé par le grand axe routier Nord-Sud bitumé qui est la route principale d'Abidjan (capitale économique) vers le Nord, c'est-à-dire le Burkina Faso et le Mali. Cette route relie entre elles les principales sous-préfectures : Katiola, Fronan, Niakaramandougou, Tafiré (Geomines, 1982). En direction de l'Est, passant par la sous-préfecture de Timbé, une seule voie relie Katiola à Dabakala. De Niakaramandougou, une piste rejoint Tortiya. Les pistes du département sont praticables toute l'année. En fait, tous les chefs-lieux des sous-préfectures de la région sont facilement joints ; les difficultés consistent à atteindre les villages qui rayonnent autour de ces villes (Monographie de département de Katiola, 2003). Les villages les plus difficiles à joindre sont ceux du département de Tortiya. Dans l'ensemble, les pistes de cette sous-préfecture sont praticables toute l'année. Il subsiste une large bande du Nord-Ouest vers le Sud-Est et les alentours du Bandama qui demeurent difficilement accessibles mais aucun village n'y est recensé.

1.4 - Population et besoins en points d'eau

Dans les pays en voie de développement, dont l'économie repose, très largement sur le secteur agricole, l'estimation des ressources en eau disponibles se révèle un problème crucial. Les zones semi-arides ne font pas exception, mais elles comportent des spécificités qui rendent cette tâche difficile. Les mesures sont rares et difficiles à acquérir (Ardoin, 2001). Les ressources en eau du département de Katiola sont caractérisées par une très forte sensibilité aux aléas climatiques. Cette zone est soumise à un régime climatique tropical de transition ou climat soudanais, caractérisé par l'alternance d'une seule saison des pluies et d'une longue saison sèche. La croissance démographique, l'exode vers les terres plus fertiles et le changement climatique créent un besoin croissant en eau qui se résout en grande partie par des approvisionnements par des puits et forages dans les anciens villages (Figures 2 et 3) et

par des puisards et des marigots dans les nouveaux villages (campement autour des plantations). Une recrudescence des maladies hydriques et des maladies liées sont à craindre suite à la raréfaction et la dégradation des ressources en eau. Nous avons estimés les prélèvements quotidiens effectués à Arikokaha sous-préfecture de Niakaramandougou, à partir du registre du « gestionnaire d'eau » la consommation domestique (puisage) villageoise de l'ordre de 25 litres par habitant par jour. Cela s'explique par le fait que durant les jours de pluie les villageois recueillent de l'eau pour les besoins quotidiens, et ne vont s'approvisionner à la fontaine que pour satisfaire les besoins d'eau de boisson et de cuisson. Seuls les chefs lieu de sous-préfectures et quelques villages voisins bénéficient de l'adduction en eau potable.



Figure 2 : Approvisionnement à partir de puisard à Timbé



Figure 3 a: **Approvisionnement à partir d'une pompe à pédale Fononkaha**



Figure 3 b : **Approvisionnement à partir d'un forage équipé d'un château à Arikoha**

Actuellement, toutes les six sous-préfectures présentent une bonne infrastructure de base: électrification, adduction d'eau, école et centre de santé. Dans chacune d'elles existe une infrastructure commerciale (supermarché, marché, boutique). Katiola a été le siège des fêtes de l'indépendance en 1979 et un très gros effort d'infrastructure a été réalisé: adduction d'eau, éclairage public, hôtels, logements, bâtiments administratifs, bitumage des routes, marché, etc. Les besoins en eau de la ville de Katiola sont pratiquement couverts.

Les villages ont une population faible mais stable. Au dernier recensement officiel de la population, effectué en 1998, le département comptait 165 652 habitants, soit une densité de population d'environ 18 habitants au km² (Monographie du département de Katiola, 2003). Selon l'Institut National de Statistique (INS) cette population serait légèrement inférieure (164 326 habitants). Par sous-préfecture, la population se répartit comme suit selon l'INS (Tableau I).

Tableau I: répartition de la population par sous préfecture (zone rurale et zone urbaine)

SOUS PRÉFECTURE	POPULATION		
	urbaine	rurale	total
Katiola	38515	9649	48164
Niakaramandougou	8254	23327	31581
Tafiré	13518	14559	28077
Tortiya	23080	6981	30061
Timbé	1419	5918	7337
Total	84 786	60434	145220

(Source: recensement générale de la population et de l'habitat de 1998 (synthèse effectué par l'INS)

Le tableau II présente la répartition des ouvrages hydrauliques dans les différentes sous-préfectures.

Tableau II : situation de l'hydraulique villageoise par sous-préfecture du département de Katiola en 2001

Sous-préfecture	nombre de villages	ouvrages		taux de couvertures en %	nombres de pompes			taux de panne en %
		exploités en HV	exploités en HVA		en exploitation	en marche	en panne	
Katiola	23	18	0	62	18	18	0	0
Niakara	30	34	3	56	34	31	3	9
Tafiré	17	15	1	60	15	12	3	20
Tortiya	8	17	0	81	17	10	7	41
Timbé	9	11	1	65	11	9	2	18
Total	87	95	5	64, 8	95	87	15	17,6
Sources : sous direction de l'hydraulique villageoise améliorée du ministère des infrastructures économiques HV : Hydraulique Villageoise ; HVA : Hydraulique Villageoise Améliorée								

Il faut noter que, par manque d'activités économiques suffisamment rémunératrices, phénomène accentué par la crise de 2000 à 2004, le département subit un important flux migratoire. Cela se manifeste par l'exode des jeunes vers les chefs-lieux de sous-préfecture et vers les régions sud de la Côte d'Ivoire. Depuis 2000 la découverte de nouveaux sites aurifères a créé un nouveau flux migratoire des populations rurales vers ces sites d'orpaillage. Ils sont situés à Wattraban à l'Est de la sous-préfecture de versant, Onandièkaha au Sud et Loho à l'Est de la sous-préfecture de Niakaramandougou (Voir carte du département de Katiola en Annexe). La population est composée d'autochtones qui sont les Tagbana et les Mangoro. A côté de cette population, vivent en parfaite harmonie d'autres ressortissants majoritairement de la sous-région ouest africaine. Le « sexe ratio » entre hommes et femmes est équilibré, mais avec un léger avantage aux hommes (à peine 4%). Les populations urbaines des sous-préfectures de Katiola et de Tortiya sont plus élevées que celles vivant en zone rurale. Pour Katiola, la disproportion des deux populations s'explique par le fait que dans le chef-lieu de département toutes les infrastructures publiques sont concentrés : Administration, Etablissements d'Enseignement Secondaire, Formations de Santé Secondaire et Tertiaire, etc. Quant à Tortiya, elle a été un centre d'exploitation diamantifère, exploitation sporadique qui a permis de doter la ville d'infrastructures relativement importantes. Dans la sous-préfecture de Tortiya se posent des problèmes d'accès aux villages éloignés du chef lieu de sous préfecture. Ses populations rurales sont plus importantes que celles vivant dans la zone urbaine des sous préfecture de Tortiya et des autres sous préfecture. La sous-préfecture de Fronan est un regroupement de plusieurs villages,.

Niakaramandougou est un carrefour routier. Les villages dépendant de cette sous-préfecture sont souvent au bord de l'axe routier Katiola - Korhogo et ceux qui sont éloignés de cet axe routier (Katiola - Korhogo) sont difficiles d'accès facile.

Dans l'ensemble, les sous-préfectures présentent un habitat moderne et équipé. Les villages sont encore souvent construits selon les critères traditionnels (figure 4), mais il est à remarquer la tendance à bâtir en dur : briques, ciment, tôle, etc. Du point de vue de l'hydraulique villageoise, le département de Katiola dépend de l'antenne de Bouaké.

Les cultures traditionnelles sont l'arachide, le maïs, l'igname, le manioc, le mil, le sorgho et, plus au Nord, les agrumes. L'activité socio-économique, hormis dans les chefs-lieux de sous-préfecture, est essentiellement rurale et basée sur des cultures pluviales (absence d'irrigation).



Figure 4: Village construit suivant le critère traditionnel à Kowara sous-préfecture de Katiola

1. 5-Milieux naturels

1.5.1 – Climatologie

Le climat d'Afrique tropicale a connu une alternance de périodes humides et sèches, en réponse à des changements globaux du climat. On observe un accroissement par étapes de l'aridité depuis 3 millions d'années. Les changements observés impliquent des interactions entre facteurs orbitaux (activité solaire...), conditions de surface des océans et végétation (Gasse, 2006). L'Afrique de l'Ouest est sous le régime de la mousson. La sécheresse en cours depuis le début des années 1970 est caractérisée par une diminution de la pluviométrie de l'ordre de 20 à 30% (Kamagaté, 2007). Les systèmes climatiques jouent un rôle essentiel dans l'équilibre climatique global de notre planète et conditionnent la survie de populations vivant dans la ceinture intertropicale. Ceci est particulièrement vrai pour la mousson africaine, qui connaît depuis une trentaine d'années une importante perturbation de son fonctionnement, aux conséquences visibles sur le cycle hydrologique et le couvert végétal. Quant aux régimes tropicaux, ils présentent deux particularités. D'une part, leur cycle saisonnier est bien marqué et plus stable d'une année à l'autre ; d'autre part, la hauteur de pluie est en général inférieure à l'évapotranspiration, notamment pour les zones semi-arides situées en région sub-tropicale. Le total pluviométrique annuel est bien souvent comparable ou supérieur au total pluviométrique des régions tempérées (Lebel, 2005). La majeure partie du département de Katiola est soumise au climat soudanais, régime tropical de transition entre les zones semi-arides sub-sahariennes et les zones tropicales humides du golfe de Guinée, avec un maximum

de pluie en juillet, août et septembre et une période de sécheresse en décembre, janvier et février. Le climat est réglé par le déplacement du Front Intertropical (FIT). Les précipitations annuelles sont presque les mêmes pour l'ensemble du département, avec une moyenne annuelle de 800mm de pluies et une moyenne mensuelle de 1200mm pour les mois de juin à septembre. Cependant, on relève qu'un phénomène cyclique, environ tous les cinq ans, fait varier cette moyenne annuelle entre 800mm et 900mm de pluies (Geomines, 1982). La température moyenne annuelle est de 28°C. La saison sèche de novembre à février est dominée par l'harmattan, vent sec et frais qui souffle des zones sahéliennes du nord vers le sud. Il se caractérise par de basses températures la nuit. Les moyennes et hautes eaux apparaissent durant la saison pluvieuse ce qui entraîne souvent le doublement de la végétation herbeuse.

1.5.2 – Hydrologie

Le département est parcouru par les affluents de deux fleuves qui constituent eux-mêmes les limites naturelles territoriales du département. Il s'agit des fleuves N'zi à l'Est et Bandama à l'Ouest. Le département de Katiola est largement drainé par le Bandama et ses affluents. Le Bandama coule du Nord au Sud. La plus grande partie de la zone étudiée est drainée par le Bandama et ses affluents (Bou, Naranou, Nabion). A l'Est, une grande partie de la bande de schistes et grauweekes ainsi que la région de la sous-préfecture de Timbé sont tributaires du N'Zi, par l'intermédiaire de ses affluents (Loho, Kiohan). Il n'y a pas de différence nette d'incision des versants entre ces différents bassins. Le cours du Bandama est étroitement lié à la géologie. Dans sa partie septentrionale il serpente sur une mince bande de schistes, bloqué à l'Est par la bande du granite de Ferké. Puis il traverse cette bande à son point le plus étroit (seuil rocheux). Il reprend ensuite un tracé plus sinueux sur les schistes et grauweekes birimiens. Le seuil rocheux a bloqué l'érosion régressive. A l'aval la pente générale est de 0,6%, alors qu'elle n'est que de 0,15% à l'amont, d'où le grand nombre de méandres dans le cours supérieur. Le Bou est pérenne, de direction ONO-ESE, et présente la même particularité, avec un seuil situé à vingt kilomètres du confluent (Poss, 1982). Le Naranou est plus au Sud, de même direction que le Bou, mais intermittent. En provenance du Nord-Est, la rivière Nabion se jette dans le Bandama, une trentaine de kilomètres en amont de Marabadiassa (figure 5). Cette rivière est pérenne.

Le régime hydrologique est du type équatorial de transition atténué (Sircou'lon *et al.*, 1982). Le régime des cours d'eau reflète le régime des précipitations. Ce régime se traduit par une crue unique en août, septembre et octobre suivie d'un tarissement rapide en novembre,

décembre puis une longue période de basses eaux de janvier à mai. Le tarissement des différents cours d'eau est court avec une durée moyenne de 50 à 60 jours (2 mois). La décrue est rapide autour d'une dizaine de jours. Toute la traversée du département par le Bandama se fait sur les flyschs éburnéens sauf le passage de la bande de granites médiane. Son cours est très sinueux dans la moitié nord, avec de très larges méandres sur les schistes, il se redresse lors de la traversée des granites et reprend de petits méandres sur les métasédiments.



Figure 5: Le fleuve du Bandama à Marabadiassa

1.5.3 – Végétation

Depuis l'accord interafricain sur la définition des types de végétation de l'Afrique tropicale (1957), on appelle savane, « une formation herbeuse comportant une strate herbacée supérieure continue d'au moins 80 centimètres de hauteur, qui influence une strate inférieure; graminées à feuilles planes, basilaires et caulinaires. Suivant l'importance ou l'absence du peuplement forestier, la savane devient :

- une savane arborée (arbres et arbustes formant un couvert généralement clair),
- une savane arbustive (arbustes disséminés),
- une savane herbeuse (arbres et arbustes ordinairement absents) ».

Les savanes herbeuses se rencontrent le plus souvent sur des plateaux déboisés, dans les interruptions de galeries forestières ou dans les bas-fonds marécageux. Des îlots d'importance moindre se localisent au bord des chemins ou des routes (Adjanohoun, 1964). Elles sont particulièrement nombreuses dans la zone très peuplée délimitée par les agglomérations de

Niakaramandougou, Tortiya, Tafiré, Marabadiassa, Katiola. La végétation de cette région appartient à la partie méridionale du domaine soudanais.

Il s'agit plus précisément du domaine subsoudanais, secteur soumis au climat tropical subhumide et dont la forêt caractéristique est la forêt claire. Cette forêt a été dégradée par l'action de l'homme qui la brûle pour y cultiver la terre. Elle ne subsiste plus qu'à proximité des villages ou dans les parcs. La dégradation de cette forêt crée la savane qui prend le nom de savane boisée, arborée, arbustive ou herbeuse en fonction de son couvert végétal (figure 6). A côté de cette forêt claire et de la savane qui en résulte, existent des îlots forestiers sur les plateaux et des forêts galeries qui bordent les vallées et sont directement liées aux cours d'eau. Les principaux îlots forestiers inclus en savane sont localisés sur le complexe volcano-sédimentaire composé principalement de schistes et de roches basiques : c'est le cas des îlots de Marabadiassa (ORSTOM, 1971). On retrouve la forêt peu dégradée de part et d'autre du Bandama et surtout dans la partie ouest des zones à faible population entre les sous-préfectures de Tortiya et Tiéningboué (Anonyme, 2003).

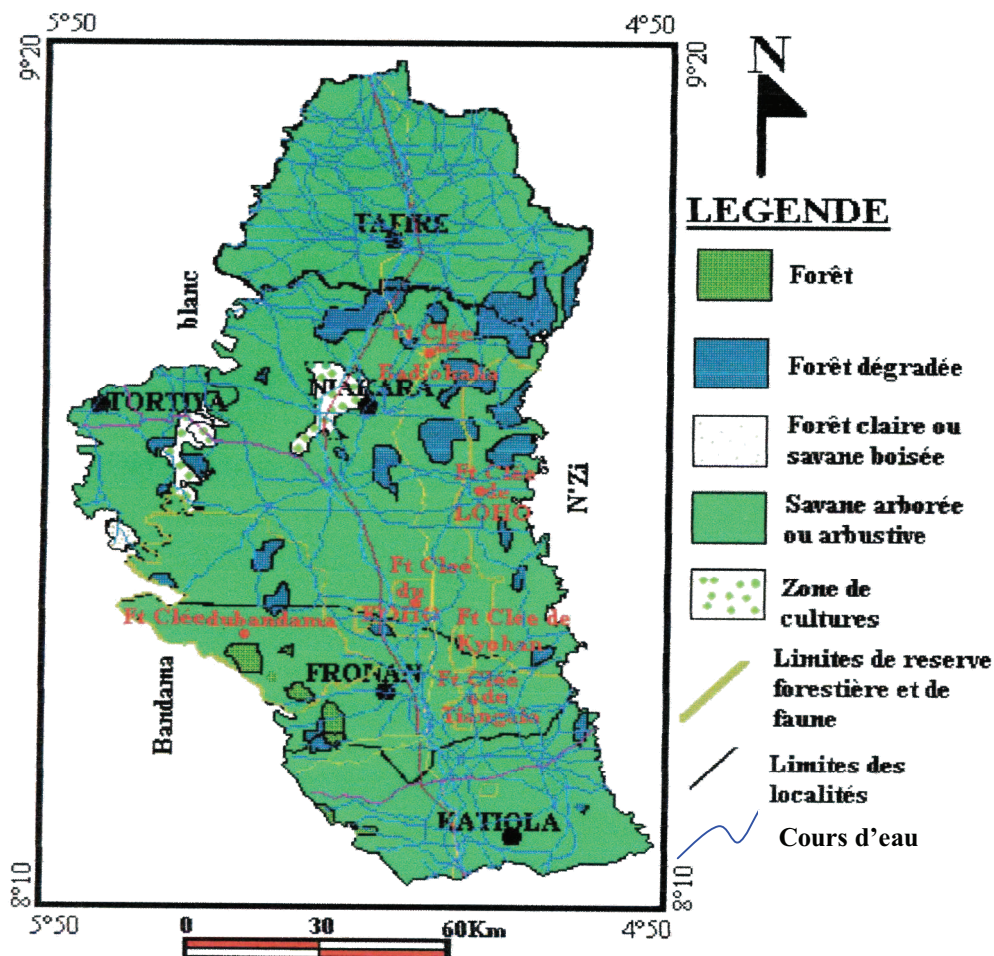


Figure 6: Répartition de la végétation sur le département de Katiola

1.5.4 – Géomorphologie

L'évolution morpho-pédologique s'explique essentiellement par l'altération des matériaux cuirassés et l'enfoncement vertical des couvertures de sol. Les différenciations latérales ne jouent qu'un rôle très limité. L'importance des changements climatiques, de la dynamique forestière, de la fonte géochimique des matériaux ferrugineux, des niveaux hydrostatiques et des héritages latéritiques dans l'évolution des sols et des modèles de la zone intertropicale humide d'Afrique est présente dans les paysages (Biton *et al.*, 2004). Les paysages de Katiola peuvent être regroupés en cinq grands ensembles morpho-pédologiques qui sont : (1) paysage à sommet cuirassé; (2) paysage à sommet convexe ou plan convexe ; (3) paysage d'inselbergs ; (4) paysage de collines de roches mélanocrates ; (5) paysage de forme à tendance "demi orange" en zone forestière.

Les sols en Côte d'Ivoire sont formés à partir de l'altération des roches métamorphiques du substrat. Les sols n'ont pas été rajeunis par une activité tectonique; ils sont anciens et souvent fortement altérés (Deirdre, 2003). La cartographie régionale réalisée selon l'approche morpho-pédologique a révélé que l'évolution des sols du département de Katiola dépend des processus pédogénétiques suivants : induration ou cuirassement, remaniement, pédoplasation, altération, appauvrissement et hydromorphie (ORSTOM, 1987). L'induration apparaît comme le processus le plus important et est en effet très représentée dans le Nord de la Côte d'Ivoire. Quatre grands ensembles fortement individualisés se succèdent de l'ouest à l'est. Au sein des granites, certaines variations pétrographiques présentent une incidence pédologique importante : les zones d'embranchites et d'anatexites sont liées à des affleurements rocheux abondants sur les versants ; le petit pointement de granite hyperalcalin du sud donne un paysage à sols sableux peu profond où les affleurements sont fréquents. La partie centrale du département est occupée par une bande de granite à deux micas (type Ferké). C'est un granite tarditectonique intrusif qui a fortement compressé les compartiments qui le bordent (litage subvertical). Les zones de bordure sont fortement hétérogènes et fracturées (pollutions et pressions lors de la montée), ce qui a conduit à la formation de nombreux inselbergs et zones d'affleurements. Par contre, la zone centrale est beaucoup plus calme. La limite orientale est brutale et soulignée par une différence d'altitude avec le compartiment voisin (plus 50 mètres en moyenne). La bordure ouest est également bien marquée au nord (vallée du Bandama), mais elle s'estompe vers le sud. Ce granite est caractérisé par la grosseur de ses grains de quartz (forte proportion de la classe 2-5 millimètres) (Poss, 1982).

Il s'agit d'une région de plateaux très monotone dont l'altitude moyenne est légèrement supérieure à 300 mètres avec un léger fléchissement vers le Sud-Est dans la région de Katiola où l'altitude est d'environ 250 mètres. Les reliefs sont ici essentiellement des restes de cuirasse latéritique. Selon Biton (2004), ces interfluves cuirassés ont été découpés par enfoncement d'un réseau hydrographique secondaire installé suivant des axes de circulation privilégiée de l'eau, tels que les fractures du socle cristallin ; il en est résulté une succession de courts versants convexes, caractéristiques de la zone intertropicale forestière humide d'Afrique. Seul au Nord-Est de Niakaramandougou émerge le mont Niangbo qui culmine à 694m ; c'est un dôme granitique (figure 7). Du centre inférieur, en direction du Nord-est, il subsiste un alignement de collines d'une altitude moyenne de 400m (Geomines, 1982). De par sa végétation de savane, cette région est très sensible au ruissellement et au phénomène de cuirassement, son relief est donc marqué par une alternance de glacis et de zones déprimées.



Figure 7: **Mont Niangbo**

1.5.5 - Cadre géologique

La carte géologique est construite de manière systématique dans tous les pays car elle représente la connaissance du sous-sol qui renferme de nombreuses richesses. Il s'agit de représenter les terrains d'après leur nature lithologique (c'est-à-dire la nature dominante des roches) ou stratigraphique (c'est-à-dire en fonction de leur âge) (Sorel et Vergely, 1999). L'intérêt scientifique, social et économique des cartes géologiques et géomorphologiques est grand car elles constituent la synthèse d'une partie essentielle des connaissances de base. Ces cartes sont le seul moyen de représenter les objets ou les phénomènes mis en jeu, car les

dimensions de ceux-ci sont le plus souvent telles qu'ils ne sont pas observables directement. Les applications sont nombreuses : exploration minière et pétrolière, recherche de matériaux de construction ou de granulats, recherche de sites pour le stockage des déchets de diverses natures, recherche et gestion des ressources en eau, géothermie, etc. Ces cartes sont essentielles pour évaluer la vulnérabilité des terrains face aux aléas géologiques : inondation, éruption volcanique, coulée de boue, effondrement de falaises, remontée de nappes aquifères, affaissement de terrain dû à des cavités souterraines, etc. Enfin, ces cartes sont indispensables pour optimiser les grands aménagements et tous les grands travaux, tels les barrages hydrauliques ou les grands tracés routiers ou ferroviaires (Chorowicz et Deroin, 2003).

1.5.5.1 - Unités géologiques

Le craton d'Afrique de l'Ouest correspond à un domaine d'environ 4 500 000 km², constitué de terrains archéens et paléoprotérozoïques. Au nord, ce craton disparaît sous les sédiments du bassin de Tindouf. À l'ouest, il est limité par les chaînes panafricaines et hercyniennes des Rokelides, des Bassarides et des Mauritanides (Sougy, 1962). Au centre, il est recouvert par les sédiments néoprotérozoïques et paléozoïques du bassin de Taoudeni, qui isolent deux dorsales, l'une au sud, correspondant à la dorsale de Léo, la seconde au nord, correspondant à la dorsale Rgueibat. La croûte archéenne du craton ouest-africain a été édifiée, déformée et métamorphisée dans des conditions métamorphiques de moyen à haut grade, pendant les cycles pré-léonien (~3500 Ma) (Thieblemont *et al.*, 2001), léonien (~2900–3000 Ma) et libérien (~2700–2800 Ma). Les formations paléoprotérozoïques correspondent, pour une large part, à des roches sédimentaires et volcaniques birimiennes affectées vers 2,1 Ga par un événement thermo-tectonique majeur (orogénèse éburnéenne) associé à un épisode de formation de croûte continentale juvénile (Baghdadi *et al.*, 2005) (figure 9a et 9b). En Côte d'Ivoire, à l'instar de toutes les régions tropicales d'Afrique Occidentale, se posent des problèmes structuraux concernant de vastes surfaces. La cartographie géologique est encore incomplète et imprécise. La rareté des affleurements et la puissante couverture latéritique d'épaisseur supérieure à 10 mètres rendent difficiles les campagnes de cartographie (Koffi, 1998). La géologie de la Côte d'Ivoire est constituée à 97,5 % de socle cristallin et cristallophyllien, l'essentiel des ressources en eau est donc contenu dans les aquifères formés par le socle fracturé dont l'importance hydrogéologique est considérable. Elle se situe au cœur de la dorsale de Man dont les unités lithologiques sont affectées par trois orogénèses : Léonienne (3.5-2.9 Ga), Libérienne (2.9-2.4 Ga) et Eburnéenne (2.4-1.6 Ga) (Camil, 1984 ; Kouamelan, 1996 ; Koffi, 1998). À l'est le domaine paléoprotérozoïque « Baoulé-Mossi » est

constitué de croûte juvénile, édifié et structuré principalement entre 2.2 et 2.1Ga. Il renferme le birimien, constitués d'ensemble volcano-sédimentaires et plutono-volcaniques juvéniles, mis en place sans contamination par une croûte ancienne (Abouchami *et al.*, 1990 ; Boher *et al.*, 1992 ; Koffi, 1998).

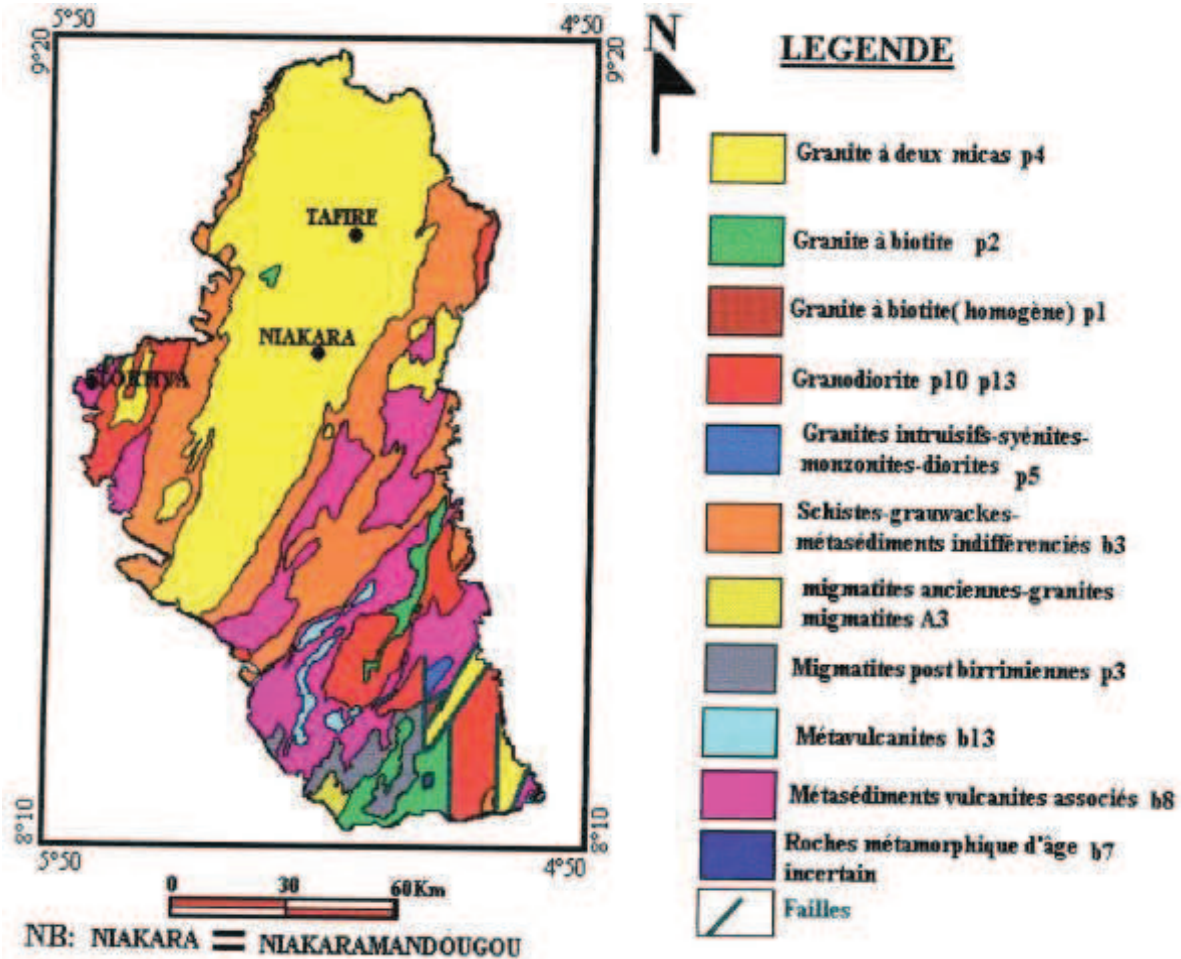


Figure 8: Carte géologique du département de Katiola à 1/200 000 (réduite)

Source (Geomines)

Les formations géologiques du département de Katiola appartiennent au birimien ou encore paléoprotérozoïque (Doumbia *et al.*, 1997). En partant de la frontière Est du département jusqu'à Katiola passant par Marabadiassa et la rive droite du Bandama, s'étend une large bande de flyschs birimiens bordés au nord de Katiola, dans la partie sud-est, par les roches du complexe volcano-sédimentaire, elles-mêmes entourant un grand massif intrusif. L'orientation générale de ces structures est NNE-SSO (figure 8). L'extrême sud-est est occupé par des granites éburnéens (Geomines, 1982).



Figure 9 a : Exemple 1 de roche du complexe volcano-sédimentaire du birimien dans la sous préfecture de Timbé



Figure 9 b: Exemple 2 de roche du complexe volcano-sédimentaire du birimien dans la sous préfecture de Timbé

Symétriquement à cette structure et presque suivant une diagonale, on retrouve une série de flyschs, après une bande homogène de granites éburnéens concordants. Cette série est de moindre importance que la précédente et traversée en son milieu par une bande de granites et de migmatites. Plus à l'ouest on retrouve un nouveau massif granitique intrusif à l'ouest de Tortiya, puis une bande de migmatites antébirimiennes.

Les pourcentages évalués de chaque unité géologique sont les suivants:

Le groupe des granitoïdes comprend cinq unités qui sont les granites à biotites (8%), les migmatites (20%), les granites à deux micas (24%), les granodiorites concordants (6%) soit un total de 58% de la superficie totale. Au sein du groupe des formations birimiennes (paléoprotérozoïques), nous avons les métasédiments indifférenciés (15%), les métasédiments et métavulcanites (20%), les métavulcanites (2%) soit un total de 37% de la superficie totale. Le groupe des formations antébirimiennes est représenté par des migmatites (5% du total).

1.5.5.2- Caractéristiques structurales et hydrogéologique

La connaissance du degré d'altération et, plus particulièrement, de la perméabilité des altérites revêt une grande importance dans la plupart des travaux d'aménagement, de génie civil et d'hydrogéologie (Chaplot, 2000). L'effet de la tectonique sur la distribution des altérites à l'échelle continentale et locale est déjà connu à l'échelle régionale. Cet effet a été peu étudié probablement en raison du manque d'outils de quantification adaptés à cette échelle. L'hydrogéologie du socle cristallin s'oriente depuis une vingtaine d'années sur la recherche systématique des fractures qui affectent le bed-rock et induisent les principales réserves d'eau souterraines dans ces régions. L'implantation des forages surtout lorsqu'il s'agit d'ouvrages devant fournir des débits importants, nécessite une méthodologie élaborée faisant intervenir la télédétection (Savado, 1997). Les formations cristallines se composent essentiellement de migmatites et granites indifférenciés, de gneiss ainsi que de granites syntardi-tectoniques recoupant des séquences volcanosédimentaires dans la majeure partie du département de Katiola. Du point de vue hydrogéologique, ces différentes formations, à l'état sain, présentent une porosité et une perméabilité très faibles. Cependant, les phénomènes tectoniques et physico-chimiques qui affectent ces roches induisent une porosité et une perméabilité dites secondaires, permettant à ces formations de devenir des aquifères souvent de grande productivité. Dans les régions de granitoïdes, la réserve d'eau est contenue dans les arènes sableuses et argileuses. Dans les formations schisteuses, l'eau se retrouve en quantité appréciable dans les zones à schistosité ouverte. La frange fissurée du substratum à perméabilité de fissures, jouant le rôle de drain, constitue la réserve sûre dans ces deux types

de formations. Le repérage des fractures, leur localisation et leur caractérisation constituent l'essentiel de l'étude de la recherche d'eau souterraine (Savadogo, 1997). La principale direction structurale du département de Katiola est NNE-SSO. Elle délimite des bandes dans les différentes unités géologiques. Ces bandes sont plus ou moins larges selon qu'il s'agit de granites, de flyschs ou bien des unités métasédimentaires ou métavulcanites. Une fracturation secondaire recoupe ces bandes et crée des compartiments qui sont plus ou moins importants selon qu'ils sont constitués de granites éburnéens ou de roches birimiennes. Dans cette fracturation secondaire, il est possible de distinguer deux directions principales : N.095° – N.115° et N.070° - N.080° (Geomines, 1982).

1.5.6-Prospection hydrogéologique à partir des linéaments photogéologiques

Les aquifères dans les roches cristallines (socle) ont une structure discontinue et les ressources en eau exploitables sont limitées aux fissures et aux niveaux altérés d'une épaisseur de 10 à plus de 50 mètres (Figure 10). Dans les zones sédimentaires, on rencontre essentiellement une variété gréseuse. Parfois, les roches sont poreuses et contiennent des ressources en eau très importantes (Traoré, 1997). Sur le terrain, les alignements de végétation (type A) correspondent à des alignements d'arbres et de hautes herbes; les contrastes de tonalité et de texture (type B) représentant les plages sombres contrastant avec des plages plus claires; les alignements de corniches de témoins de cuirasse latéritique (type C). Les linéaments de type A correspondent à une végétation active et dense qui peut être un indice intéressant de prospection hydrogéologique, surtout en saison sèche. Les linéaments de type « contraste de tonalité et/ou de texture » sont des failles d'importance hydrogéologique certaine. Les linéaments de type B, signalés par des contrastes de tonalité ou de texture, sont les expressions de l'ouverture par distension du socle granitique syntectonique. Les fractures de type C correspondent à des corniches rectilignes de témoins de cuirasses latéritiques. Les fractures, filons et failles tardives en ouverture ou en extension peuvent présenter une conductivité hydraulique plus élevée que la roche cristalline initiale. Ces fractures ouvertes s'expriment dans la géomorphologie par le réseau hydrographique et les alignements de corniches de témoins de cuirasses latéritiques. Ces fractures sont nombreuses dans la zone sahélo-soudanienne et constituent des zones de circulation préférentielle d'eau et de fluides minéralisateurs (Koussoubé et *al.*, 2003). Les roches de socle (roches plutoniques et métamorphiques) ne sont aquifères qu'au sein de leur frange superficielle qui a été soumise à des processus d'altération supergène (Maréchal *et al.*, 2003). Le profil d'altération type

comprend, de haut en bas, les horizons suivants, qui possèdent des propriétés hydrodynamiques spécifiques (Maréchal *et al.*, 2003). Les altérites (ou saprolites) couvrent la roche « saine » sur une épaisseur variable. Du fait de sa dominante argileuse (argilo-sableuse dans le cas de roches riches en quartz), ce compartiment se caractérise par une porosité d'interstices significative (au sein de granites porphyriques, la porosité efficace peut dépasser 5%) et par une perméabilité relativement faible. Lorsqu'il est saturé en eau, ce compartiment assure une fonction capacitive de stockage des eaux souterraines au sein de l'aquifère. L'horizon fissuré est constitué de roche dure, affectée, sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, par la présence de fissures, de fréquence décroissante avec la profondeur. Il est maintenant démontré que ces fissures, dont l'origine a longtemps été associée à la « décompression superficielle », résultent, elles aussi, du processus d'altération (Maréchal *et al.*, 2003). Leur genèse est due principalement à l'altération des minéraux phylliteux (biotite en particulier), dont le gonflement provoque cette fissuration. Au sein de roches anisotropes non plissées (granites foliés, gneiss), la fissuration reste planaire, mais son orientation et son intensité sont déterminées par l'angle formé par la foliation et la surface topographique. Au sein de roches intensément plissées (schistes, micaschistes), la fissuration a une orientation généralement aléatoire, même à l'échelle de l'affleurement. Au sommet de l'horizon fissuré, la fréquence des microfissures devient voisine de la taille du grain de la roche (de l'ordre du millimètre), marquant la transition avec les altérites sus-jacentes. Une conséquence importante de ces modalités de genèse est que l'horizon fissuré du granite est parallèle aux paléosurfaces d'altération. Cet horizon assure la fonction transmissive de l'aquifère et est capté par la plupart des forages réalisés en région de socle. Le substratum sain n'est perméable que très localement, là où il est affecté par des fractures d'origine tectonique, le plus souvent sub-verticales (Maréchal *et al.*, 2003).

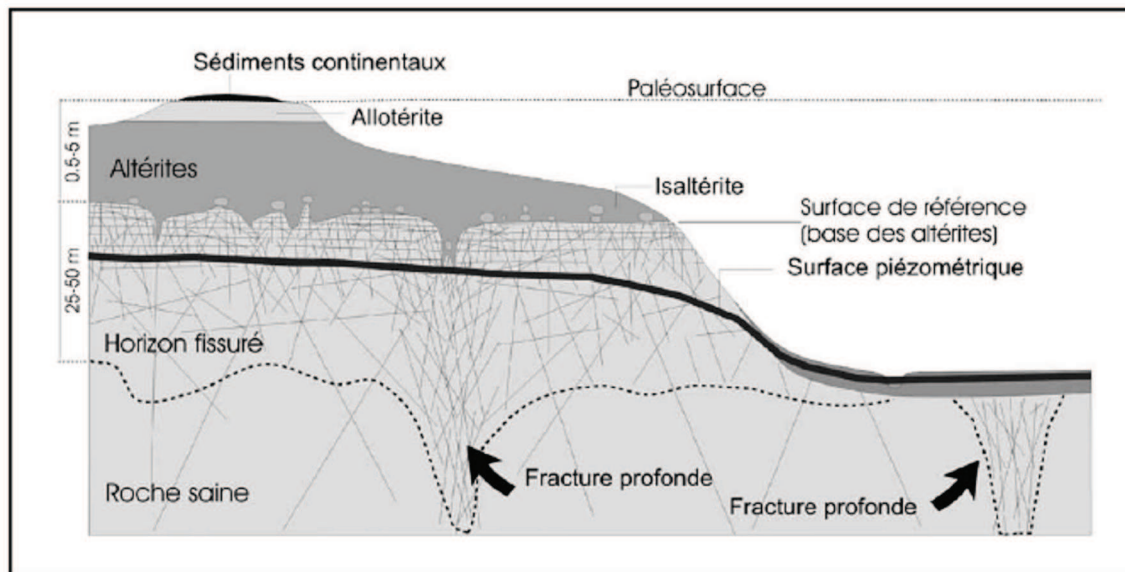


Figure 10: Profil des aquifères au sein des roches de socle

D'après Maréchal et al. (2003).

Conclusion partielle

De l'étude du milieu naturel du département de Katiola nous pouvons retenir les aspects suivants : un climat à deux saisons dont une saison de pluies (juin à septembre et une saison sèche le reste des mois de l'année). Le relief est peu accidenté et dominé par des plateaux, avec quelques dômes cristallins dont le Mont Niangbo. La végétation est de type savane arbustive parsemée d'îlots de forêts denses et de forêts galeries autour des cours d'eau. L'hydrographie se compose des fleuves N'zi (Lokpô) et Bandama, et de nombreuses rivières dont la plupart tarissent pendant la grande saison sèche. Les principales activités sont l'agriculture, l'agro-industrie (sucrière), l'artisanat, l'élevage et le commerce, ainsi que l'extraction de produits miniers : diamant dans la sous-préfecture de Tortiya, or dans la sous-préfecture de Niakaramandougou. Le réseau routier se compose de 1 150 kilomètres de routes dont 242 kilomètres bitumés. Le réseau ferroviaire (180 km de rails) traverse le département dans le sens Nord-Sud avec deux gares et sept stations.

1.6-Concept de télédétection

L'imagerie satellitaire est un outil très intéressant de cartographie et de suivi de l'évolution d'un bassin. Il existe maintenant des archives d'images satellitaires qui remontent jusqu'aux années 1970 grâce à la série de capteurs à bord des satellites LANDSAT. Ceci

permet de faire un suivi spatio-temporel de l'environnement durant les 35 dernières années (Dehbi *et al.*, 2007).

L'évaluation, la modélisation et la gestion des ressources en eau souterraine sont considérablement entravées par un manque de données, particulièrement dans les régions semi-arides et arides possédant peu d'infrastructures d'observation. Généralement, seul un nombre limité de points de mesure est disponible, alors que les modèles hydrologiques et hydrogéologiques demandent des distributions spatiales et temporelles de données d'entrée et de calibration assez régulières. Si de telles données ne sont pas disponibles, les modèles ne peuvent pas jouer leur rôle d'appui à la décision puisqu'ils sont notoirement de mauvaise résolution et incertains. De récentes avancées en télédétection constituent de nouvelles sources pour les phénomènes spatialement distribués. Les entités utiles telles que les niveaux d'eau ou les transmissivités ne peuvent pas être observées directement par télédétection, il convient de trouver des moyens de relier les quantités observables aux données d'entrée nécessaires aux modèles. L'une des principales possibilités est l'utilisation de données de télédétection pour créer une partie des données d'entrée spatialement distribuées d'un modèle (Brunner, 2007).

Une image de télédétection est obtenue à partir d'une position dans l'espace, soit à partir d'avion, soit à partir d'un satellite. A partir des images aériennes, l'hydrogéologue peut établir une série de documents qui ont valeur d'étude (Engalenc, 1978). L'essentiel des images que nous utiliserons sont des images issues de satellites d'observation de la terre. Elles sont pour nous d'un grand apport grâce à leur vue synoptique et aux concentrés d'informations qu'elles contiennent.

1.6.1.- Les images de télédétection

La mise en œuvre privilégiée de la télédétection spatiale en géomorphologie et géologie est justifiée par les avantages particuliers des capteurs embarqués. Dans de nombreux cas, c'est la vue synoptique qui est l'élément le plus important ; la surface étant observée de loin, les détails ne sont pas souvent visibles mais les grandes structures apparaissent. Ces caractéristiques sont bien adaptées à la grande dimension des objets géomorphologiques et géologiques. La revisite est fréquente et se produit dans des conditions géométriques d'acquisition homogènes, ce qui permet le suivi de phénomènes dynamiques. Des acquisitions peuvent être programmées à différentes saisons de l'année. Les données acquises dans des domaines spectraux variés se complètent. Certains domaines spectraux non

visibles par l'homme, tels que l'infrarouge ou les micro-ondes (radar), apportent une information originale. Les images spatiales peuvent être acquises quel que soit l'endroit sans être soumises aux restrictions et confidentialités courantes ; les vecteurs satellitaires sont toujours positionnés au-delà de la limite réglementaire des 80 km d'altitude qui définit l'espace aérien des pays. Ils peuvent fournir des vues récentes, faisant apparaître l'état actualisé des réseaux de communication et de l'occupation du sol, ce qui permet de se repérer sur le terrain. Les données peuvent bénéficier des traitements numériques d'image. Les inconvénients sont que la qualité de la stéréoscopie est variable selon les conditions d'acquisition et que les résolutions spatiale et spectrale sont parfois un peu grossières, mais proches de la réalité (Chorowicz et Deroin, 2003).

1.6.2- Les conditions climatiques en télédétection

Les possibilités et limites de l'analyse des données de télédétection dépendent de plusieurs facteurs liés au capteur et aux conditions de prise de vue. Ces facteurs, dont certains varient dans le temps, se combinent pour influencer la résolution effective des données. Les performances optiques du système dépendent également de la qualité optique de l'atmosphère qui elle, peut varier dans des proportions importantes. La présence de poussières, de fumées et d'aérosols dégrade de manière très sensible la résolution effective d'un capteur. Par nature, ces paramètres sont extrêmement variables dans le temps et dans l'espace, ce qui explique que l'interprétabilité de deux images d'un même satellite, acquises à quelques jours d'intervalle, voir de deux parties d'une même image, puisse être très différente (Baudot, 1997).

1.6.3- Choix des images

Pour faire un choix parmi les données de télédétection, il faut avant tout savoir quels sont les objets recherchés, quelles sont leurs propriétés sur les images, et tenir compte du contexte géographique de l'étude. Il faut aussi posséder une bonne connaissance des différents types de données disponibles et en connaître les caractéristiques techniques. Les possibilités et les limites des divers types de données doivent être connues avant d'entreprendre les phases de traitement et d'analyse.

La qualité des données est fonction de deux paramètres qui sont :

- la qualité géométrique qui dépend des performances du capteur et de la stabilité de l'orbite du satellite.

- la qualité radiométrique qui dépend de la fiabilité des instruments et des détecteurs, des bandes spectrales utilisées, des contrôles effectués (détection et correction d'anomalies). Le facteur répétitivité doit être pris en compte si l'on doit effectuer le suivi d'un phénomène (Chorowicz et Deroin, 2003). Le choix des images satellitaires varie en fonction des besoins des utilisateurs. Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé les images disponibles et assez récentes qui nous étaient utiles. L'image devait avoir une résolution acceptable afin d'obtenir le plus de précision possible. Elle devait être claire, sans bruit, ou du moins avoir le minimum d'interférence atmosphérique possible. Les images ont été acquises géoréférencées, et corrigées géométriquement, ce qui a facilité l'exportation vers les environnements informatiques de traitement. Les systèmes d'acquisition de données de télédétection permettent d'explorer l'environnement dans une approche globale ou locale. L'approche globale fait appel aux satellites météorologiques à résolution grossière (NOAA) ou aux satellites d'observation de la Terre à résolution moyenne (LANDSAT) tandis que l'approche locale utilise les satellites d'observation de la Terre à fine résolution. Chaque type de satellite apporte des informations différentes et complémentaires (Yergeau, 1989). Les images LANDSAT, les images SRTM 2000 et les photographies aériennes de 1996 ont été utilisés dans cette étude. Le choix des images satellitaires s'est basé sur la disponibilité et le recouvrement de la zone d'étude.

- Les photographies aériennes

L'action de la lumière sur certains composés organiques est connue depuis l'Antiquité. Au Moyen Âge, les alchimistes utilisèrent les effets noircissant de l'exposition de sels d'argent à la lumière et, en 1515, Léonard de Vinci décrivit le fonctionnement de la camera obscura, une sorte de chambre noire, dépourvue de lentille. Ce n'est toutefois qu'en 1816 que Nicéphore Niepce (1765-1833) obtint les premières images négatives sur papier au chlorure d'argent. Dès 1822, il améliora la technique grâce à une substance appelée « bitume de Judée », étendue sur une plaque de verre, remplacée dès 1826 par une plaque d'étain. En 1829, Niepce, s'associa à Louis Jacques Mandé Daguerre (1787-1851), propriétaire d'un théâtre où étaient présentés des panoramas mus par des jeux de lumière. Ensemble, ils fixèrent les images de la chambre noire : la photographie était inventée. La première photographie aérienne prise par un être humain depuis un ballon d'observation a été attribuée à E. D. Archibald, un météorologue anglais (vers 1882). Peu après, A. Batut publia à Paris un ouvrage consacré aux principes de la photographie aérienne (1890). Entre 1892 et 1898, le géographe Joseph Vallot (1854-1925) et son frère cartographièrent le massif du Mont-Blanc à

partir de photographies aériennes. Les photographies aériennes permettent une cartographie précise de tous les faits visibles dans le paysage. Aujourd'hui la qualité, la précision et l'accès des satellites à tous les endroits de la terre rivalisent fortement avec la photographie aérienne. Cependant l'utilisation de telles cartes suppose que deux conditions soient remplies. Ce sont les corrections des déformations de l'image et l'établissement des correspondances entre les faits visibles sur le terrain et leur image photographique (Gilg, 1972). Le but de l'étude des photographies aériennes est de réaliser une carte géologique assez détaillée à partir de données et de travaux récents.

- Les photographies aériennes verticales

Les photographies aériennes verticales prises à partir d'avion sont généralement produites à des échelles comprises entre le $1/5\ 000$ et le $1/60\ 000$. La résolution au sol est décimétrique à métrique, ce qui favorise l'observation des structures de petite taille, notamment les bancs lithologiques. Elles sont acquises en stéréoscopie avec des recouvrements latéraux de 60 % et sont donc très bien adaptées à l'identification des objets ayant une expression géomorphologique. Elles ont été beaucoup utilisées en géologie avant l'avènement des images spatiales et demeurent des données utiles notamment pour les études locales (glissements de terrain, aménagement, etc.). Les photographies aériennes peuvent également être acquises en vue oblique depuis un avion ou un autre vecteur aérien.

- Les photographies spatiales

Les photographies spatiales sont acquises par des appareils photogrammétriques (capteurs MKF-6 de Soyouz 22, S 190A de Skylab, etc.) à partir de satellites. L'avantage de ces images est qu'une partie d'entre elles est en couleur et en stéréoscopie, ce qui convient bien pour la cartographie géomorphologique et géologique. Le champ de prise de vue, de l'ordre de la centaine de kilomètres, donne une vue synoptique permettant une bonne perception des grandes structures. La résolution spatiale de ces données est généralement bonne et la cartographie à $1/50\ 000$ et même à $1/25\ 000$ est donc possible (Chorowicz et Deroin, 2003). Elles comportent des couches photosensibles chimiques, posées sur film ou sur papier, impressionnées à partir d'un appareil embarqué sur un avion ou un satellite. Les émulsions sont utilisables, soit dans le domaine du *visible*, en noir et blanc (panchromatique, dans ce cas le bleu n'est pas capté) ou en couleur (vraies couleurs), soit dans le domaine *visible et proche infrarouge*, en noir et blanc ou en fausse couleur (Dickinson, 1969).

1.7- Concept de géostatistique

1.7.1- Principes de la géostatistique

La géostatistique a été développée par Matheron en 1965, initialement pour l'estimation des caractéristiques de gisements miniers et connaître la variance de ces estimations. Elle a été par la suite appliquée à d'autres domaines comme l'hydrogéologie où il se pose le problème d'analyse des données spatiales. Elle est basée sur la théorie des variables régionalisées et son premier objectif est de mettre en évidence, lorsqu'elle existe, la structuration spatiale du phénomène étudié. On appelle variable régionalisée (notée V.R.), un phénomène se déployant dans l'espace et /ou dans le temps avec une certaine structuration. En termes mathématiques, la variable régionalisée est une fonction $z(x)$ donnant la valeur au point x d'une caractéristique z du phénomène étudié. Le comportement spatial trop complexe de ces fonctions ne permet pas aux expressions classiques de les décrire (Razack, 1984).

Matheron suggère d'assimiler la mesure unique du paramètre étudié (processus de fracturation, transmissivité des aquifères, etc.) à une réalisation aléatoire par tirage au sort dans l'infinité de cas possibles, en fonction de sa loi de probabilité.

La plupart des variables quantitatives utilisées en Sciences de la Terre peuvent être considérées comme des variables régionalisées (Massoud, 1988). L'application de la géostatistique à une variable donnée suppose la répétitivité de façon aléatoire de celle-ci. Le débit, le niveau statique de la nappe, la profondeur de socle ou les phénomènes spatiaux peuvent être soumis à l'analyse géostatistique. L'outil mathématique de la géostatistique est le variogramme. Il permet de décrire la structure spatiale et de voir la détérioration de la corrélation entre les points mesurés quand la distance varie. L'usage du variogramme permet de préciser certaines caractéristiques qualitatives du milieu à savoir : la continuité, l'anisotropie, la taille de la régionalisation, la présence de structures imbriquées, etc. En pratique, son usage revient à ajuster une fonction analytique (modèle) au variogramme expérimental.

1.7.2- Statistiques exploratoires et géostatistique

Pris dans son sens méthodologique le plus large, ce terme désigne toute analyse utilisant l'outil statistique et ayant une dimension spatiale, cette dimension concerne l'objet analysé ou les variables utilisées comme descripteur de cet objet.

L'application de la géostatistique suppose qu'un certain nombre d'hypothèses doit être fait, en particulier l'hypothèse de stationnarité et l'hypothèse intrinsèque. La géostatistique

non linéaire constitue la partie la plus rébarbative de la géostatistique. D'abord elle est fortement marquée par l'origine minière des problèmes qu'elle cherche à résoudre. Ainsi prédire les réserves récupérables d'un gisement en fonction de la taille du support de sélection (effet de support) et de la maille de sondage de préexploitation (effet d'information) (Chiles, 2004) est assez complexe. La géostatistique peut être utilisée pour analyser la variabilité spatiale du transfert de l'eau à l'échelle d'une parcelle à partir des sites d'échantillonnage. Elle permet de donner une valeur moyenne rendant compte de la covariance entre les points de mesure (Gascuel-Odoux al. 1986). Les données à référence spatiale sont de plus en plus exploitées, et ce, dans divers domaines de recherche. Qu'il s'agisse de précipitations mesurées à des stations météorologiques, de la densité d'un minerai dans des échantillons de sol ou de la concentration de gaz carbonique dans l'air en certains sites, ces données possèdent toutes un point en commun : elles sont réparties dans l'espace géographique. Des méthodes statistiques adaptées à l'analyse de données à référence spatiale ont été développées (Ripley, 1981 et Cressie, 1993). Le traitement statistique de ce type de données demande une attention particulière car l'hypothèse classique selon laquelle les observations sont indépendantes et identiquement distribuées est rarement vérifiée.

1.7.3- La stationnarité

La stationnarité se définit ici par la constance de l'espérance, mais aussi par la covariance entre deux observations qui dépend uniquement de la distance entre ces observations (Baillargeon, 2005). Afin de rendre plus apte l'application aux phénomènes géologiques, des hypothèses ont été émises. La stationnarité au sens large permet d'imposer uniquement aux deux premiers moments (moyenne et covariance) la loi de probabilité de la fonction aléatoire d'être invariant par translation. Cela donne :

$$E [Z(x)] = m(x) = m \quad (1)$$

$$E [(Z(x)-m) - (Z(x')-m)] = K (x-x') = K(h) \quad (2)$$

Avec: E: espérance mathématique; m : moyenne ;

K : covariance entre deux supports; vecteur du module (x-x')

L'équation (1) signifie que la moyenne est indépendante du point x, c'est à dire ne dépend pas de la position géographique. La seconde (2) signifie que la covariance ne dépend que de la distance séparant les deux points de mesure. De ces équations, il résulte que la variance au point x ou autocovariance (K (o)) doit être indépendante de la position du point x.

$$\text{VAR} [Z(x)] = E [(Z(x)-m)^2] = K(0)$$

$K(0)$: autocovariance ou variance à priori

$\text{VAR} [Z(x)]$: variance au point x .

Le point faible de cette hypothèse, c'est qu'elle ne prend pas en compte la faculté de dispersion des phénomènes naturels tels que la répartition des eaux souterraines. Nous nous tournons alors vers l'hypothèse intrinsèque.

1.7.4- Hypothèse intrinsèque

Dans ce modèle les accroissements de la fonction aléatoire (F.A.) sont stationnaires d'ordre 2. La fonction aléatoire est, par définition, la réalisation de la variable régionalisée ; c'est une variable aléatoire à une infinité de composantes correspondant chacune à un point de l'espace. Cette fonction est définie à la fois dans un espace géographique et dans un espace probabilisé (Chauvet, 1994). Pour deux points quelconques, l'accroissement $z(x + h) - z(x)$ admet des moments d'ordre 1 et 2, et ces moments sont stationnaires. L'étude géostatistique des phénomènes naturels tels que la fracturation peut être approchée par le biais de ces accroissements.

Ce modèle est caractérisé par une espérance nulle des accroissements et une variance indépendante du point x . Les relations suivantes peuvent être écrites :

$$E [Z(x + h) - Z(x)] = 0$$

$$\text{Et } \text{VAR} [Z(x + h) - Z(x)] = 2\gamma(h)$$

Une F.A. qui satisfait à cette hypothèse est appelée F.A. intrinsèque d'ordre 2.

1.7.5- Le variogramme

La fonction $\gamma(h)$ s'appelle le « variogramme » ou « fonction intrinsèque ». Le variogramme est utilisé pour mener l'analyse structurale. Il est défini par les relations :

$$\gamma(h) = \frac{\text{var}(z_{(x+h)} - z_x)}{2} \quad \text{ou} \quad \gamma(h) = \frac{E((z_{(x+h)} - z_x))^2}{2}$$

Il exprime le demi accroissement quadratique moyen entre deux points d'appui distants de h . La fonction variogramme est évaluée à partir des couples de points

expérimentaux disponibles sur l'unique réalisation. La représentation de $\gamma(h)$ en fonction de h représente le graphique du variogramme.

1.7.6- Le krigeage

Le krigeage porte le nom de son précurseur, l'ingénieur minier sud-africain D.G. Krige. Dans les années 50, Krige a développé une série de méthodes statistiques empiriques afin de déterminer la distribution spatiale de minerais à partir d'un ensemble de forages (Paris *et al.*, 2005). Le krigeage est une méthode stochastique d'interpolation spatiale qui prévoit la valeur d'un phénomène naturel en des sites non échantillonnée par une combinaison linéaire sans biais et à variance minimale des observations du phénomène en des sites voisins (Baillargeon, 2005).

L'interpolation ainsi que l'extrapolation sont possibles à l'aide du krigeage. Il permet également d'estimer la variance sur l'estimation du phénomène étudié. Un intérêt de la méthode est d'estimer l'erreur sur la donnée à un temps précis, tout en accordant plus de poids aux données mesurées : une valeur estimée à un temps près d'une valeur mesurée aura en général une variance plus petite qu'une donnée plus éloignée (Bezot, 2005). L'interpolation spatiale se définit par la prévision de la valeur d'une variable en un site à partir de valeurs mesurées en des sites voisins. Le krigeage est la méthode optimale, au sens statistique du terme, d'estimation. On peut l'utiliser autant pour l'interpolation que l'extrapolation (Gratton, 2002). L'idée de base du krigeage est de prévoir la valeur de la variable régionalisée étudiée en un site non échantillonnée s_0 par une combinaison linéaire de données ponctuelles adjacentes

$$\hat{z}(s_0) = a + \sum_{i \in V(s_0)} \lambda_i z(s_i) ; (a)$$

Les poids λ_i associées à chacune des valeurs régionalisées observées sont choisis de façon à obtenir une prévision non biaisée et de variance minimale. Ces poids dépendent de la localisation des observations et de leur structure de dépendance spatiale. En fait, le krigeage est le nom donné à la meilleure prévision linéaire sans biais, en anglais « best linear unbiased predictor » ou « BLUP », dans un cadre spatial (Baillargeon, 2005).

Le modèle de base du krigeage a la même forme que le modèle de régression classique ou locale, mais les erreurs sont maintenant supposées dépendantes spatialement. Il s'énonce comme suit :

$$z_{(s)} = \mu_{(s)} + \delta_{(s)}, \quad s \in D$$

Où $\mu(\cdot)$ est la structure déterministe pour l'espérance de $Z(\cdot)$ et $\delta(\cdot)$ une fonction aléatoire stationnaire, d'espérance nulle et de structure de dépendance connue. Pour formuler complètement le modèle, il faut spécifier la forme de la tendance. C'est en fait cette tendance qui précise le type de krigeage effectuée. Il existe trois types classiques de krigeage univarié (à une seule variable), suivant les hypothèses faites sur la moyenne.

- **Le krigeage simple** : La moyenne est la même partout. Elle est alors connue et c'est la moyenne de l'échantillon. De plus, on émet généralement l'hypothèse d'isotropie c'est-à-dire que le milieu d'étude est homogène et la répartition du phénomène étudié est la même en tout point. Le krigeage simple est aussi appelé collocation. $\mu(s) = m$ est une constante connue.

- **Le krigeage ordinaire** : la moyenne n'est pas connue, mais elle est considérée continue par morceau. On ne suppose pas ici que la covariance du processus existe. La structure de corrélation du processus est décrite par le variogramme. Il a pour propriété de filtrer une moyenne stationnaire qui n'a donc pas à être spécifiée. Ce krigeage est aussi appelé krigeage ponctuel. C'est la technique de krigeage la plus utilisée. C'est aussi la technique que nous allons utiliser dans ce travail. $\mu(s) = \mu$ est une constante inconnue.

- **Le krigeage avec modèle de tendance (krigeage universel)**: la moyenne suit une tendance définie par une variable secondaire. On parle alors de krigeage universel ou de krigeage avec dérive externe. $\mu_{(s)} = \sum_{j=0}^p f_j(s)\beta_j$ est une combinaison linéaire de fonctions de la position s . De plus, la structure de dépendance de la fonction aléatoire $\delta(\cdot)$ doit être précisée. Si elle n'est pas connue préalablement, ce qui est presque toujours le cas en pratique, elle est déterminée à partir des données lors de l'« analyse variographique ». Cette étape permet de décrire la variabilité spatiale de phénomènes régionalisés. Ensuite, le modèle étant complètement énoncée, le krigeage peut être effectuée en un point s_0 quelconque du champ D . En fait, il s'agit simplement de déterminer la valeur des poids λ_i de la combinaison linéaire (a) qui respectent la contrainte de non-biais : $E[\hat{z}_{(s_0)} - z_{(s_0)}] = 0$ tout en minimisant la variance de l'erreur de prévision $\text{var}[\hat{z}_{(s_0)} - z_{(s_0)}]$.

Le krigeage possède aussi une extension multivariable, le « co-krigeage ». Par cette méthode, la variable cherchée prend la forme d'une combinaison linéaire pondérée des observations de la variable à interpoler et des variables auxiliaires. Les variables sont alors corrélées les unes aux autres (Gratton, 2002).

DEUXIEME PARTIE : APPROCHE METHODOLOGIQUE

2. MATERIELS ET METHODES

2.1-MATERIELS

2.1.1- Les données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

Les données SRTM sont des données altimétriques de la surface du terrain selon un maillage régulier (Tableau III). La qualité dépend de leur résolution et du type de correction qu'elles ont subi. Beaucoup d'utilisateurs, pour leur travail quotidien, s'appuient sur ces modèles d'élévation, les gestionnaires de réseaux fluviaux, les hydrogéologues, les géologues, les experts forestiers, les ingénieurs urbanistes, les écologistes, les archéologues et beaucoup d'autres encore. Parmi les images SRTM disponibles, nous avons utilisé SRTM-3 version 2 disponible auprès de la United States Geological Survey (USGS). Leur résolution est de 90 mètres soit 3 arcs secondes, couvrant toute la zone d'étude. Les cartes qui résultent des images SRTM sont de bonne qualité et représentent assez fidèlement la réalité. Ce qui fait des cartes issues des images SRTM de précieux outils dans de nombreux domaines qui exigent une connaissance précise de la topographie des lieux : suivi des inondations (meilleure analyse des écoulements des eaux de surface), mouvements des glaciers, surveillance des volcans, reboisement, conservation et protection de la nature, etc.

Tableau III: Capteur et caractéristiques des produits SRTM

Satellite	Capteur	Taille de la capture	Taille du pixel
Space Shuttle Endeavor	Bande C et bande X	1 seconde d'arc	30 mètres
		3 secondes d'arc	90 mètres
		30 secondes d'arc	1 kilomètre
Type de la scène	Taille de la scène		Projection
degré	1 degré latitude sur 1 degré longitude		géographique
WRS-2	185 kilomètres sur 185 kilomètres		UTM
mosaïc	global		géographique

Source USGS (2004).

Tableau IV : Références des images SRTM ayant servi à l'étude

N07W005	N08W005	N09W005
N07W006	N08W006	N09W006
N07W007	N08W007	N09W007

- Les images SRTM en hydrogéologie

Les données obtenues par télédétection peuvent être utiles pour l'élaboration de modèles hydrogéologiques à l'échelle régionale et particulièrement dans les régions où les données d'élévations du sol sont rares ou éparses (Kyle *et al.*, 2007). Le suivi des flux d'eau douce est indispensable aux besoins humains et aux études sur les changements climatiques actuels. Or, les réseaux traditionnels ne fournissent pas l'information nécessaire, tant en couverture spatiale qu'en rapidité de diffusion. Bien que n'étant pas seulement prévues pour l'hydrogéologie, les missions d'altimétrie satellitaire ont fourni des mesures qui peuvent être utilisées pour extraire des informations à caractères hydrogéologiques. Ces informations peuvent être des séries temporelles de niveaux des eaux, de débits, des profils d'altitude de rivière ou des nivellements de stations in situ (Calmant et Seyler, 2006). L'idéal, dans la recherche hydrogéologique en milieu de socle, serait de rencontrer une fracture ouverte susceptible d'offrir un débit maximum. Si un ouvrage est placé sur des fractures profondes, ou mieux sur l'intersection de deux ou plusieurs fractures, il est possible d'obtenir un grand débit d'eau souterraine (Parizek, 1976). La cartographie des fractures est donc recommandée dans les zones de socle parce que l'eau souterraine se trouve dans les structures secondaires où les vides sont développés par l'action tectonique et l'altération. Cette cartographie des fractures peut être effectuée avec les images SRTM. Le nombre de fractures et le nombre d'intersections de fractures sont des mesures de la perméabilité secondaire moyenne de l'aquifère de roche cristalline et, par conséquent, de la grandeur d'écoulement d'eau souterraine autour du puits (Brook, 1988). Ces directions de fractures définissent plusieurs couloirs de cisaillement et de failles et ces accidents cassants ont un rôle hydrogéologique important. En effet, pour garantir un débit optimum des forages en zone de socle, la recherche des fractures ou des intersections de fractures est conseillée (Savane, 1997).

2.1.2 - Les données LANDSAT

Les images LANDSAT ayant servi dans cette étude sont toutes de la période sèche c'est-à-dire de novembre à avril. Leur résolution précise est de 28,5 mètres et leur référence est Path 197, Row 054. Nous n'avons pas utilisé d'images de la période humide compte tenu du fait qu'elles sont inexploitable à cause de la grande présence de nuages sur les images. Les images retenues sont au nombre de neuf et présentent une durée d'observation de 23 ans (de 1984 à 2007). Leur résolution est de trente mètres. Elles ont été obtenues de l'USGS par le biais de son site «<http://earthexplorer.gov>» en téléchargement libre. LANDSAT est le

système d'observation de la surface terrestre par satellite le plus ancien des Etats-Unis. La NASA a lancé le premier satellite de la série de LANDSAT (à l'origine appelé ERTS : "the Earth Resources Technology Satellites") le 23 juillet 1972. Le programme a été renommé LANDSAT en 1975. La capacité de fournir des images d'une même zone à différentes dates constitue l'un des attraits des satellites d'observation LANDSAT.

Tableau III: Récapitulatif des capteurs LANDSAT (Source US Geological Survey)

Satellite	date de lancement	altitude moyenne	Cycle orbital	Fauchée	Capteurs, canaux et résolution spatiale
LANDSAT 1	juillet 1972	910 km	18 jours	185 km	Caméra RBV (3 canaux, 80 m) Radiomètre MSS (4 canaux, 80 m)
LANDSAT 2	janvier 1975	910 km	18 jours	185 km	Caméra RBV (3 canaux, 80 m) Radiomètre MSS (4 canaux, 80 m)
LANDSAT 3	mars 1978	910 km	18 jours	185 km	Caméra RBV (3 canaux, 80 m) Radiomètre MSS (5 canaux, 80 m)
LANDSAT 4	juillet 1982	705 km	16 jours	185 km	Radiomètre MSS (5 canaux, 80 m) Radiomètre TM (7 canaux, 30 m)
LANDSAT 5	janvier 1984	705 km	16 jours	185 km	Radiomètre MSS (5 canaux, 80 m) Radiomètre TM (7 canaux, 30 m)
LANDSAT 6	oct. 1993	détruit après lancement			
LANDSAT 7	avril 1999	705 km	16 jours	185 km	Radiomètre ETM+ (7 canaux, 30 m, plus canal panchro, 15 m)

LANDSAT 1 embarquait un capteur MSS (Multi Spectral Scanner) dont les pixels mesuraient environ 80 mètres de côté. Avec le mode multispectral plusieurs images sont prises simultanément chacune dans une région différente du spectre électromagnétique. Les données LANDSAT MSS ont été utilisées pour la cartographie de reconnaissance de la Côte d'Ivoire (Deroin *et al.*, 1994 et 1995). Six autres satellites LANDSAT ont été envoyés en orbite. La seconde génération de satellites LANDSAT fait son apparition en 1982 avec le lancement de LANDSAT 4, qui embarqua un capteur Thematic Mapper (TM) en plus du MSS. Les images LANDSAT MSS (Multi Spectral Scanner) et TM (Thematic Mapper) présentent l'avantage d'être acquises dans le monde entier et sur une période continue de 20 ans (1972-1992). Les capteurs TM détectent la radiation réfléchie à la surface de la terre dans sept bandes spectrales dans les longueurs d'ondes du visible et de l'infrarouge proche, moyen

et thermique. La résolution des images TM (30 mètres) fournit suffisamment de détails pour permettre une gamme importante d'applications tout en gardant une scène suffisamment grande de 180km de coté. A partir de LANDSAT 7, le capteur devient ETM+ (Enhanced Thematic Mapper). Ses huit bandes spectrales sont semblables à celles de TM, sauf que la bande thermique 6 a une résolution améliorée de 60 m (contre 120 m dans TM). Il y a aussi une bande panchromatique complémentaire à la résolution de 15 m (IFEN, 2005). En mode panchromatique, une seule image est produite à partir des longueurs d'ondes du spectre visible (sauf le bleu) et d'une partie du proche infrarouge traduite en niveau de gris. La résolution des données panchromatiques permet aux utilisateurs de distinguer des éléments de terrain de l'ordre du mètre. La précision et l'interprétabilité des images font qu'il est idéal pour la cartographie. Les données LANDSAT peuvent être utilisées dans un système d'information opérationnel pour différentes applications dont la géologie, la foresterie, le suivi à long terme de l'utilisation du sol, etc. (Yergeau, 1989). La résolution spectrale accrue de TM permet d'acquérir des informations sur des éléments de l'environnement dont certaines sont encore mal connus des utilisateurs de la télédétection : teneur en eau de la végétation, altération des roches, température de surface, etc. (Bonn *et al.*, 1989). La composition colorée des images LANDSAT facilite l'établissement de cartes d'occupation du sol (Pascal *et al.*, 2005).

2.1.3 - Les données hydrogéologiques (relevés de puits et forages)

Les données de terrain, collectées sont saisies sous formes numériques et organisées en bases de données documentaires (logiciel tableur). La mise sous forme numérique se fait de la façon suivante : (1) les images et les cartes sont scannées, (2) les mesures de terrain et autres informations recueillies sont saisies dans le tableur. La localisation de site de mesure est réalisée au moyen de système de navigation par satellite (systèmes GPS) lors de missions de terrain. Les relevés de puits et forages exécutés sur le département de Katiola et qui ont servi à notre étude sont au nombre de 1056. Les Figures 11 et 12 présentent deux types de puits équipés de façon différente. La figure 11 présente un puits rencontré dans les champs et les campements. La figure 12 présente un forage équipé d'une pompe à manivelle et la figure 13 présente un forage non encore équipé. Toutes les données relatives à chaque paramètre des ouvrages ne sont pas renseignées. Le tableau V donne un récapitulatif des informations disponibles.



Figure 11: **Exemple de puits rencontré fréquemment dans les champs et les campements**



Figure 12: **Puits équipé d'une pompe à manivelle**



Figure 13: Forage non encore équipé

Tableau IV: Synthèse des données de puits et forages collectés sur le département de Katiola

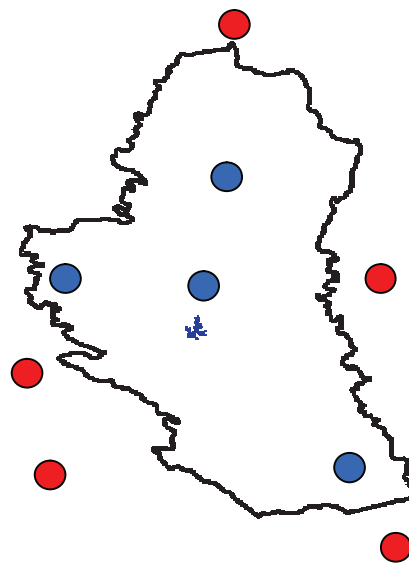
	Valeurs rapportées	Valeurs manquantes
Géomorphologie	721	335
Type d'ouvrage	724 forages, 262 puits, 4 piézomètres, 66 sondages	Rien à signaler
Profondeur totale	1038	18
Profondeur de socle	801	255
Aquifère	739	317
Géologie	796	260
Niveau statique	889	167
Débit exploitable	778	278

2.1.4 - Les données pluviométriques

Les données pluviométriques disponibles sont des données mensuelles. Le département compte au total quatre stations pluviométriques. Nous avons tenu compte des données de quatre stations pluviométriques très voisines des limites du département (tableau V).

Tableau V: Tableau des valeurs de pluviométrie utilisée dans le cadre de cette étude

Localités	Période de mesure
Katiola	de 1949 à 2000
Tafiré	de 1950 à 1998
Tortiya	de 1977 à 2002
Niakaramandougou	de 1950 à 2000
Ferkéssédougou	de 1970 à 2002
Dabakala	de 1922 à 2000
Séguela	de 1921 à 1998
Mankono	de 1937 à 2000
Bouaké	de 1904 à 2000



(Source Direction de la Météorologie Nationale de Côte d'Ivoire)

En bleu les stations pluviométriques du département, en rouge les stations pluviométriques des départements voisins.

2.1.5 - Les données cartographiques

La carte géologique est indispensable pour toute étude préliminaire de projets d'aménagement. Elle illustre la répartition spatiale des différentes unités lithologiques (Noamene *et al.*, 2005).

Nous disposons de cartes géologiques, qui serviront de base de référence dans l'interprétation des images satellitaire. Les différentes cartes utilisées sont :

- Carte géologique du département de Katiola, elle a été dressée et imprimée par le bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et la SODEMI (Société de développement minier de Côte d'Ivoire) en 1963 d'après des documents fournis en 1961 par la direction de la géologie et de la prospection minière de Côte d'Ivoire (échelle = 1/500 000).
- Carte des indices minéraux du département de Katiola, éditée en 2007 par la SODEMI (échelle = 1/500 000).
- Carte géologique de la Côte d'Ivoire. Editée et publiée en 1965 par la direction des mines et géologie de la Côte d'Ivoire (échelle= 1/1 000 000).
- 6 Cartes d'occupations des sols (par sous-préfecture). Les cartes de l'occupation ont été réalisées en septembre 2007 par le CNTIG (Centre National de Télédétection et l'Information Géographique de Côte d'Ivoire) et n'ont pas encore été validées sur le terrain.

2.1.6 - Logiciels de traitements

Les logiciels libres ont été les principaux supports de traitements et de modélisations. Contrairement aux logiciels propriétaires, ils nous sont fournis avec les codes sources. Ce qui nous offre les possibilités de les améliorer, de les adapter, de voir et comprendre les méthodes numériques et statistiques appliquées par le logiciel à nos données. Cela est important puisque nous sommes dans un contexte de recherche. Nous avons également le droit de les copier ou de les diffuser sans restriction aucune, ce qui facilite son accessibilité.

2.1.6.1- R

R est une suite intégrée de logiciels pour la manipulation de données, le calcul et l'affichage graphique. Entre autre, il contient des fonctions de traitement de données, un ensemble d'opérateurs pour les calculs sur les tableaux, les matrices et les images. Il est disponible en téléchargement gratuit sur le web : <http://www.r-project.org/>.

C'est un système d'analyse statistique et graphique créé par Ross Ihaka et Robert Gentleman. Il est à la fois un logiciel et un langage qualifié de dialecte du langage S créé par AT&T Bell Laboratories. Il est distribué librement sous les termes de la *GNU General Public Licence*. Le langage R permet de programmer des boucles qui vont analyser successivement différents jeux de données. Il est aussi possible de combiner dans le même programme différentes fonctions statistiques pour réaliser des analyses plus complexes. De prime abord, R peut sembler trop complexe pour une utilisation par un non-spécialiste. En fait, R privilégie la flexibilité. Alors qu'un logiciel classique affichera directement les résultats d'une analyse, avec R ces résultats sont stockés dans un "objet", si bien qu'une analyse peut être faite sans qu'aucun résultat ne soit affiché. En effet, l'utilisateur peut alors extraire uniquement la portion des résultats qui l'intéressent. C'est ce logiciel qui a permis de traiter la statistique générale et la géostatistique de la productivité. Les fichiers pour installer R, à partir du code ou des exécutables, sont distribués à partir du site Internet du *Comprehensive R Archive Network* (CRAN) où se trouvent aussi les instructions à suivre pour l'installation sur chaque système.

2.1.6.2- Mapwindow GIS

Mapwindow est un logiciel SIG libre sert à :

- la gestion des données géospatiales

- l'analyse,
- le traitement d'images,
- La production de carte,
- la modélisation spatiale et la visualisation.

Il est disponible en téléchargement gratuit sur le web : <http://www.mapwindow.org/>

Le choix de Mapwindow GIS a été dicté, d'une part, par le fait qu'il est libre et gratuit et, d'autre part, par les besoins spécifiques de la modélisation hydrologique en termes de traitement de l'information cartographique. Il est équipé de plusieurs unités SIG avec lesquelles de nombreuses informations cartographiques peuvent être extraites des images satellitaires. Plus particulièrement, le module « *watershed delineation* », développé pour le traitement de l'information, possède des fonctions permettant de retrouver, à partir d'un modèle numérique de terrain (SRTM), le tracé du réseau hydrographique, les bassins versants, l'ordre des cours, les pentes et les principales directions d'écoulement des eaux de surfaces. Ce faisant, « *watershed delineation* » construit pour la zone étudiée un réseau hydrologique permettant de représenter d'une façon logique et en tout point le parcours de l'eau depuis la zone d'interception de la précipitation jusqu'à l'embouchure.

Les résultats des modèles peuvent être incorporés dans d'autres logiciels ou dans d'autres bases de données supportant les formats standards, spécialement conçus pour faciliter le travail d'interrogation des bases de données.

2.2-METHODES

2.2.1-Les corrections radiométriques et géométriques

Les corrections radiométriques sont des opérations qui consisteront en une correction des données de réflectance (absorption et diffusion des gaz, aérosols et poussières). Cette opération concerne essentiellement les données satellitaires.

Les corrections géométriques réduiront les déformations spatiales et amèneront les objets contenus dans les images dans leur forme d'origine. Elles rendent utilisables et facilement interprétables les informations extraites des images. Elles s'avèrent nécessaires pour intégrer les données spatiales dans des bases de données cartographiques. L'utilisation des données cartographiques par les systèmes de traitement d'image et d'informations géographiques passe par leur mise en conformité géométrique avec le système de référence cartographique de la zone concernée (Desprats *et al.*, 1995). L'opération de superposition de l'image à une projection cartographique donnée se nomme orthorectification. Suite à cette

opération, l'affectation de coordonnées géographiques à chaque pixel de l'image ainsi obtenu se nomme géoréférencement. Deux techniques de base permettent d'effectuer l'analyse thématique des données géographiques à partir de photos aériennes ou d'images satellites : le traitement automatique par classification numérique des pixels et la photo-interprétation. Nous n'avons pas effectué des corrections puisque la qualité des images est acceptable. Le système de projection, le géoréférencement et le niveau des couleurs sont de qualité acceptable nous permettant d'extraire les informations recherchées.

2.2.2-La photo-interprétation

Le terme « photo-interprétation » désigne l'interprétation des photographies aériennes et des images spatiales. La photo-interprétation est née dans la seconde moitié du XIX^e siècle, en même temps que la photographie. Son essor fut favorisé par les utilisations militaires. Les scientifiques ont mis à profit cette nouvelle méthode d'investigation dès les premières années du XX^e siècle. À la base de tout processus de photo-interprétation, on trouve la lecture des images du paysage étudié, prises avec une émulsion ou un détecteur (Encyclopædia Universalis, 2008). L'utilité de la photo-interprétation dans les études locales ou les projets d'aménagement n'a jamais été remise en cause. Les trois principales utilisations de la photo-interprétation sont : l'appui aux relevés sur le terrain, une source de données multitemporelles et une réalité de terrain pour la télédétection satellitaire. L'objectif de la photo-interprétation est d'analyser des phénomènes complexes à différentes échelles de travail à partir de leur forme et de leur niveau de couleur. Les spécialistes de l'analyse spatiale, notamment les géographes, s'y sont intéressés dès les premières couvertures aériennes disponibles (Provencher, 2006).

La photo-interprétation est une approche logique et raisonnée basée sur un examen visuel d'images par un opérateur appelé photo-interprète. Cette approche logique est basée sur la reconnaissance d'objets grâce à un raisonnement par lequel on repère des zones homologues à partir de la couleur, de la texture et de la structure. L'identification d'unités géographiques consiste donc en la caractérisation des zones homogènes, l'examen de leur environnement et la recherche de zones analogues dans le but de confirmer ou d'infirmer une hypothèse d'identification. Une interprétation correcte induit donc la nécessité pour le photo-interprète de disposer de bonnes connaissances de base en terme de contexte géographique de la zone étudiée. Les images à photo-interpréter peuvent être analysées soit sur un tirage papier (photographies aériennes ou images satellites) soit directement à l'écran (photographies aériennes scannées et images satellites numériques) (IFEN, 2005).

2.2.3- Les techniques de classification

La classification est un système et hiérarchisé d'organisation des connaissances dans un domaine particulier. En télédétection, elle permet de transformer les images sous forme en carte thématique (Dehbi *et al.*, 2007). Elle se base sur les propriétés spectrales pour rassembler les différents objets de l'image en classes thématiques. Les principales méthodes de classification existantes sont la classification automatique (agglomérative ou divisive) et l'analyse discriminante. La méthode d'analyse discriminante couramment utilisée est une méthode paramétrique qui suppose que les densités des pixel, à classer sont normales; les critères d'agglomération s'expriment généralement en termes de distances, (Rasson *et al.*, 1990).

Les méthodes de **classification supervisée ou dirigée** ont besoin de zones d'entraînement dont les signatures spectrales sont connues. On extrapole par la suite cette signature à d'autres parties de l'image afin de relever d'autres éléments possédant des caractéristiques spectrales analogues. La classification dirigée a pour but d'utiliser la connaissance des données par l'utilisateur à entraîner le logiciel à reconnaître les classes en valeur de pixels particulière. C'est une méthode déterministe destinée à obtenir des catégories (ou classes) de pixels au moyen d'un traitement interactif des données radiométriques couvrant la zone d'étude à partir de sites témoins identifiés au sol ou sur photos aériennes. Ce type de classification permet de faire apparaître des phénomènes présentant des particularités radiométriques difficiles à repérer et d'utiliser un nombre de bandes spectrales supérieur à celui figurant sur les compositions colorées. Elle fournit directement une cartographie infographique définitive en couleurs conventionnelles par pixel. En contrepartie, le coût d'exploitation sur station interactive et de recueil de données de terrain est assez élevé. Le choix des zones témoins reste largement empirique en nombre et en étendue par catégorie. La réalisation d'un compromis entre le nombre de classes et le niveau de fiabilité a priori de la catégorisation est difficile. Le classement des pixels mixtes présente encore des difficultés malgré l'apparition de logiciels de traitement performants pour le démixage des pixels et l'existence d'une classe de pixels non classés est gênante dans un SIG. Les pixels de cette dernière classe peuvent être modifiés en procédant à des corrections esthétiques.

Quant à la **classification non supervisée**, elle a besoin seulement de quelques paramètres pour commencer le découpage de l'espace spectral. L'ordinateur utilise ses propres paramètres pour trouver les caractéristiques inhérentes aux données. Le rassemblement des données de cette classification sert à interpréter de façon plus globale les

phénomènes territoriaux observables sur l'image satellite. Les pixels de l'image sont regroupés dans des classes où ils peuvent être superposés sur la donnée originale. Une bonne connaissance du terrain est requise pour valider les résultats (Quessy, 1996). C'est une méthode probabiliste destinée à obtenir des groupes homogènes de réponses spectrales de pixels d'une image. Son intérêt est d'être une méthode de recherche originale pour détecter certains phénomènes tels la déforestation, la disparition de cours d'eau. Mais l'interprétation des groupes constitués est délicate car plusieurs types de variables thématiques interviennent dans la formation des groupes et certaines ne sont pas forcément recherchées. Finalement ce type de classification ne fournit qu'un nombre peu élevé de classes intéressantes pour un thème donné et la cartographie obtenue est à reprendre après interprétation des groupes en fusionnant ou éclatant certaines classes (IFEN, 2005).

2.2.4 –Traitements des images

2.2.4.1-Description des méthodes de traitement

L'interprétation des photographies a été réalisée conjointement avec les observations issues de nos campagnes de terrain. Différents critères ont permis de réaliser l'interprétation des images, notamment la radiométrie (teinte) et la texture des objets (la forme) ainsi que leur position géographique. Elles ont fourni une bonne détection des formations géologiques. Cependant, le département dans sa partie sud-est n'est pas couvert par les données de photographie aérienne dont nous disposons. Les photographies obtenues pour cette étude ont d'abord été scannées et intégrées au GIS Mapwindow. Le scannage des photographies aériennes est une opération préalable à l'orthorectification et au géoréférencement. La précision du scannage va ainsi définir en fonction de l'échelle de la photographie utilisée la définition de surface du pixel sur le terrain (IFEN, 2005). Ensuite nous avons procédé à un assemblage des différentes photographies couvrant le département en une seule image (réalisation d'une mosaïque). Enfin nous l'avons géoréférencé et procédé à l'identification des formations géologiques par tracé de polygones et de polylignes. Le géoréférencement s'est effectué à partir de point de contrôle se trouvant sur les différentes photographies scannées.

2.2.4.2-Traitement des images LANDSAT

Le traitement d'images joue un rôle très important dans la création des cartes thématique à partir d'images satellitaires. C'est pour cette raison que la classification d'images est probablement l'objectif le plus important dans ce domaine des géosciences, (Hakdaoui et

Rahimi, 2007). L'utilisation de l'imagerie satellitaire en cartographie nécessite un classement thématique précis des images. Les méthodes d'analyse visuelles ou numériques permettent, à partir d'une réalité terrain, de réaliser ce classement. Les méthodes classiques mesurent habituellement les similarités ou dissimilarités entre objets ou groupes d'objets en terme de distance ou semi-distances (Rasson et *al.*, 1990). D'autres données relatives au département de Katiola et aux ressources en eaux de surface ont été exploitées et intégrées dans l'interprétation. Notre démarche méthodologique vise à utiliser la télédétection comme outil d'inventaire des ressources en eau de surface. Elle repose sur l'interprétation visuelle de l'information issue de la télédétection. L'identification de l'eau se base sur le profil spectral tout à fait spécifique dans le canal proche infrarouge (PIR) caractérisé par des réflectances faibles car l'eau absorbe fortement les rayonnements dans cette tranche de longueurs d'onde. D'autre part, la détection des plans d'eau est tributaire de la superficie du plan d'eau et de l'effet de son environnement.

Nous avons utilisé le canal 4, bande spectrale proche infra-rouge, canal 5 bande spectrale moyen infrarouge, et canal 2 bande spectrale du vert. Nous avons procédé à une composition colorée. Les données de la bande TM 4 (0,76-0,90 μm) ont été colorées en rouge, la bande TM 5 (1,55-1,75 μm) a été colorée en vert et la bande TM 2 (0,52-0,60 μm) a été colorée en bleu. Cette nouvelle image nous donne une assez bonne impression des cours d'eau et des grandes retenues d'eau non cartographiées. L'interprétation visuelle nous a permis de déterminer les cours d'eau et d'observer le phénomène de disparition de certains cours et retenues d'eau.

2.2.4.3- Traitement des images SRTM

Chaque algorithme a ses propres avantages et ses propres inconvénients. Avant de présenter de manière détaillée les méthodes de reconstruction que nous utilisons, nous proposons une rapide présentation des principales approches existantes. Elles sont au nombre de trois qui sont :

- L'algorithme de connexité quatre (D4) considère quatre directions,
- L'algorithme de connexité huit (D8) considère huit directions (figure14),
- L'algorithme de connexité D infinity considère un nombre maximum de direction au-delà de 8.

Il consiste à calculer la direction de l'écoulement de chaque cellule de la grille à l'un de ses voisins limitrophe ou diagonal. La différence fondamentale entre ces trois approches est le nombre de direction considérée.

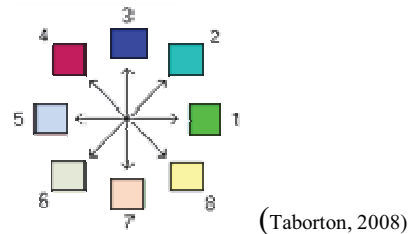


Figure 14 : Direction de calcul de l'algorithme de connexité huit

1 - Est, 2 - Nord-Est, 3 - du Nord, 4 - Nord-Ouest, 5 - l'Ouest, 6 - Sud-Ouest, 7 - du Sud, 8 - Sud-Est

Pour notre étude nous avons utilisé l'algorithme de connexité D8. L'intérêt réside dans la rapidité d'obtention de l'information et dans son systématisme qui permet d'obtenir des informations pertinentes pour les plans d'eau candidats à l'aménagement sur toute une région (Puech, 1997). Elle apparaît d'autant plus intéressante qu'elle peut être appliquée à de grandes surfaces sans contrainte juridique ni frontière. Avec ces algorithmes la principale difficulté dans l'approche typologique – qui est la prise en compte des liaisons existant entre ces différents ensembles (liaisons qui règlent le fonctionnement hydrologique) – est contournée. Ces ensembles peuvent se présenter soit sous la forme d'une hydroséquence continue avec un ordonnancement amont-aval (corniche, versant, piémont, glaciers, vallée), soit sous la forme d'un ensemble discontinu dont les éléments fonctionnent séparément du fait de la présence de plusieurs reliefs.

Les méthodes présentées ci-dessus sont toutes efficaces pour trouver et extraire les paramètres d'un bassin versant à partir d'images SRTM, mais le choix de l'une ou de l'autre est de la fonction des détails recherchés. L'algorithme consiste à se déplacer dans le nuage de points d'un fichier grid en suivant des règles de propagation précises, puis à mesurer la valeur de chaque case de la matrice pour enfin attribuer le point à une classe donnée (pente, ligne de crête, ligne de talweg).

- Les étapes de traitement des images SRTM

La méthodologie de traitements des données SRTM présentée ci-dessous fait intervenir les logiciels suivants : ENVI dans sa version 4.3, Mapwindow dans sa version 4.5. Les étapes sont les suivantes.

Etape 1 : mosaïque et formatage de l'image de base

La zone d'étude est couverte par plusieurs dalles SRTM. Avec le logiciel de traitement d'image ENVI nous avons dans un premier temps fait une mosaïque avec les différentes dalles ce qui a conduit à constituer une image unique de notre zone d'étude. Dans un second temps nous avons converti le fichier mosaïqué d'extension .hgt au format grid qui est un format raster. Enfin nous avons intégré le fichier grid dans l'environnement de traitement de Mapwindow. Le format de fichier grid est le format utilisé par l'algorithme D8. Il est codé en 32 bits ce qui permet d'avoir plus de 4 milliards de possibilités de valeur pour chaque cellule alors qu'un codage 24 bits n'en offre que 16 millions (exemple du TIFF). Les valeurs des ces cellules peuvent être des nombres entiers, on parle alors de raster entier (ou « integer ») ou de nombres réels (à virgule), c'est alors un raster flottant (ou "float"). Ce n'est pas un raster multibandes (comme le sont la plupart des images TIFF avec trois canaux RVB). (Source <http://www.portailsig.org/faq/faq-esri/raster/item-spatial-analyst.html>, 07/11/2008). Les différentes opérations d'extraction se font en mettant en œuvre les traitements de l'algorithme (D8) de Jensen et Domingue (1988).

Etape 2 : Prétraitement du fichier grid

Cette étape vise à effacer l'effet de puits dû aux imperfections du fichier grid. En effet, localement, sur la grille du fichier des points bas (la valeur d'altitude du point est inférieure à tous ses voisins) peuvent empêcher l'écoulement de l'eau et fausser le réseau hydrographique (figure 15). Le modèle procède à la localisation des cellules ayant une valeur plus faible que tous leurs voisins et leur applique la valeur minimale des voisins (Payraudeau, 2002).

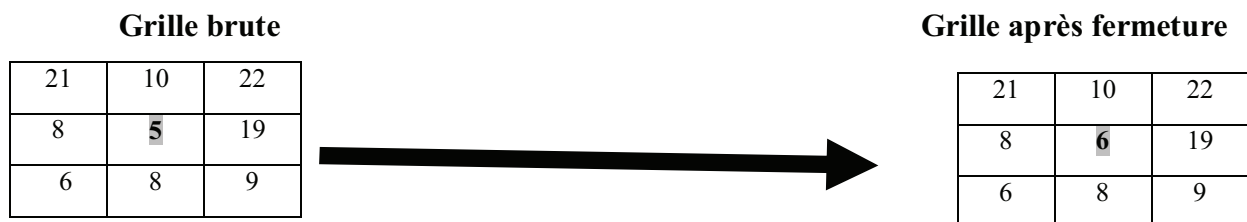


Figure 15: Exemple de comblement de trou ou de fermeture de puits par l'algorithme D8

Etape 3 : Détermination des directions d'écoulement

Le calcul des pentes permet de calculer la direction des écoulements selon la direction de la plus forte pente déterminée. « L'algorithme D8 considère les directions d'écoulement suivant un flux unidirectionnel en huit connexités, en prenant en compte les huit cellules voisines du point considéré », (Charleux-Demargne, 2001). Il lui affecte un code selon la

position relative de la cellule ayant l'altitude la plus faible. Une matrice de direction d'écoulement est ainsi obtenue (Figure 16).

Etape 4 : Extraction du réseau hydrographique

Pour déterminer le réseau hydrographique, l'algorithme de connexité utilise un seuil d'apparition de l'eau, ou surface drainée critique. Un pixel du MNT est considéré comme une rivière s'il dépasse un certain seuil fixé par l'utilisateur. L'extraction du réseau hydrographique est précédée par le calcul des surfaces drainées (figure 16). Chaque pixel du MNT se voit attribué du nombre de pixel situé en amont selon les directions d'écoulement. Ainsi, pour un pixel donné la valeur des pixels situés en amont va déterminer l'importance de la zone drainée (Renaud, 2006). Toutefois, l'obtention des cartes les plus pertinentes nécessite des calculs intermédiaires (Figure 16).

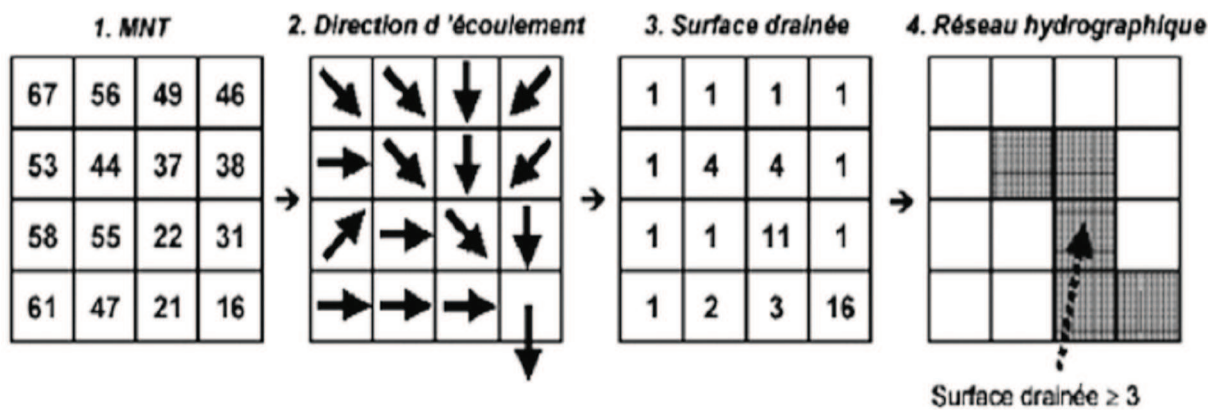


Figure 16: Schéma d'interprétation d'un fichier à partir de l'algorithme de connexité huit

(Anonyme)

2.2.4.3- Description et rôle des informations extraites

- Le bassin versant

Le bassin versant est un domaine complexe dont l'ensemble des caractéristiques (géométriques, géologiques, anthropiques, etc.) jouent un rôle dans sa réponse hydrologique. Le bassin versant est l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont donc être en partie reliés à sa surface. Celle-ci correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux ou ligne de crête. La surface du bassin versant est exprimée en kilomètres carrés (Riad, 2003).

Un bassin versant peut également être défini comme un ensemble de régions ayant un exutoire commun pour ses écoulements de surface. Il représente également l'unité

géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets. Etablir une cartographie de cette entité géographique constitue donc un outil d'aide à la décision très pertinent notamment concernant les études et la prévention des risques naturels (Barbier, 2006). Les caractéristiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. Les caractéristiques du bassin que nous allons extraire des images satellitales sont des caractéristiques géométriques : les limites du bassin, le réseau hydrographique et l'ordre d'eau selon Strahler. Dans la réalité, ces ensembles paysagiques forment des combinaisons complexes, plus ou moins ordonnées, faisant intervenir de nombreux facteurs déterminant le ruissellement. Ces facteurs sont parfois évolutifs et ils doivent être appréhendés à des échelles d'espace et de temps compatibles, permettant de rendre compte du fonctionnement de ces hydrosystèmes (Puech, 1997). L'approche méthodologique adoptée est fondée sur l'algorithme de connexité huit (D8).

- L'ordre des cours d'eau selon Strahler

La numérotation des cours d'eau selon Strahler part des tronçons sources, auxquels on attribue le numéro 1. Au confluent de deux cours d'eau, le numéro est augmenté d'une unité si les deux affluents ont le même numéro. Dans le cas contraire, on reprend le numéro le plus élevé. L'attribution des numéros hydrographiques dépend de l'échelle utilisée. Autrement dit, le numéro attribué à un même cours d'eau peut varier en fonction de l'échelle considérée. Les « vrais » numéros exigeraient un réseau hydrographique comprenant tous les cours d'eau existant sur le terrain. Les résultats de l'ordre obtenu selon la procédure ci-dessus sont illustrés dans la Figure 17 de manière à pouvoir supprimer les cours d'eau de faible numéro d'ordre et à simplifier ainsi la représentation du réseau hydrographique. (Source <http://www.bafu.admin.ch/hydrologie/01835/02118/02120/index.html?lang=fr>, 06/06/2008).



Figure 17: Ordre des cours d'eau selon Strahler

- Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est une des caractéristiques les plus importantes du bassin versant et peut prendre une multitude de formes. La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin versant est due à quatre facteurs principaux : la géologie, le climat, la pente du terrain et la présence humaine (Che et Sequeira, 2000). La longueur du cours d'eau principal est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux du bassin versant. Cette distance parcourue est exprimée en kilomètres. S'il y a un embranchement, et que les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface (Riad, 2003). Une étude sectorielle des relations entre les accidents et le réseau hydrographique a révélé que les principaux cours d'eau circulent essentiellement dans les axes tectoniques. Les résultats sont conformes aux observations effectuées en d'autres lieux de Côte d'Ivoire et de manière plus générale d'Afrique de l'Ouest. En effet, les principaux fleuves s'installent le plus souvent dans les grandes fractures du socle précambrien (Biémi *et al.*, 1991). Actuellement chaque aménagement, aussi bien à l'échelle de l'agriculteur qui cherche à protéger ses récoltes qu'à l'échelle de la commune qui cherche à protéger ses habitants et leurs biens, résout des problèmes locaux de crues. Les acteurs individuels aménagent leur partie de territoire de manière à réduire les conséquences localement, sans forcément étudier l'effet de ces aménagements sur les territoires plus en aval.

En hydrogéologie et en géologie du socle cristallin, il paraît important de trouver les signatures permettant de cartographier rapidement les structures de déformations majeures (failles, structures filoniennes, contacts géologiques, zones de cisaillement) qui sont enfouies sous les altérations superficielles du sol. En hydrogéologie notamment, des études récentes ont montré des débits importants dans des zones de failles et de filons ainsi qu'au niveau des contacts géologiques (Du Berger *et al.* 1996 ; Koussoubé *et al.*, 2003). Les écoulements et les possibilités de formation des réservoirs d'eau dans les milieux fissurés peuvent être appréhendés grâce à l'étude des perméabilités induites par les fractures. Cependant, jusqu'à maintenant, les résultats obtenus par cette technique sont restés tributaires de la densité des fractures susceptibles d'être visualisées sur les photographies aériennes classiques et sur les images LANDSAT (Biémi *et al.*, 1991). La détection rapide de ces structures dans les zones cristallines à l'aide de leurs signatures par diverses méthodes d'approche, trouve donc son importance (Koussoubé *et al.*, 2003).

Le réseau de drainage est constitué de surfaces élémentaires, chacune entourée de surfaces amonts, sauf une qui est en aval (Deffontaines et Chorowicz, 1991). Le réseau comprend l'ensemble des fonds de vallée, avec ou sans eaux pérennes ou temporaires, y compris les vallées sèches situées au-dessus des sources. Les images radar sont efficaces pour exprimer le réseau de drainage car elles exagèrent l'expression des pentes des vallées à faible versant, à la condition qu'elles soient orientées perpendiculairement à l'éclairement, y compris sous couvert forestier. Sur les images optiques, les caractères spectraux sont souvent particuliers mais très variables d'une région à l'autre en fonction des affleurements et de la végétation. Ainsi, les forêts galeries de certaines régions d'Afrique marquent le réseau de drainage. La macrotexture des images est constituée en grande partie par ce réseau, et dépend de la lithologie et de la structure des terrains. Elle est par exemple dense sur des roches imperméables facilement érodables, allant jusqu'à la formation d'un paysage de bad-lands (Chorowicz et Deroin 2003).

Le type de formations géologiques qui affleurent dans les bassins versants a une influence sur la répartition des écoulements superficiels. En effet, un bassin formé de matériaux très perméables avec une couverture végétale continue aura en général une densité de drainage faible assurant une meilleure infiltration des eaux superficielles. Par ailleurs, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes ou des argiles, avec une végétation moyenne, présente souvent une densité de drainage élevée, ce qui favorise le ruissellement des eaux superficielles aux dépens de l'infiltration. Il existe une étroite relation entre les écoulements superficiels et souterrains, en particulier le long des principaux axes de drainage que constituent les mégafractures du socle. Les variations spatiales des perméabilités induites montrent que l'alimentation des aquifères se fait à travers les axes de drainage les plus développés (Biémi *et al.*, 1991).

- l'index d'humidité topographique (Qualité des sols)

L'évolution dynamique de l'occupation du sol implique le recours à l'imagerie satellitaire pour disposer d'une information plus récente par rapport à celle des cartes topographiques disponibles actuellement et dont la plupart datent des années soixante (Rakotomanana, 2006). Les méthodes de classification classiques donnent des résultats déjà appréciables (Cheng *et al.*, 2004), toutefois il est encore possible d'améliorer ces résultats en utilisant des méthodes contextuelles qui prennent en compte le voisinage plutôt que les valeurs spectrales des pixels pour faire la classification (Hillion *et al.*, 1989 ; González *et al.*, 1991 ; Stuckens *et al.*, 2000; Caloz et Pointet, 2003).

L'hypothèse de base dans l'index d'humidité topographique est que la topographie est l'un des plus importants facteurs influant sur l'eau. L'on suppose que les écoulements sont gérés par l'approche dite des "aires contributives". Ce qui entraîne la définition de potentialité de saturation (Puech, 1997). L'espace est alors découpé selon le relief en utilisant les modèles numériques de terrain. Les attributs topographiques peuvent caractériser l'écoulement de l'eau ainsi que des attributs qui sont liés à l'eau et au contenu du sol (Wilson, 2000). Une variété de paysages a été modélisée avec succès en utilisant les indices topographiques tels que l'indice d'humidité topographique (en anglais, TWI, *topographic wetness index*), définie comme :

$$TWI = \ln\left(\frac{a}{\tan(b)}\right)$$

où b est la pente et a, la surface amont drainée. Différents indices topographiques permettent la quantification des caractéristiques topographiques. Ces indices sont largement utilisés, notamment en modèles altimétriques numériques. Ils sont devenus accessibles grâce à la puissance de calcul des ordinateurs. L'index d'humidité topographique a été introduit par Beven et Kirkby (1979), dans le cadre du modèle de ruissellement TOPMODEL (Sorensen, 2007). Le relief du terrain contrôle le mouvement de l'eau dans le paysage. Il influence la structure spatiale des sols et ces attributs. Il est l'un des plus importants facteurs de l'hétérogénéité naturelle sur les terres arables et le rendement. Le modèle numérique de terrain est un facteur stable comparé aux autres de données utilisées notamment en agriculture. L'eau est le principal facteur limitant dans l'agriculture. La distribution spatiale de l'eau sur un champ est influencée par le flux latéral, et par conséquent, contrôlée en partie par l'élévation des terrains (Schmidt, 2003). La topographie est l'un des principaux facteurs contrôlant les processus hydrologiques et pédologiques à l'échelle du paysage. Cela est bien connu que la topographie est l'un des facteurs fondamentaux intervenant dans la formation des sols. Les modèles altimétriques numériques (MAN) et les indices topographiques calculés à partir de ces MAN montrent une relation entre la topographie et les caractéristiques du sol (Seibert, 2007).

2.2.5-Traitement des données pluviométriques

Vu la différence entre les périodes d'observations nous n'avons pas pu dégager un temps d'observations assez long et commun à toutes les stations. Nous avons considéré toutes les stations afin d'avoir un nombre maximum de point d'observations. Pour les années ayant des données manquantes nous avons procédé à une estimation en appliquant le calcul suivant :

$$\frac{((n-1) + (n+1))}{2}$$

n = année aux données manquantes, $(n-1)$: année précédant l'année aux données manquantes
 $(n+1)$: année suivant l'année aux données manquantes

Il est à noter que dans notre cas nous n'avons jamais rencontré deux années successives aux données manquantes.

Les erreurs, systématiques ou aléatoires, pouvant affecter les mesures prises par des pluviomètres sont liées à plusieurs facteurs tels que le caractère discret de la mesure, la sensibilité au vent sur le site autour du capteur, la technologie du capteur (captation et comptage) et du système d'enregistrement (horloge et digitalisation) n'ont pas pu être déterminés puisque nous n'avons pas eu accès à la liste des pluviomètres utilisés et au protocole de mesure. De façon générale, ces erreurs s'avèrent proportionnellement plus importantes pour des pas de temps petits et pour des intensités faibles (Ramos, 2002). Pour notre étude nous avons estimé que ces erreurs étaient négligeables et que les valeurs mesurées étaient représentatives de la réalité.

L'ajustement linéaire a but de remplacer le nuage point obtenu avec les valeurs mesurées par une courbe d'équation représentative de l'évolution pluviométrique. Il s'agit ici de faire ressortir la tendance de l'évolution de la pluviométrie afin d'établir des comparaisons entre les quantités d'eau précipitées au cours du temps. Nous avons utilisé une fonction polynôme de degré deux qui grâce à son allure parabolique montrera l'évolution générale de la pluviométrie sur chaque station de mesure.

2.2.6 -Traitement des données de puits et forages

Le traitement des relevés de puits et forages consiste à vérifier l'existence de corrélation entre les différents paramètres des ouvrages, d'évaluer l'influence de cette corrélation sur l'analyse statistique des résultats et d'exploiter les informations issues de l'analyse géostatistique pour déterminer une structuration spatiale de ces différents paramètres. Une propriété souvent constatée lors de l'observation de données à caractère spatial est que les valeurs x_i prises par une même variable X en différents lieux i présentent des relations entre observations proches dans l'espace. On parle de données autocorrélées spatialement. Des mesures d'autocorrélation spatiale permettent dès lors d'estimer la dépendance et la corrélation spatiale entre les valeurs d'une même variable en différents endroits de l'espace, plus ou moins proches les uns des autres. Il s'agit donc de proposer la structuration spatiale basée sur la mesure d'autocorrélation spatiale. Grâce à cette méthode de

l'autocorrélation spatiale, deux types d'information peuvent être apportées en plus de l'estimation dans les zones non échantillonnées (zones noires) : la structuration spatiale et l'intensité du caractère de la productivité dans l'espace. Après avoir décrit la série de mesures, nous leur appliquerons successivement la procédure statistique classique puis les méthodes géostatistiques, afin de comparer leurs résultats et mettre en évidence l'influence et la corrélation entre les mesures et l'évaluation de la production.

-La loi de Benford

La première condition pour représenter un état est de disposer de données suffisantes ; afin de s'affranchir des erreurs induites par l'évolution temporelle et spatiale de la productivité de l'aquifère. Du fait de l'absence d'un réseau adapté à la surveillance des eaux souterraines, nous ne possédons pas d'informations suffisantes pour satisfaire une analyse spatio-temporelle. Nous avons considéré que les données rapportées au cours des campagnes hydrauliques sont représentatives des réalités du terrain. Néanmoins certaines données sont à prendre avec réserves, car les mesures sur le terrain ne semblent pas toujours accomplies avec la rigueur nécessaire ; de plus les valeurs réelles (sondages, valeurs de débits des puits ou forages non équipés) ont tendance à être estimées. Pour le contrôle et la validation des données nous avons utilisé la loi de Benford (figure 39) qui stipule que : le premier chiffre décimal x vérifie une loi de répartition de la forme $P(x=n) = \log(1 + \frac{1}{x})$ pour $n=1,2,...,9$. Ceci peut également être interprété par un tracé fractal parabolique : les petites valeurs sont beaucoup plus abondantes que les grandes. La loi de Benford donne une distribution fractale parabolique parfaite. La loi de Benford nous permettra de faire ressortir les irrégularités dans nos données de puits et forages comme le font les méthodes sismiques dans la disposition des structures géologiques du sous-sol. De façon pratique nous allons tracer les courbes de chaque paramètre étudié selon Benford et par la suite les interpréter par rapport au modèle idéal de Benford.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1-RESULTATS DU TRAITEMENT DES RELEVES PLUVIOMETRIQUES

3.1.1- Caractéristique et évolution générale de la pluviométrie

L'objectif de ce chapitre n'est pas d'étudier le fonctionnement hydrologique des bassins et sous-bassins versants du département de Katiola. Nous ne partons pas avec une idée a priori d'étudier le fonctionnement physique des bassins versants en analysant les chroniques de pluies. Notre étude se concentre sur l'observation des quantités d'eau qui tombent sur le département. Il est important d'accorder un statut particulier au suivi de la pluviométrie dans la mesure où le régime des puits et forages reflète le rythme et la cadence de la pluviométrie. Cela se manifeste par un tarissement ou une baisse très sensible du niveau d'eau des puits et forages durant la saison sèche.

La Côte d'Ivoire est divisée en quatre zones climatiques à savoir les climats attéen, baouléen, soudanais et le climat de montagne. Le département de Katiola est entièrement situé dans la zone de climat soudanais. Ce climat se caractérise par une saison sèche et une saison pluvieuse.

Les données utilisées pour la construction des courbes présentées ci-dessous concernent les stations de Katiola, Tortiya, Tafiré, Bouaké, Niakaramandougou, Mankono, Séguéla, Dabakala ; elles peuvent être considérées comme représentatives de l'ensemble du département. En chacune des huit stations pluviométriques est considéré le cumul de pluies avec un pas de temps annuel. Les mesures à la base de la définition des pluies sont effectuées à des pas de temps journaliers.

De nombreux travaux consacrés à l'étude des mécanismes hydrométéorologiques de l'Afrique de l'ouest et centrale mettent l'accent sur les variations du régime pluviométrique observées dans ces régions depuis plus de vingt cinq ans et sur leurs conséquences souvent tragiques. Caractérisé essentiellement par une baisse sensible de la pluviométrie vers la fin des années 60 (figure 18 à 25) et une diminution des apports en eau de surface, ces fluctuations déjà très importantes dans les régions sahéliennes semblent s'étendre plus au sud vers l'équateur (Khodja *et al.*, 1998). Ce phénomène s'observe déjà pendant la décennie 1970 et s'amplifie pendant les années 1980 (figure 18 à 25). Selon Servat (1997), les secteurs à très forte pluviométrie ($> 2\,400$ mm/an) disparaissent en certains endroits. A l'inverse, la zone à faible pluviométrie (800 à 1200 mm/an) s'est considérablement étendue, entraînant en de

nombreux endroits un passage d'un régime climatique guinéen à un régime soudanais. En outre, si, jusqu'à la fin des années 1960, l'isohyète 1 600 mm apparaissait comme caractéristique d'une pluviométrie moyenne en zone forestière, elle ne l'est plus dans les années 1970.

L'évolution moyenne des températures de surface de la mer, depuis 1945, a correspondu à un réchauffement océanique dans l'hémisphère Sud, océan Indien compris, et un refroidissement océanique dans l'hémisphère Nord. Cet effet se traduit de façon différente sur la pluviosité dans le domaine guinéen, suivant la phase du cycle saisonnier. Les précipitations sur cette région se produisent dans la zone de convergence intertropicale. Située en limite sud du domaine durant la grande saison sèche, elle remonte vers le nord pendant la première saison des pluies pour atteindre la région sahélienne durant la petite saison sèche, puis redescend rapidement durant la seconde saison des pluies. Les régions sahéliennes au sud du Sahara connaissent, depuis 1968, un état de sécheresse persistant. Cette situation est d'autant plus durement subie par les populations qu'elle a succédé aux décennies 50 et 60 fortement excédentaires en précipitations (Nicholson *et al.*, 1988). Au cours des quatre décennies plus particulièrement étudiées, 1950 à 1980, on note une diminution généralisée de la pluviométrie. Les régions situées au Sud du Sahel ont également subi une fluctuation climatique à la fin années 1960. Les régions dites « humides » ont ainsi vu leur régime pluviométrique profondément modifié depuis plus de 25 ans. Sur l'ensemble du département de Katiola, la pluviométrie a subi d'importantes modifications qui se traduisent par des diminutions de précipitations annuelles. On constate également sur toutes les stations pluviométriques voisines, une tendance à passer à régime « soudanien » plus sec. Du point de vue de la ressource et de son utilisation, il est évident que de telles modifications ne sont pas sans conséquences. L'agriculture, l'alimentation des retenues et la production hydroélectrique, entre autres, sont fortement pénalisées par cette baisse de la pluviométrie. Les conséquences de ce phénomène sont donc très inquiétantes en ce qui concerne le bon fonctionnement et la rentabilité agricole. Mais les effets de cette variabilité climatique peuvent, malgré tout, se révéler désastreux, en ce sens qu'ils modifient les données d'un équilibre déjà souvent mis à mal.

L'analyse des données pluviométriques du département de Katiola permet de constater que la vallée du Bandama connaît également une tendance avérée à la diminution des quantités d'eaux tombées (Figures 18 à 25).

Le régime hydrologique du département de Katiola est soumis au changement climatique. Il n'y a pas de dispositif mis en place pour observer et maîtriser l'hydrologie. Les précipitations mensuelles maximum ont lieu au mois de juillet et d'août. Les courbes obtenues montrent une décroissance relativement faible des lames d'eau. La pluviométrie moyenne annuelle sur le bassin versant est de 950 millimètres. Elle se caractérise également par une forte saisonnalité : les pluies sont très abondantes au mois de juillet, août et septembre (moyenne de 140 millimètres en octobre) et très faibles voire nulles en période d'harmattan (décembre, janvier, février). L'ajustement polynomial d'ordre deux des courbes de la pluviométrie permet d'approfondir ces premières constations en ce sens que vues les courbes des stations de Katiola, Tafiré, Mankono et Dabakala, la durée de chaque période est estimée à quarante ans. Cette alternance de périodes n'est pas homogène et varie selon les stations. La période entre 1975 et 2000 constitue la période de référence car elle est commune à tous les postes étudiés et présente une forte densité d'informations.

Une première analyse des séries chronologiques disponibles montre une alternance entre période sèche et période humide. La tendance générale est la diminution de la pluviométrie et un allongement de la période sèche. Les activités humaines contribuent à accroître ce phénomène de sécheresse. On peut ainsi citer l'exemple de feux de brousse ou le défrichage pour la création de champ d'anacardes. Il y a également, d'une part, l'avancée du désert qui se traduit par la diminution des quantités de pluies tombées et, d'autre part, le changement de saison. Selon Fontaine (1997) la baisse des précipitations de la première saison des pluies entre 1945 et 1994 est associée à un réchauffement des températures de la mer dans l'océan Indien, l'Atlantique Sud, partiellement le Pacifique intertropical, ainsi qu'à un refroidissement dans les hautes latitudes des océans de l'hémisphère Nord. Concernant la deuxième saison des pluies, la baisse des précipitations est associée principalement à la variation des températures de la surface des mers dans les hautes latitudes et les latitudes intertropicales de l'Atlantique Nord.

Une variabilité « inter-décennale » se traduit par une alternance de séquences d'années sèches ou humides. Ces séquences ont une durée comprise entre 10 et 20 ans. La dernière séquence sèche s'est produite entre 1970 et 1990 avec un déficit moyen sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest de 200 millimètres (Azonsi, 2002).

Les différents graphiques relatifs à la variation de la pluviométrie sont représentés ci-dessous (Figures 18 à 25).

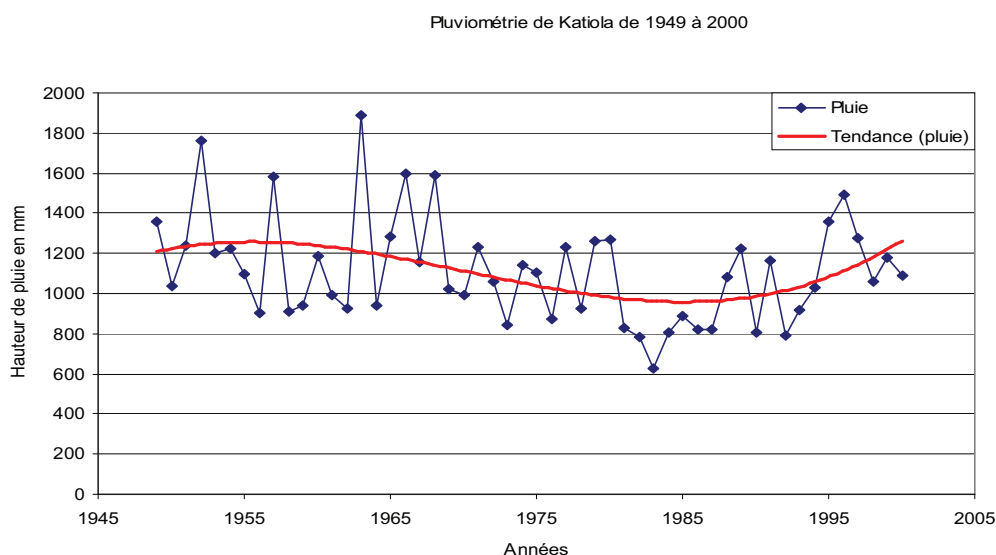


Figure 18: Pluviométrie annuelle de la sous-préfecture de Katiola de 1949 à 2000

Les valeurs moyennes de la pluviométrie relevée à la station de Katiola montrent une décroissance depuis 1945 jusqu'à 2005. A cette décroissance de la pluviométrie se mêle une alternance de périodes sèches et de périodes humides. Après 1985 on observe une croissance de la pluviométrie qui s'explique un retour cyclique (figure 18).

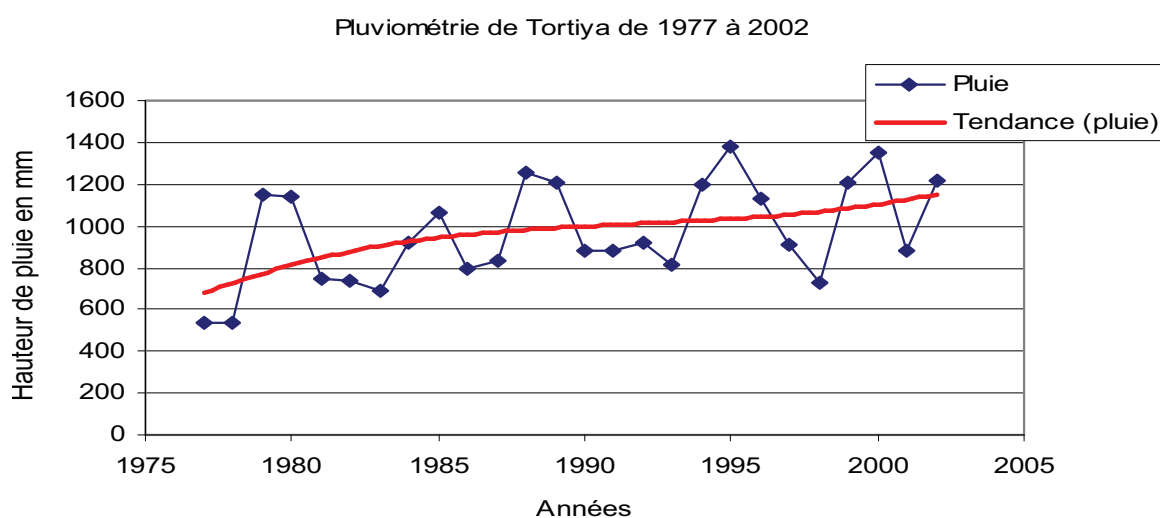


Figure 19: Pluviométrie annuelle de la sous-préfecture de Tortiya de 1977 à 2002

Depuis la fin des années 80, le pluviomètre de Tortiya voit sa hauteur de pluie croître de façon sensible et progressive. Il existe également sur ce pluviomètre une succession de périodes sèches et de périodes humides ceci avec augmentation de la hauteur de pluies tombées. Cette augmentation de la pluviométrie pourrait s'expliquer par la fermeture des mines de diamant qui a entraîné avec elle le dépeuplement et la migration des populations vers les plantations sucrières de Ferkéssédougou et les régions de la basse côte de la Côte

d'Ivoire. Le départ des populations s'est avec l'abandon des champs et des parcelles cultivées. Ce qui a permis à la végétation de se reconstituer et de favoriser les précipitations.

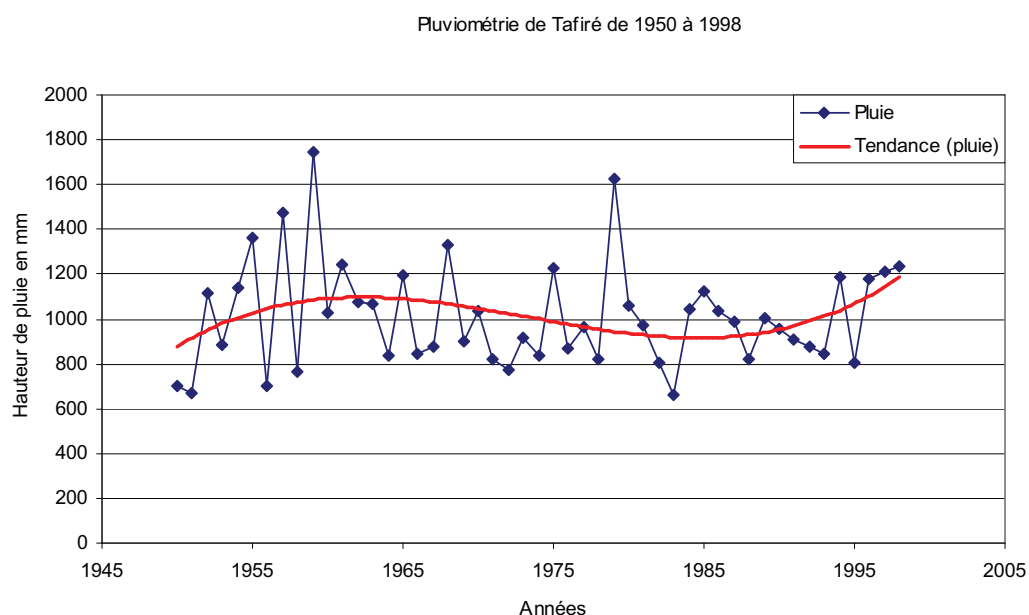


Figure 20: Pluviométrie annuelle de la sous-préfecture de Tafiré de 1950 à 1998

La pluviométrie de Tafiré est semblable à celle de Katiola (figure 20). Nous observons une suite de périodes sèches et de périodes humides. La baisse de la hauteur de pluie tombée sur Tafiré est plus accentuée que celle de Katiola. La création de nouvelles parcelles de canne à sucre et la forte migration des populations des départements voisins vers ces zones entraîne la destruction de la végétation et la dégradation de l'environnement. Cette destruction de la végétation et de dégradation de l'environnement crée un nouveau climat qui serait à l'origine de la baisse de la pluviométrie.

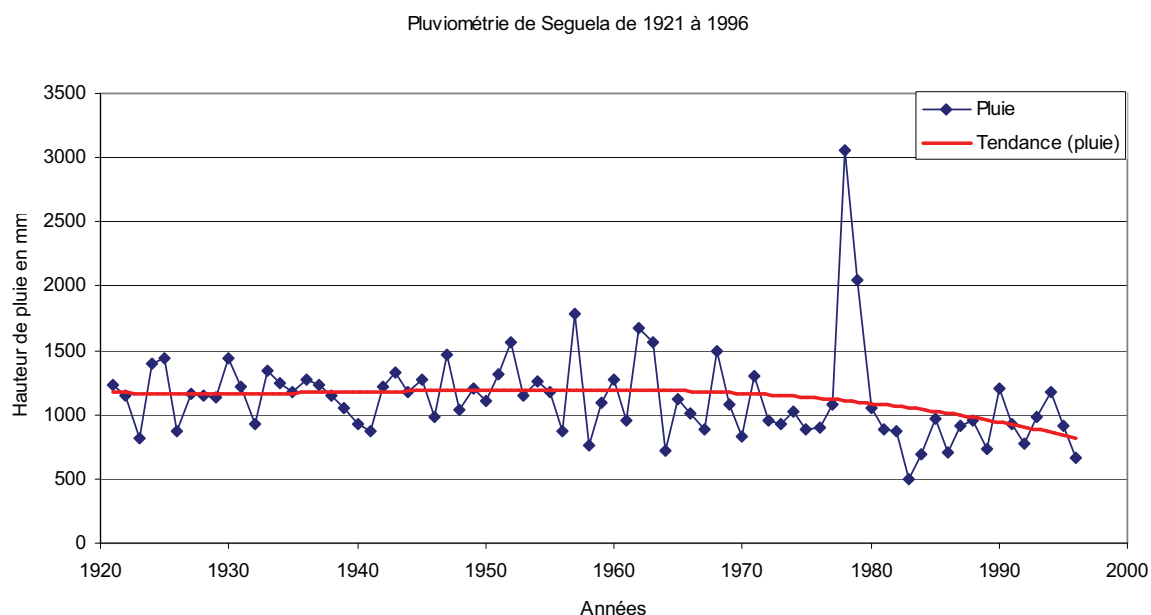


Figure 21: Pluviométrie annuelle de la sous-préfecture de Séguéla 1921 à 1996

La pluviométrie de Séguéla garde une certaine constance jusque dans les années 70 où elle commence à décroître de façon nette (figure 21). Elle atteint son plus bas niveau en 1983 qui a été une année de grande sécheresse en Côte d'Ivoire. Après l'année 1983, elle commence à croître mais elle n'atteint toujours pas son niveau moyen d'avant 1970.

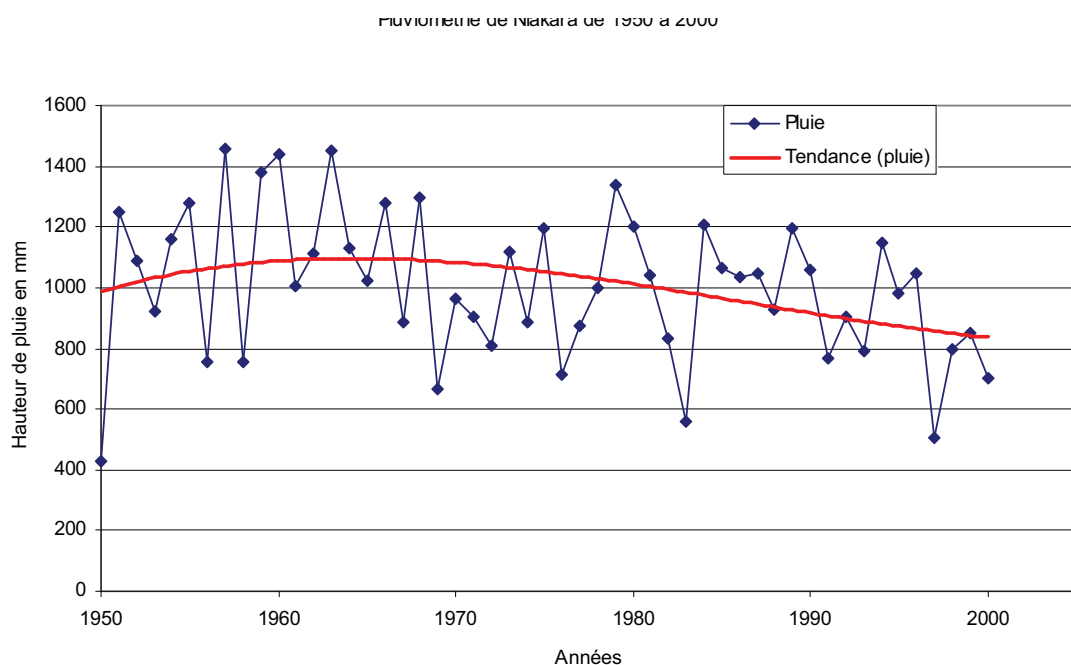


Figure 22: Pluviométrie annuelle de la sous-préfecture Niakaramandougou de 1959 à 2000

La pluviométrie du département de Niakaramandougou connaît une tendance à la baisse (figure 22). Cette baisse est importante et ne connaît pas de succession de périodes

humides et périodes sèches comme c'est le cas département de Katiola et de Tafiré. Cela s'explique par une technique culturale de type abattis-brûlis et une pratique ancestrale des feux de brousse durant la saison sèche pour organiser des parties de chasse. Ces deux pratiques constituent les causes quasi exclusives de la dégradation de l'environnement forestier. La dégradation de cet environnement forestier crée des savanes herbeuses ; perturbant ainsi le régime des pluies.

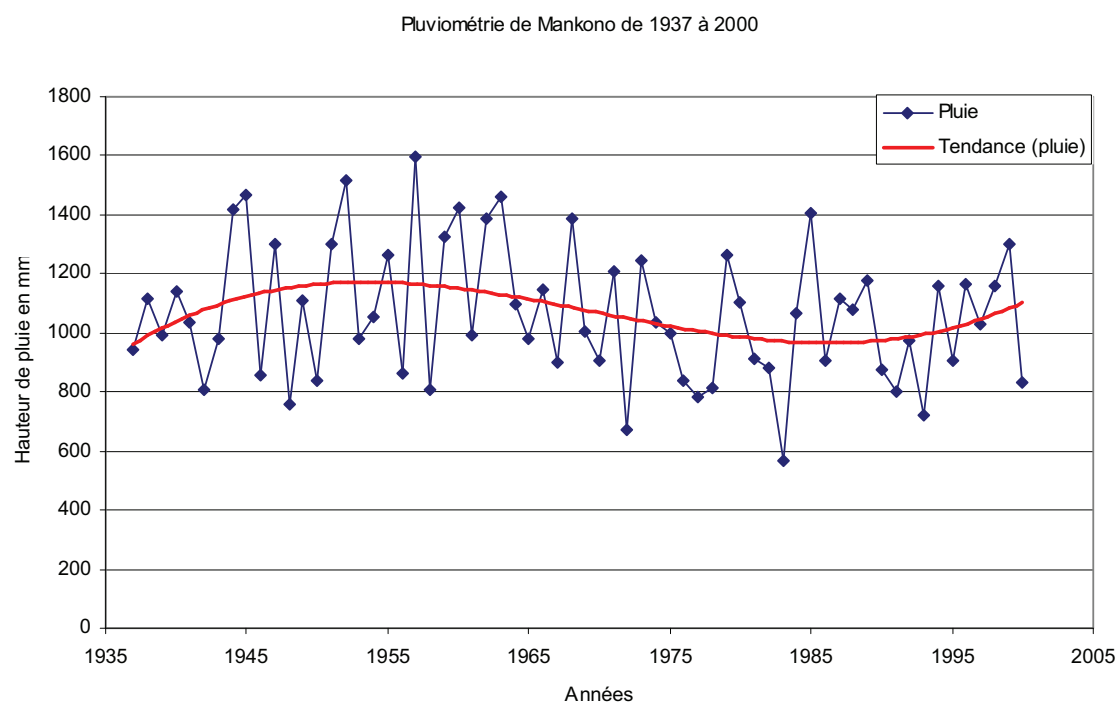


Figure 23: Pluviométrie annuelle de la sous-préfecture de Mankono de 1937 à 2000

L'évolution de la pluviométrie de Mankono se fait par une alternance de périodes humides et périodes sèches. Elle est accompagnée par une baisse de la lame d'eau précipitée au fil des années.

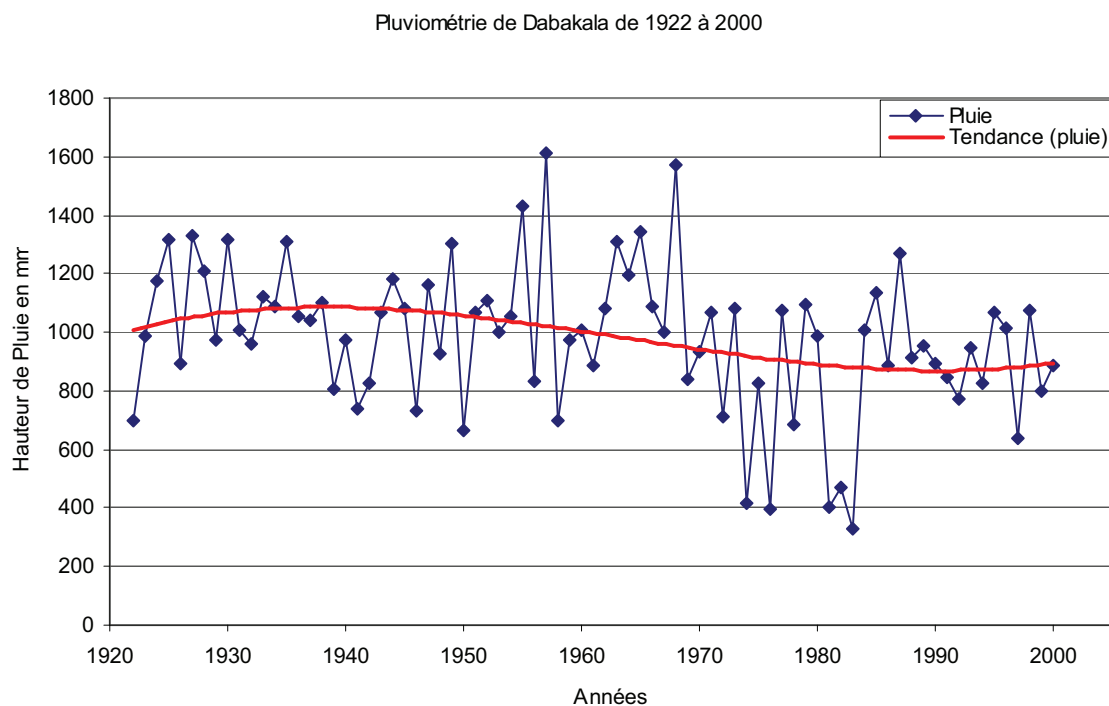


Figure 24: Pluviométrie annuelle de la sous-préfecture de Dabakala de 1922 à 2000

Le pluviomètre de Dabakala connaît comme tous les autres pluviomètres une tendance avérée à la baisse de hauteur d'eau précipitée, alternée par des périodes humides et des périodes sèches.

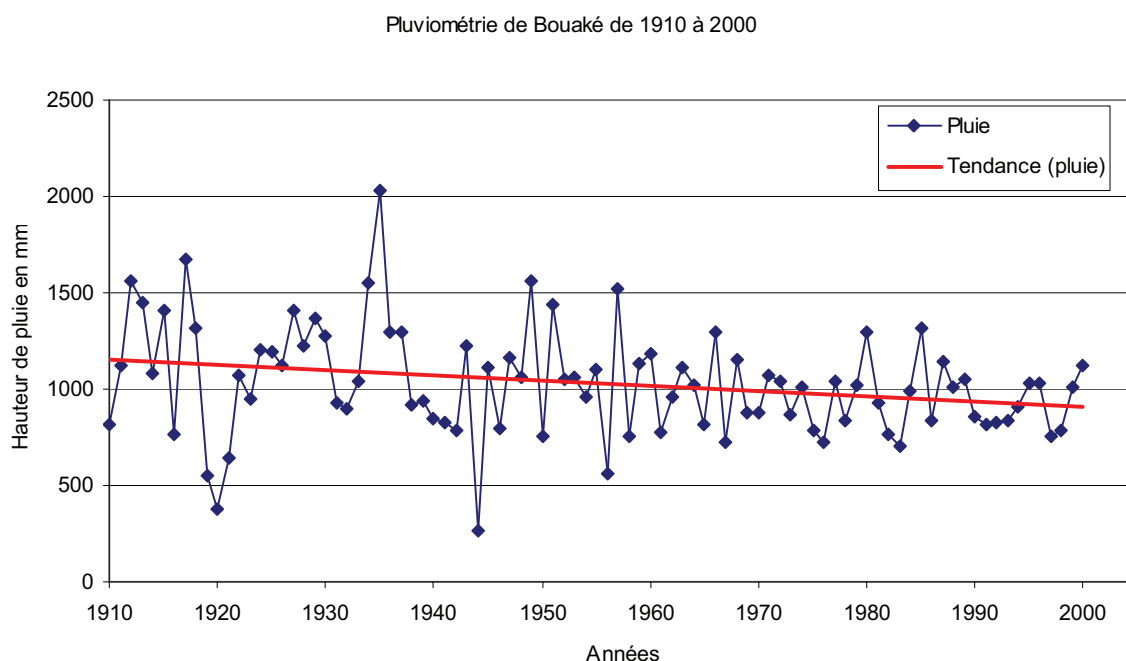


Figure 25: Pluviométrie annuelle de la sous-préfecture de Bouaké de 1910 à 2000

Le pluviomètre de Bouaké est le seul pluviomètre autour duquel la hauteur de pluie tombée tant à se stabiliser autour de certaines valeurs. Nous observons qu'au fil des années la

baisse de la pluviométrie est quasi nulle. Cela pourrait s'expliquer par la très faible proportion de terre cultivées et une constante migration de la population de cette zone vers la basse côte de la Côte d' Ivoire. A cela s'ajoutent les périmètres de reboisement créés dans le cadre de projet AVB (Aménagement de la Vallée du Bandama).

Conclusion partielle

L'analyse statistique de séries chronologiques de données hydrologiques au pas de temps annuel est un outil d'identification de variations climatiques. Il apparaît que ces alternances de périodes sèches et humides ont eu une ampleur spatiale et temporelle ainsi qu'une intensité très variable. Au cours de la première moitié du siècle (période comprise entre 1930 et 1950), les modifications ont eu tendance à correspondre à une augmentation de la pluviométrie annuelle alors que la tendance s'est inversée à la baisse après la fin des années 1960. Les bassins versants du département de Katiola ont donc enregistré des diminutions de quantité d'eau précipitée depuis la fin des années 60. La production hydroélectrique, l'agriculture et l'alimentation en eau potable se trouvent menacées par cette diminution de la pluviométrie qui dure depuis plus de quarante ans. Cette diminution de la pluviométrie risque de s'accroître à l'avenir et engendrer des problèmes d'ordre démographique et foncier.

3.2-RESULTATS DU TRAITEMENT DES IMAGES SRTM

Dans le paragraphe 3.1 nous avons estimé les quantités d'eau qui tombent sur le département de Katiola. Dans ce paragraphe nous allons modéliser à partir des images SRTM l'environnement topographique qui recueille ces eaux.

L'étude sur les images SRTM a généré une masse d'informations numériques relatives aux ressources en eaux de surface et aux bassins versants. Elle a également conduit à actualiser et compléter la base d'informations sur les bassins versants qui pourra servir à l'établissement d'un plan d'aménagement et de gestion des ressources en eaux de surface. L'algorithme de connexité huit (D8) appliqué aux images donne des résultats assez intéressants. Il faut noter toutefois qu'il existe des risques importants d'erreurs si les images n'ont pas été corrigées. Il est à noter aussi que la précision des résultats obtenus est liée à la qualité des images et à la performance des algorithmes utilisés dans les logiciels. Les différents modèles de la région de Katiola ont été générés à partir de l'imagerie SRTM dégradée à 90m lissée dans le logiciel MapWindow. Le lissage avait pour objet de réduire les effets résiduels affectant l'imagerie SRTM pour un meilleur rendu. C'est une boîte à outils hydrologique comparable à Arctoolbox de Arcgis. Elle est développée par la *Utah State University* et ses fonctionnalités sont incluses dans MapWindow. Les fonctionnalités utilisées pour extraire le réseau hydrographique et les petits bassins versants incluent : 1) le remplissage des dépressions pour assurer la connectivité hydraulique, 2) le calcul des pentes et directions des écoulements, 3) le calcul des superficies contributrices, 4) la délinéation des réseaux de drainage incluant des méthodes de calcul de courbure du relief (pour les régions à très faible pente), 5) l'ordonnancement du réseau hydrographique suivant la méthode de Strahler, et 6) la délinéation des sous-bassins versants propres à chaque segment du réseau hydrographique. (Source <http://geonetwork.icrisat.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?currTab=simple&id=30>, 07/11/2008).

Les cartes obtenues précisent les directions d'écoulement des cours d'eaux, donnent les limites de bassins et sous-bassins versants. Leur précision est supérieure à celle des cartes de courbes de niveaux obtenues à partir de levés topographiques. Ces images gratuites peuvent être utilisées pour la gestion et l'aménagement des bassins versants ; pour des études d'ordre général et régional ou lorsqu'une meilleure connaissance du milieu est nécessaire.

3.2.1-Caractérisation du relief du département de Katiola

La topographie du territoire est marquée par un relief relativement plat sur la frange sud, s'élevant progressivement vers le Nord avec une succession de plusieurs types de reliefs du nord au sud : une zone collinaire (138 mètres en moyenne), une chaîne montagneuse (555 mètres maximum) et un massif central (694 mètres maximum) (Figure 26). Le modelé du relief participe à l'accélération de la vitesse d'écoulement du cours d'eau. Dans la partie nord, les pentes sont fortes, les rivières ont des écoulements plus rapides. Dans la partie sud le relief est plus doux, les rivières s'écoulent doucement (figure 27). Les faibles vitesses d'écoulement favorisent une infiltration de l'eau dans le sol et les dépôts des matières en suspension dans la partie sud. La zone au nord du département de Katiola est globalement plus vulnérable à l'érosion par rapport à la partie sud.

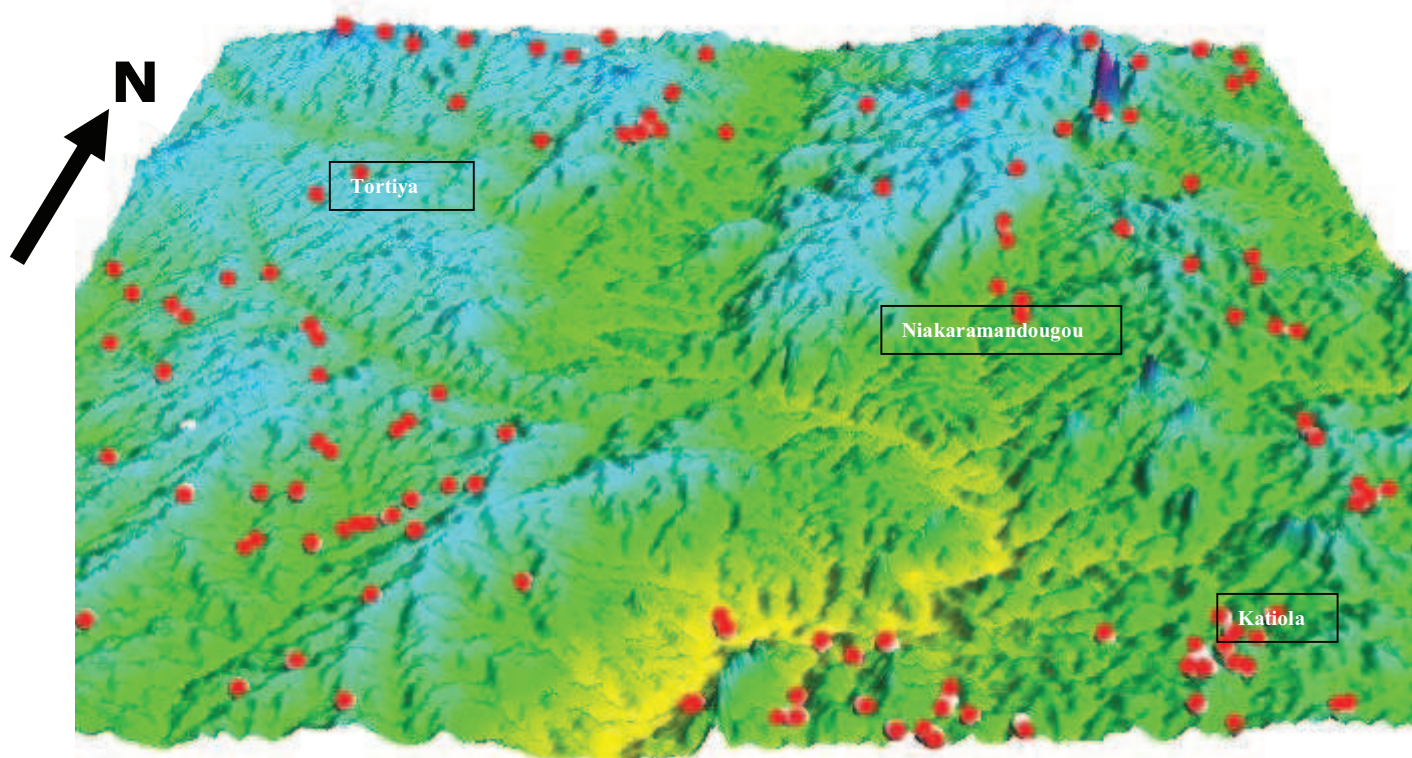


Figure 26 : modèle numérique du département de Katiola vue en 3D

(Les points correspondent aux villes et villages)

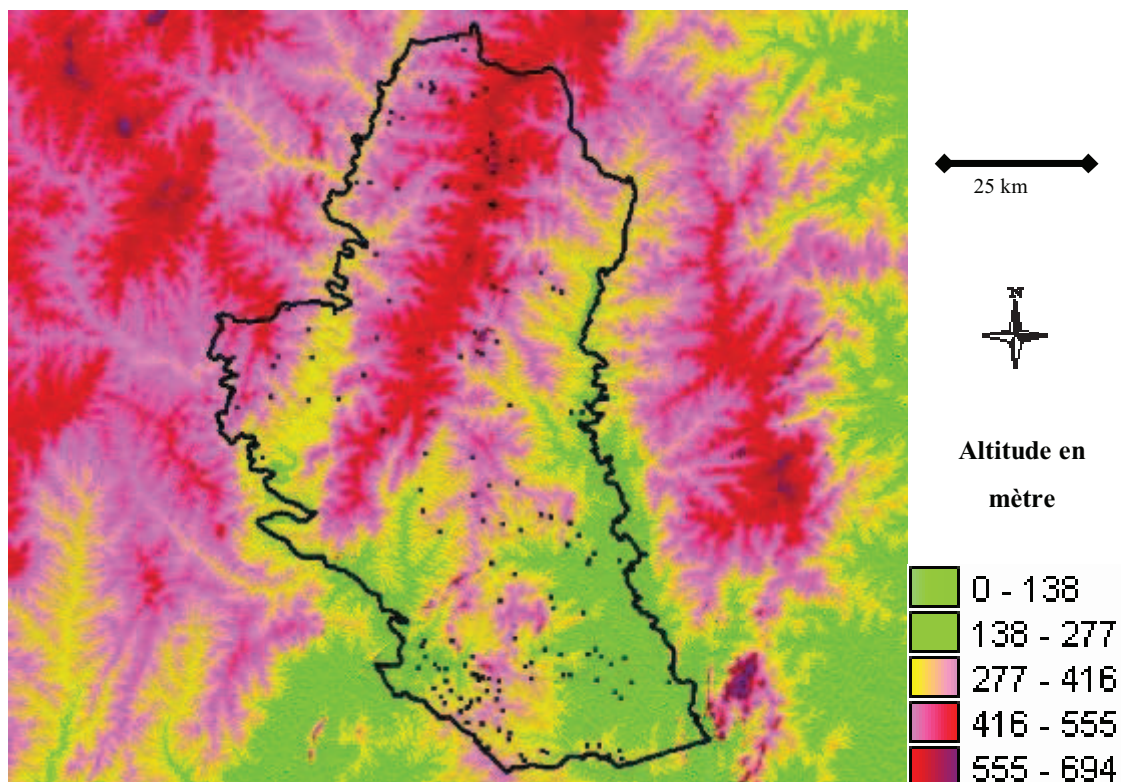


Figure 27: Relief du département de Katiola

(Les points correspondent aux villes et villages)

3.2.2-Carte des sols cultivables

La carte de la figure 28 présente le résultat des terres potentiellement exploitables par les paysans. L'index topographique d'humidité a été utilisé comme une mesure indirecte de l'état de l'eau et de la qualité du sol. Il peut être calculé pour n'importe quel point donné dans le paysage. Comme nous travaillons sur une vaste surface les points sont apparus sous forme de bande. Nous avons trouvé des corrélations significatives entre l'index topographique d'humidité et la répartition des champs et cultures traditionnelles des paysans. En superposant la carte de l'index topographique d'humidité aux images LANDSAT de 1986 et de 2000, nous avons constaté que la presque totalité des champs et cultures traditionnelles se trouvent dans la zone délimitée par l'index topographique d'humidité d'une valeur de 0,00139. Quand on y ajoute la carte de l'ordre du réseau de drainage selon Strahler l'on se rend compte que les champs et les plantations sont situés sur les lignes tracées par l'ordre 4 des cours d'eau dans une classification allant jusqu'à l'ordre 10.

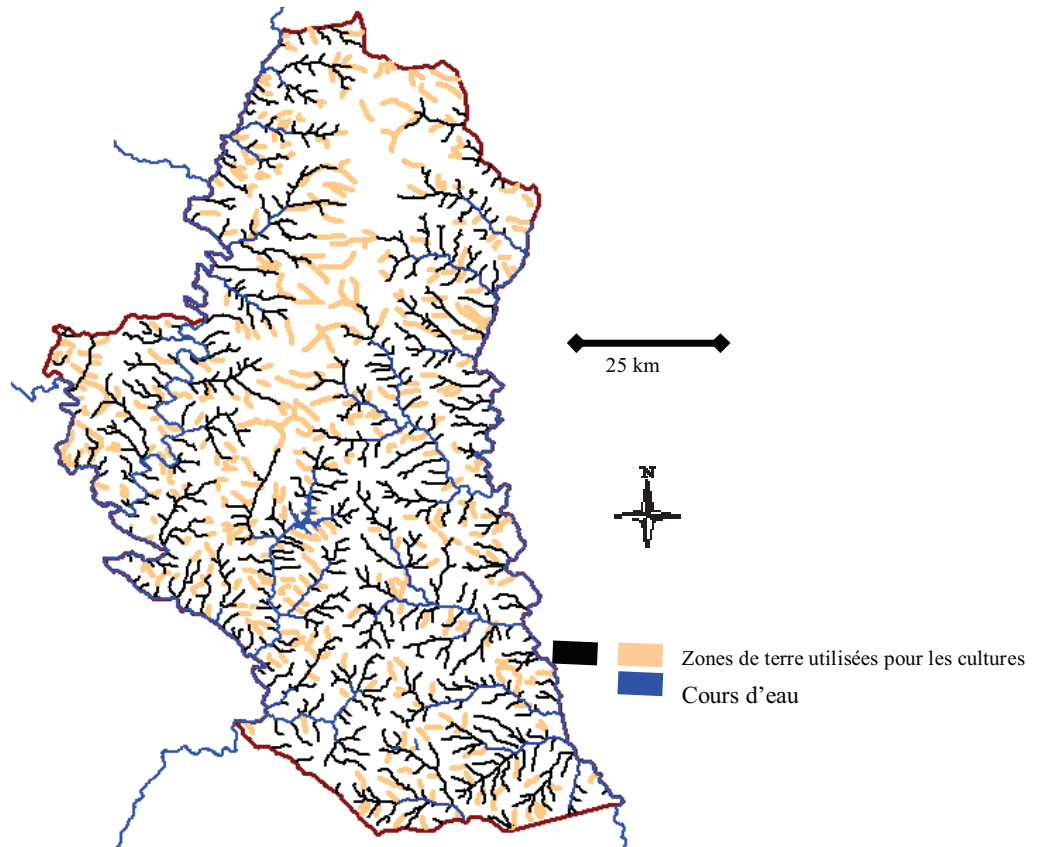


Figure 28 : Carte du réseau hydrographique et des terres potentiellement cultivables

Sur la figure 28 sont représentées en rose les parcelles cultivées ainsi que toutes les parcelles cultivées ayant le même ordre sur le réseau de drainage.

Ce résultat montre bien la corrélation entre la topographie, les sols et la qualité des sols. Malgré l'étendue de notre zone d'étude, il a été possible de trouver une corrélation entre les indices topographiques, la répartition des champs et les caractéristiques du sol. Ces résultats nous permettent d'avoir une nette amélioration de la classification des sols et de leur occupation à partir d'image LANDSAT. Nous pouvons également localiser les bonnes terres, celles qui sont déjà occupées, celles susceptibles d'être occupées par les paysans et d'avoir une meilleure vision pour la gestion des sols. L'utilisation de la topographie en tant que source d'information dans la gestion de l'environnement va augmenter à l'avenir, d'autant que la disponibilité des données d'élévation à haute résolution augmente (Seibert, 2007). Une conclusion est que cette méthode de prévision de la qualité et la distribution du sol basée sur les modèles numériques offre le potentiel de fournir de précieux renseignements et de soutien à la modélisation des processus et des ressources des sols.

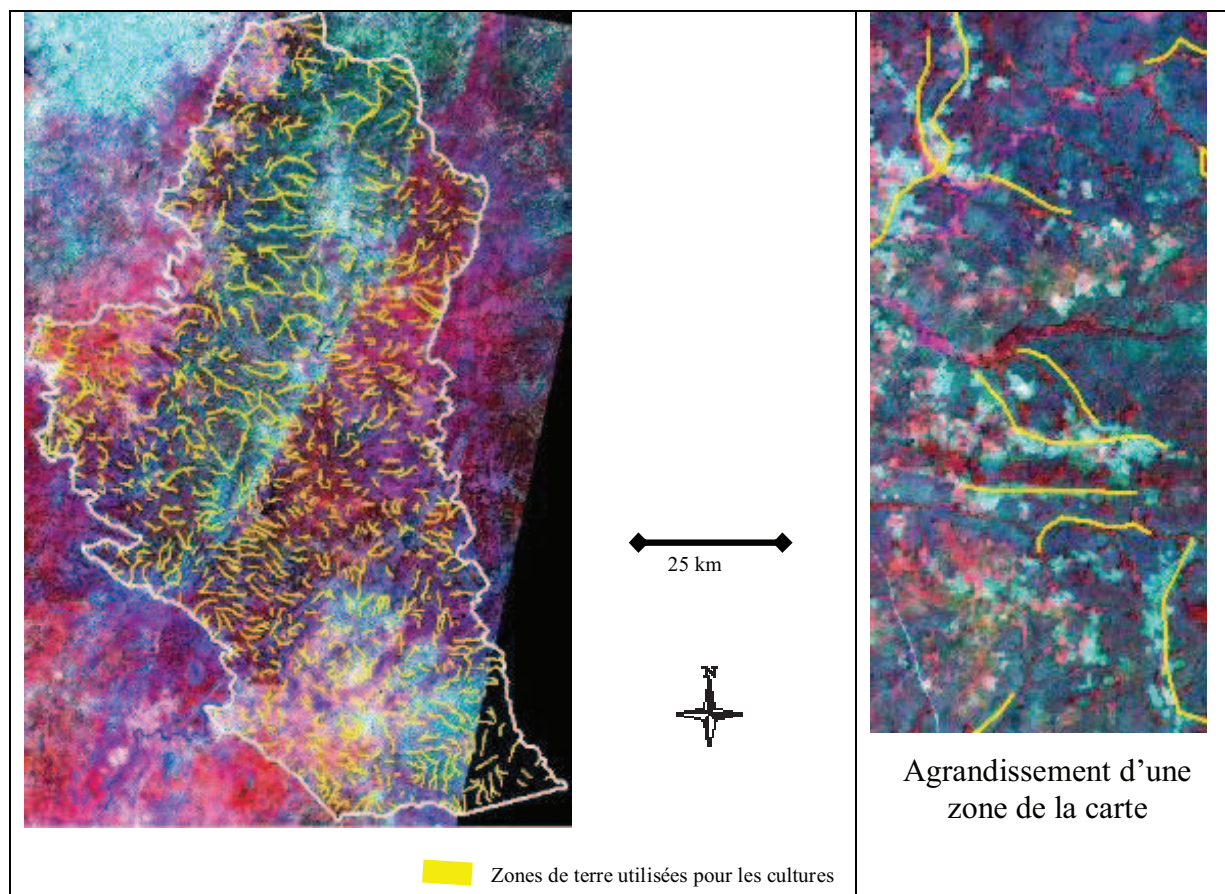


Figure 29 : Carte d'occupation des sols par les champs superposés avec celle du réseau de drainage d'ordre 4.

Les lignes jaunes (Figures 29) représentent l'ordre 4 du réseau de drainage et correspondent aux sols potentiels fertiles, cibles privilégiées des paysans. Les zones vert clair correspondent aux parcelles occupées par les champs.

3.2.3-Principaux cours d'eau du département

Le réseau hydrographique obtenu à l'aide des images SRTM coïncide avec le réseau hydrographique réel. La pluralité des paysages et les caractéristiques topographiques illustrent la complexité physique du département. En effet, le chevelu hydrographique très dense repose sur une topographie assez accidentée dans la partie nord du département et généralement plane dans la partie sud. De façon générale, la qualité des rivières situées dans la partie Ouest du département de Katiola contenues dans le grand bassin du Bandama est globalement influencée par la qualité de l'eau provenant de l'amont des bassins versants, mais surtout des eaux provenant des usines et des plantations sucrières de Tafiré et Ferkéssédougou. D'autre part, le lit de nombreux cours d'eau demeure très instable et diffus, notamment dans les zones de plats et les marécages. Aussi, les cours d'eau de Katiola sont marqués par une dynamique

sédimentaire prononcée, due essentiellement à la forte intensité des pluies tropicales qui disperse les résidus phytosanitaires des champs et les sédiments dans le réseau drainage. Le fonctionnement du réseau hydrographique est profondément influencé par les activités agricoles. C'est précisément le cas de la rivière Lopé, de la rivière Nianra polluée par les riziculteurs de la CORERIZ, du Bandama blanc pollué par les complexes sucriers de la SUCAF, du Bou qui a longtemps été pollué par les mines diamantifères de Tortiya jusque dans les années 80. Il est à noter que le Nabion est la seule rivière que nous avons identifiée et qui n'est pas victime de pollution et d'eutrophisation. Cependant la CORERIZ a dans ces projets à court terme l'intention d'y faire des parcelles de riz. Les tronçons du Nabion subissent l'influence de l'érosion et s'exposent peu à peu à l'érosion (Figure 31).

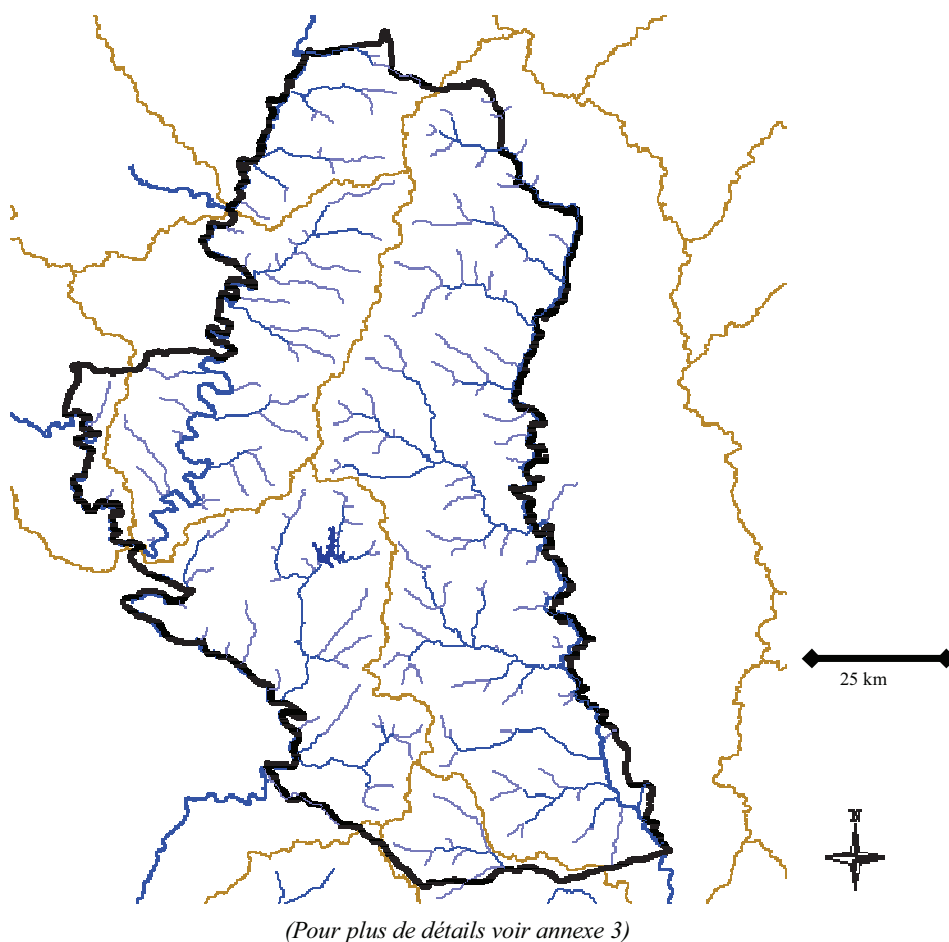


Figure 30: Réseau hydrographique permanent de la vallée du Bandama

Le réseau hydrographique du département de Katiola est soumis à un régime d'écoulement qui suit le rythme de succession des saisons. Son régime est simple et se compose d'une seule alternance annuelle de hautes et de basses eaux. L'orientation des

segments du réseau hydrographique du département de Katiola montre des fréquences dominantes qu'on peut relier aux lignes de structures géologiques. La comparaison des résultats obtenus avec les données de linéaments montre une concordance. Le réseau hydrographique est de type angulaire caractéristique des roches fracturées. Le nombre d'embranchements et l'organisation des rivières permettent de se rendre compte du cumul d'arrivée des eaux sur l'exutoire. Les nœuds d'affluence sont des zones plus sensibles aux inondations en cas d'événement extrême (pluies diluviennes).



Figure 31 : Phénomène d'érosion sur la digue du barrage de Kafiné

3.2.4-Le réseau de drainage (ordre des cours d'eau selon Strahler)

A l'échelle du bassin versant l'organisation du réseau de drainage, en relation avec l'occupation du sol, est un élément clé pour comprendre la genèse des pollutions d'origine agricole. L'analyse de l'organisation du réseau de drainage permet d'apporter des éléments de connaissance sur le fonctionnement des bassins. Le réseau est de type angulaire caractéristique des formations de socle. Il permet de faire ressortir tout le parcours des eaux de précipitation contributives à l'élaboration du système de suivi de la qualité des eaux, et d'explorer des modes de gestion. En effet il contribue à identifier les zones tampons en fonction de l'occupation du sol. Placées le long du réseau de drainage, ces zones tampons auraient pour rôle de suivre la pollution issue des champs (usage de produits phytosanitaires prohibés) ou d'origine urbaine, et de contribuer à l'implantation d'ouvrages.

La classification de Strahler reflète la ramification du réseau hydrographique (figure 32). Le réseau extrait à partir des images SRTM correspond aux lignes de talweg incluant les cours d'eau permanents ou temporaires. Une validation de terrain nous a permis de déterminer que jusqu'à l'ordre 3 nous avons des cours d'eau permanents. Au-delà de cet ordre les cours d'eau sont intermittents ou correspondent à des chemins de ruissellement d'eau pluviale (ligne de talweg, drain, fossés). Les ressources en eau souterraine du département se trouvent dans les fissures des formations de socle ou encore dans les zones altérées de leur partie supérieure. Dans les cas où la roche présente une altération dans sa partie supérieure, le principal réseau d'infiltration des cours d'eau correspond à la zone d'infiltration des eaux de surface vers les nappes souterraines jouant ainsi le rôle de drain.

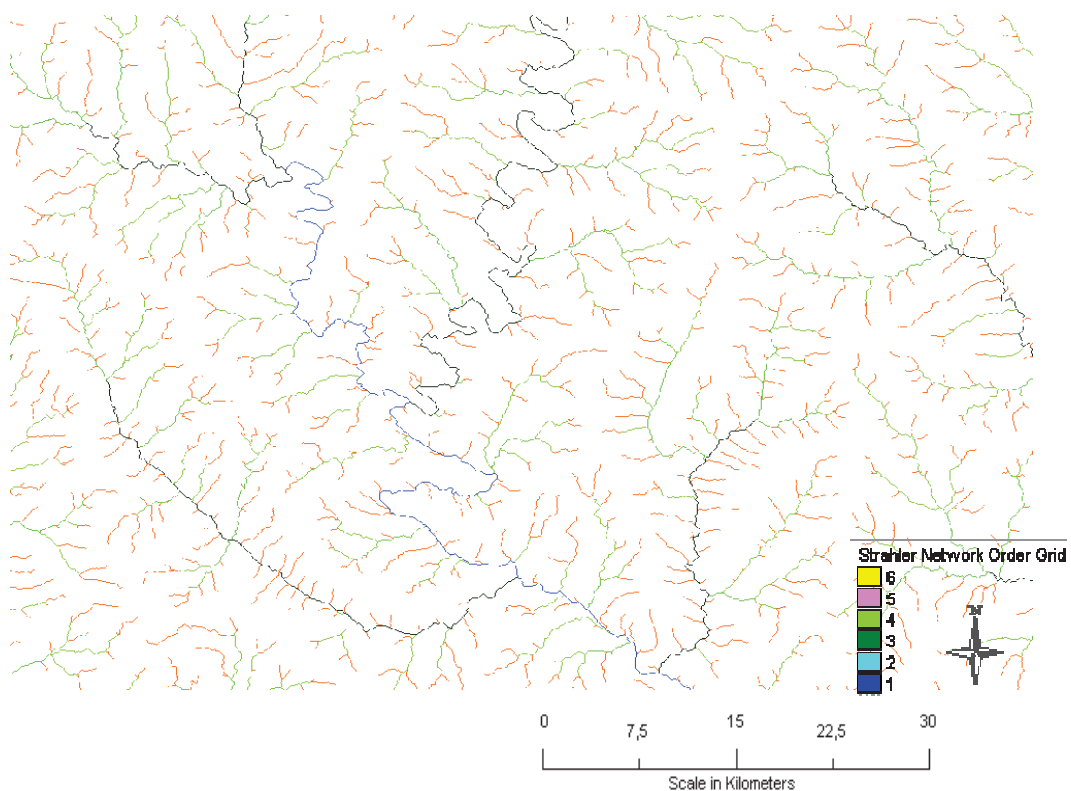


Figure 32: L'ordre des cours d'eau selon Strahler

3.2.5-Bassin hydrologique du département de Katiola

Le département de Katiola est séparé en deux parties très inégales par une ligne de crêtes, sorte de "colonne vertébrale" qui s'étend vers l'Est depuis les Monts Niangbo jusqu'au sud du département de Katiola. Le département n'a pas de bassin versant ou de sous-bassin versant propre. Il se situe à cheval entre le bassin versant du fleuve Bandama et le bassin versant du fleuve Comoé. Au nord il partage ses bassins avec le département de

Ferkéssédougou et de Korhogo, à l'est avec le département de Dabakala, au sud avec le département de Bouaké et de Béoumi, à l'ouest avec le département de Mankono et de Korhogo. Son réseau hydrographique est découpé en six sous bassins versants débouchant à l'Ouest sur le fleuve Bandama et à l'Est sur le fleuve Comoé. Les superficies vont de 176 km² à 1945 km². Ces bassins versants sont généralement de type rural. La partie Est qui se jette dans le fleuve Comoé est composée de deux bassins. La partie Ouest qui se jette dans le Bandama est composée de quatre bassins. Ce sont de très petits bassins et leurs cours d'eau s'écoulent vers le sud. Parmi ces bassins versants, on peut citer les deux plus étendus qui ont chacun une superficie de 1885 et 1945 km². Le relief du département est peu accidenté de ce fait les berges des cours et les pentes des bassins reflètent l'allure du relief du département. Les terres cultivées par les paysans dans chaque bassin du département de Katiola possèdent le ordre sur l'échelle des cours de Strahler. Ces terres se présentent sous forme de bandes et sont facilement observable sur les satellites Landsat (figures 29). À l'échelle de la Côte d'Ivoire, les bassins du département reste de petite taille en comparaison à ceux des grands fleuves du pays. Ses cours d'eau acquièrent l'essentiel de leur composition chimique à travers le réseau de drainage qui traverse les champs et les agglomérations urbaines et rurales. Les bassins versants de Katiola sont en moyenne peu étendus. En conséquence, le temps de séjour de l'eau dans le réseau hydrographique est court ce qui limite la capacité auto-épuratrice du réseau. Les activités anthropiques occupent une part prépondérante de ces bassins versants ; elles laissent un espace restreint et très fragmenté aux zones naturelles telles que les zones humides de fonds de vallée qui peuvent participer de l'épuration de certains polluants. Ces deux facteurs concourent à rendre les cours d'eau du département plus sensibles aux pollutions, qu'elles soient ponctuelles ou diffuses.

Dans le département de Katiola où les prélèvements dédiés à l'agriculture et à l'eau potable se font à 80 % dans les eaux de surface, la maîtrise de la variabilité de la ressource superficielle est importante pour assurer le maintien des activités humaines et le bon état écologique des milieux aquatiques.

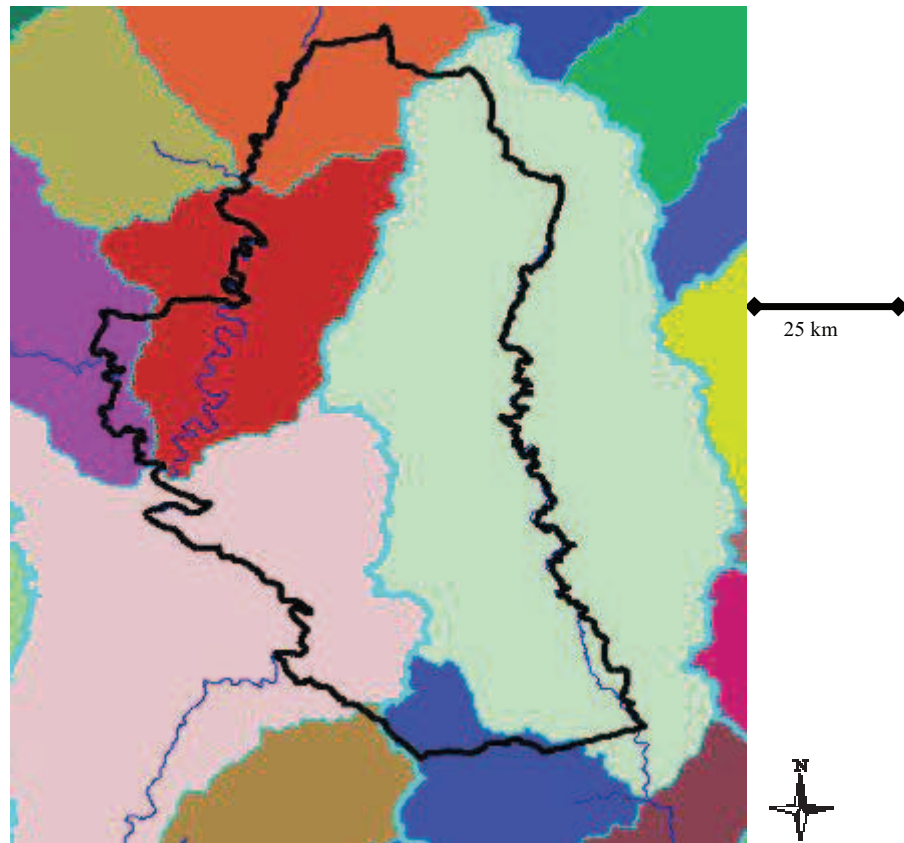


Figure 33: Bassins versants du département de Katiola

Conclusion partielle

Au terme de cette partie de notre étude, nous avons extrait les paramètres géométriques des bassins du département de Katiola et vérifier l'exactitude de ces données extraites des images. Les images SRTM montrent qu'il est possible d'obtenir une assez grande quantité d'informations sur les bassins, de différencier certaines zones du réseau hydrographique et d'avoir une vision assez nette du relief. Ces résultats sont acceptables et peuvent servir comme information de base pour les missions de terrain et d'analyses pour les régions enclavées telles que les forêts tropicales humides du golfe de Guinée. L'utilisation des images SRTM apporte essentiellement une lisibilité améliorée du relief. Cette lisibilité est sans ambiguïté. Les résultats obtenus montrent une vraisemblance entre la réalité de terrain et les résultats issus du traitement des images SRTM.

Les images satellitaires de type SRTM constituent donc un outil privilégié d'acquisition d'information capable de fournir une assistance décideurs. Ces images pourraient ainsi permettre la constitution d'une base de données indispensable à la gestion des ressources et à la surveillance de l'environnement. Les résultats obtenus montrent qu'il est

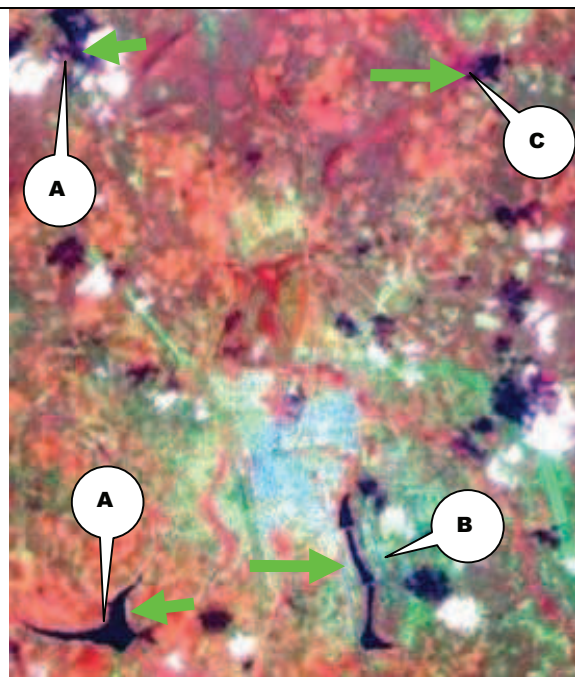
possible de cartographier les différents paramètres d'un bassin versant hydrologique et de contrôler l'impact des activités anthropiques et agro-industrielles sur un bassin. Les cartes issues des données SRTM représentent un moyen pertinent et compétitif de palier les manques de données altimétriques. Ils présentent l'avantage de s'étendre au-delà des frontières étatiques et d'être libres de toute contrainte juridique quant à leur transmission ou utilisation par un tiers. Toutefois, la résolution de ces données peut limiter leur utilisation. L'utilisation de l'imagerie satellitaire SRTM permet un diagnostic rapide et relativement peu onéreux par rapport à la photographie aérienne et aux méthodes de terrain conventionnelles. La durée et le coût de la prospection ainsi que des risques inhérents se trouvent réduits. La structure des données et le niveau de détail peuvent être facilement personnalisés pour atteindre les exigences d'une analyse particulière et pour refléter les limites imposées par chaque projet.

3.3-RESULTATS DU TRAITEMENT DES IMAGES MULTISPECTRALES

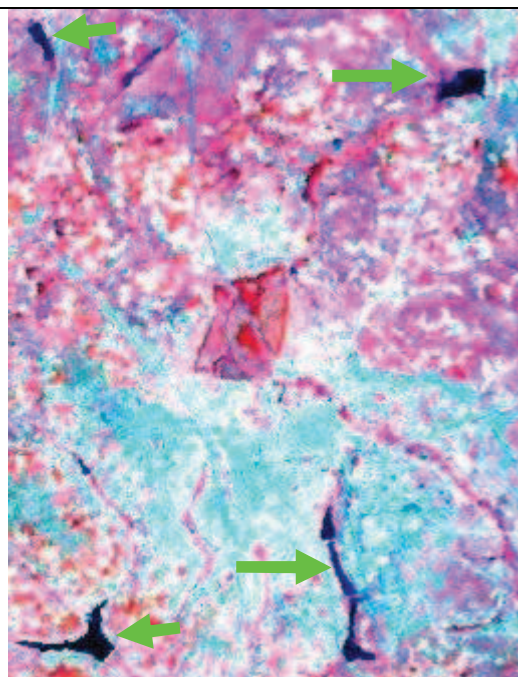
Après avoir caractérisé et étudié dans les sections précédentes les structures topographiques qui recueillent les eaux de précipitation et les structures topographiques dans lesquelles ces eaux circulent. Nous allons montrer maintenant l'évolution des eaux de surfaces durant la période de 1984 à 2008. Deux faits majeurs se sont révélés à travers l'étude des images satellites multispectrales. Ces faits ont été confirmés par une visite sur le terrain. Outre ces faits vérifiées s'ajoute un phénomène de pollutions industrielles.

3.3.1-Première observation

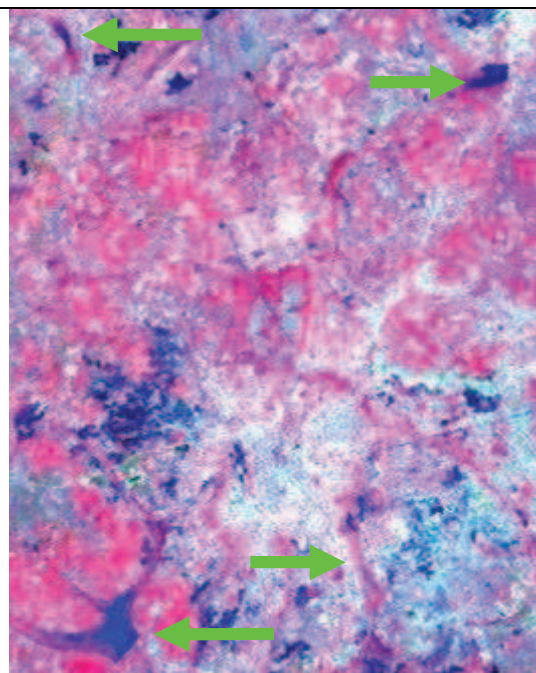
La première observation, c'est que l'amorce de la désertification a pu être établie à partir de l'analyse visuelle des images satellites et des photographies prises sur le terrain. Elle se manifeste par le dessèchement et la disparition des cours d'eau. Ils sont fixés par une végétation qui se succède jusqu'à la disparition totale du cours d'eau. Entre 1984 et 2008, la densité des cours d'eau a fortement régressé par rapport à celles des années 1980. Ce phénomène est nettement observable sur les images satellitaires (figure 34) et est corroboré par les photographies de terrain. Le cours d'eau A (figure 34) correspond au barrage Lopé dans la sous-préfecture de Katiola. Sa surface a varié au cours de la période d'observation, parce qu'il a été dragué par moment par les riziculteurs. Sa surface était d'environ un 315 990 m² ; aujourd'hui elle est de 188 200 m². Le cours d'eau B qui est segmenté en trois parties par des ponts lui donne une allure de barrages (figure 34). Le niveau de l'eau a tellement baissé qu'elle ne coule plus entre les différents segments. Le segment du milieu qui mesure 650 mètres de long et 110 mètres de large soit une surface de 715 000 m² a totalement disparu. Le segment supérieur qui a l'origine mesurait 940 mètre long ne mesure que 200 mètres aujourd'hui sa largeur est passée de 190 à 130 mètres. Ainsi sa surface a varié de 188 000 m² à 26000 m². Le troisième celui du bas sa surface est passée de 188 732 m² à 48 850 m². Le barrage de Nikolo (cours d'eau C) est la principale source d'approvisionnement de la ville en eau potable. Contrairement aux autres cours d'eau l'assèchement du barrage de Nikolo fait peu de place aux végétaux. La ligne d'assèchement se fait seulement du côté où se trouve le village de Nikolo, avec une avancée accentuée sur le côté mitoyen à la zone reboisée.



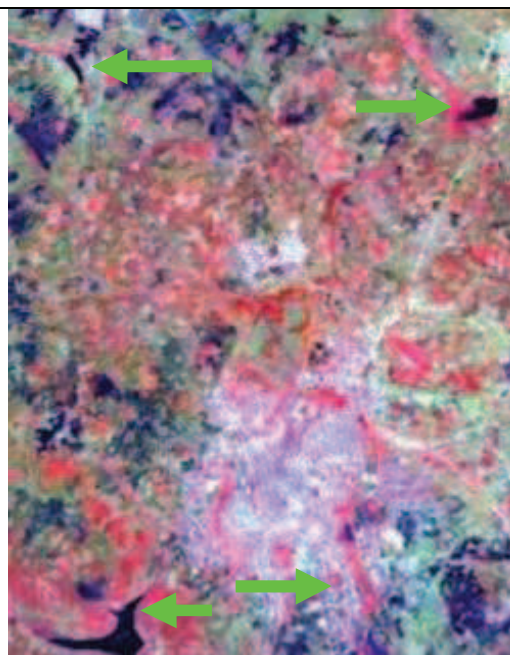
1984-26-Décembre



1986-11-Novembre



2000-16-Décembre



2002-01-Avril



2002-22-Décembre



2003-01-Juillet



2006-09-Décembre



2007-10-Janvier

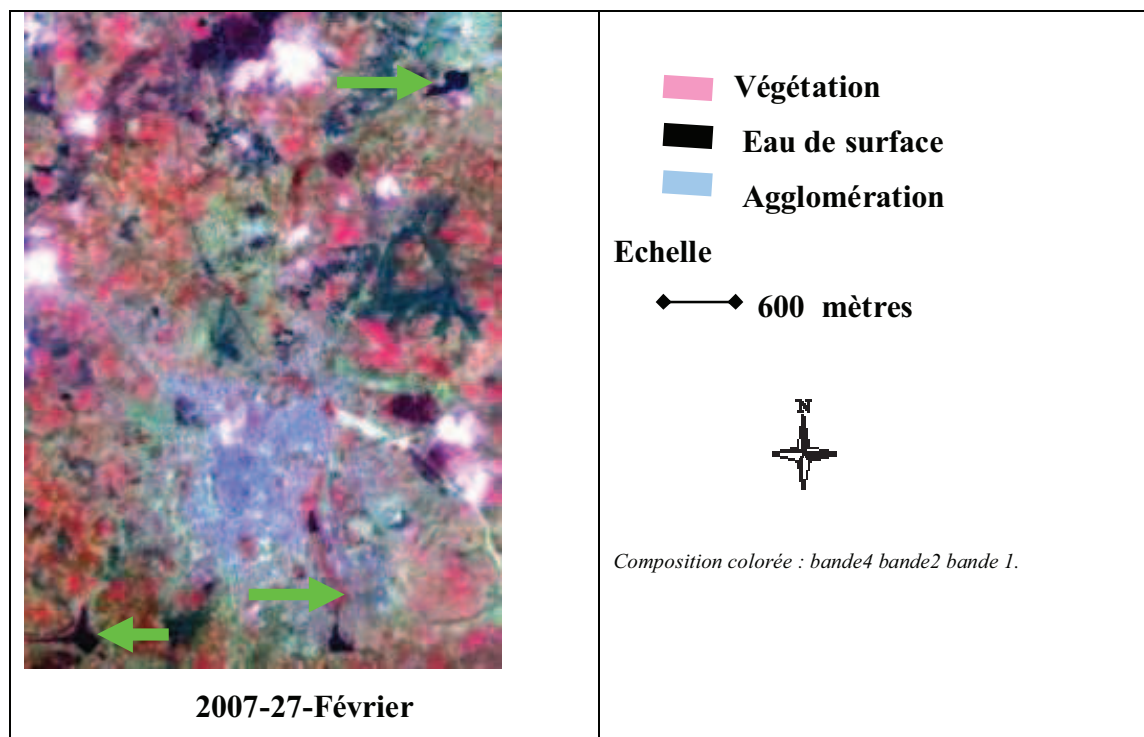


Figure 34: Disparition des cours d'eau

Le phénomène d'assèchement se traduit par l'aggravation du rythme de la sécheresse durant ces dernières décennies dans le département de Katiola par création de mutations environnementales : disparition de cours d'eau et apparition d'un réseau de végétation type graminée le long des réseaux hydrographiques. La figure 35 présente l'ordre d'apparition des végétaux tel que nous avons pu l'observer sur le terrain. Il est à noter que la succession des différents types de végétation montrent de façon indirecte que la qualité physico-chimique de l'eau change au cours du temps.

1



2



3



4



Figure 35: Végétaux numérotés en fonction de l'ordre d'apparition dans le cours d'eau

Photo 1 : Le *Nymphaea lotus* L. (NYMPHAEACEAE), bien reconnaissable à son limbe crénelé est une plante solitaire demandant un éclairage intense et une eau douce et riche en substances nutritives. Ses exigences essentielles sont : un éclairage puissant (pendant 12 à 13 heures par jour), une température relativement élevée (24 à 28 °C), une eau douce et légèrement acide. La température de l'eau doit être comprise entre 22 et 28 °C et une dureté comprise entre 6 et 20 °F avec un pH de 5,5 à 7,5. Il se rencontre essentiellement en eau peu profonde à faible courant.

Photo 2: *Salvinia cf. natans* (L.) All. (SALVINIACEAE). C'est une des rares fougères aquatiques flottantes. La plante développe de nombreuses racines aquatiques assez courtes afin de capter les nutriments présents dans l'eau. Comme toutes les plantes flottantes, les salvinia apprécient les plans d'eau très bien exposées, riches en nutriments et avec peu ou pas de courant. Elle se reproduit quasiment uniquement par reproduction asexuée, mais elle est capable de croître extrêmement rapidement, débutant à partir de petits fragments et doublant en population en très peu de jours, avec pour résultat le recouvrement de mares, réservoirs et lacs par un véritable tapis flottant. Ce tapis empêche la lumière solaire d'atteindre d'autres organismes photosynthétiques comme les algues qui oxygènent l'eau et provoque un appauvrissement du milieu. Ses exigences essentielles sont : un éclairage intense, une température relativement élevée comprise entre 12 et 24°C, une eau douce et légèrement acide. La température de l'eau doit être comprise entre 22 et 28°C et une dureté comprise entre 5°d GH à 11°d GH avec un pH de 5,5 à 7,00. Cette plante se rencontre essentiellement en eau peu profonde à faible courant. Sa croissance est généralement moyenne ; elle peut être accélérée par une eau riche en éléments nutritifs. La plante se développe en surface et se reproduit par division

Photo 3: *Myriophyllum spicatum* L. (HALORAGACEAE). Il se reproduit par bouturage (déplacement d'un fragment de la plante) et par marcottage (les bouts de tiges produisent des racines avant même de se détacher de la plante mère). Le myriophylle en épi est une espèce hautement envahissante en raison de ces divers moyens de dispersion. Ses exigences essentielles sont : un éclairage intense, une température relativement élevée comprise entre 10°C à 35°C, une eau douce et légèrement acide. La température de l'eau doit être comprise entre 22 et 28 °C et une dureté comprise entre 18 °d GH à 30 °d GH avec un pH de 5.40 à 11.00. Il se rencontre essentiellement en eau peu profonde à faible courant. Elle croît rapidement vers la surface, phénomène suivi d'une abondante ramification qui tend à créer une masse dense sur l'eau.

Photo 4: *Cyperus sp.* (CYPERACEAE) Il fait partie des végétaux aquatiques et semi-aquatiques. C'est une espèce herbacée pérenne souvent confondue avec les graminées. On la distingue par ses tiges trigones et ses feuilles tristiques et vit préférentiellement dans les zones marécageuses. Les racines peuvent vite devenir envahissantes. Ce sont des plantes dénitrifiantes et épuratrices.

Ce phénomène d'envahissement des cours par la végétation correspond à l'eutrophisation du milieu. L'analyse des images satellitaires nous permet de constater que ce phénomène a commencé après 1986 soit au moins trois ans après la grande sécheresse de 1983. L'eutrophisation est l'un des problèmes majeurs dont souffre une grande partie des cours d'eau et des lacs dans le monde. Ce phénomène naturel est dû à l'abondance des matières en suspension et des éléments nutritifs, notamment l'azote et le phosphore, qui cause une prolifération extensive des algues et des végétaux aquatiques menant ainsi à la dégradation du système aquatique considéré (CNRS, 2005). Dans notre cas ce phénomène d'eutrophisation s'explique par le fait que les eaux de ruissellement qui parcourent les villes et les champs, emportent avec elles d'importantes quantités de matières organiques et d'éléments nutritifs pour la végétation. Cette matière organique drainée se retrouve dans les cours d'eau de surface. C'est la forme indirecte de l'intervention de l'homme dans le phénomène d'eutrophisation. Cette intervention indirecte de l'homme est la forme la plus répandue dans le département de Katiola. En plus de cette de matière drainée, l'assèchement des cours d'eau contribue fortement à la prolifération de la végétation. Il existe quelques cas d'interventions directes. Les cas les plus saillants de rejet de pollution sont les eaux usées industrielles et agricoles rejetées par les unités de production de sucre et les plantations sucrières de Ferkéssédougou et de Tafiré. Nous avons constaté sur le terrain qu'aucun suivi de la qualité des fleuves et rivières qui reçoivent ces eaux usées n'est effectué. Cela a un impact sur plusieurs problèmes actuels tels que la protection et la contamination des eaux souterraines en milieu fracturé. La figure 36 présente les eaux du Bandama à l'entrée et à la sortie des complexes sucriers. L'identification de l'eau se base sur son profil spectral tout à fait spécifique dans le canal proche infrarouge (PIR) caractérisé par des réflectances faibles car l'eau absorbe fortement les rayonnements dans cette tranche de longueurs d'onde. A l'entrée des complexes sucriers l'eau a un aspect noir ce qui veut dire que le signal électromagnétique est absorbé, nous avons alors une eau assez propre. A la sortie des plantations la coloration de l'eau vire au bleu ciel, ce qui témoigne de la présence d'une eau assez trouble fortement enrichie en élément dissous et en suspension.

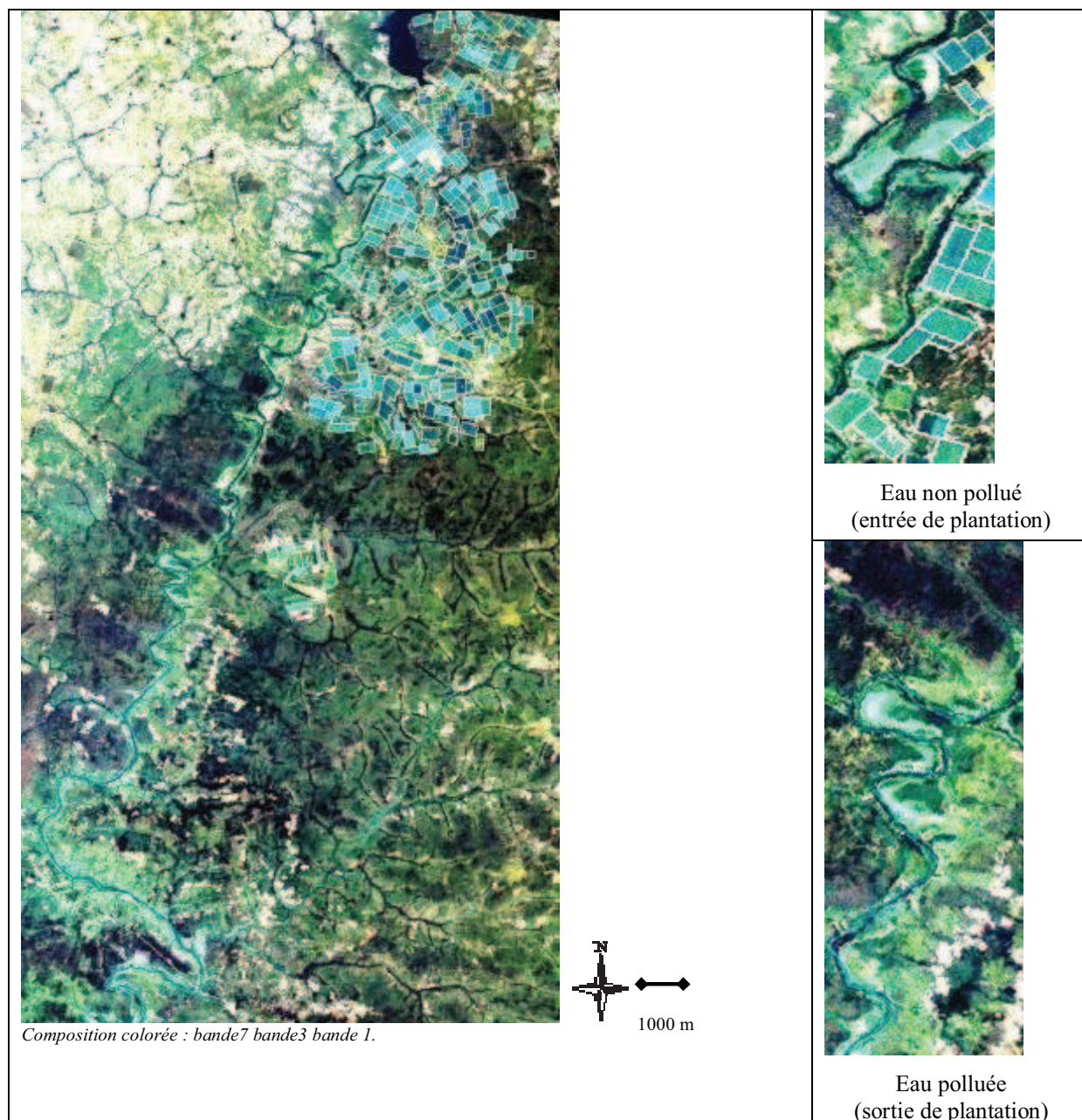


Figure 36: Les eaux non polluées apparaissent en noir tandis que les eaux polluées par les plantations sucrières apparaissent en bleu ciel

Il existe cependant d'autres causes telles que: 1) les feux de brousse effectués durant la saison sèche qui mettent à nu les surfaces des sols ce qui les expose au phénomène d'érosion. 2) la migration des populations des départements du nord (Korhogo, Ferkéssédougou). Cette migration s'accompagne de la création de champs et de nouveaux villages et campements. Nous avons pu compter jusqu'à 25 nouveaux villages créés en moins de 10 ans, par exemple le village de Nadanakaha situé sur l'axe Katiola-Niakaramandougou, précisément à 7km de Niakaramandougou (Figure 37).



Figure 37: Nadanakaha village créé par migration de population situe dans sous-préfecture de Niakaramandougou

Ces villages et campements sont situés principalement dans les sous-préfectures de Niakaramandougou et de Tortiya. Ce phénomène de désertification impose aux populations locales un effort constant d'adaptation et de nouvelles contraintes. Elle change leur milieu naturel par la disparition et l'apparition de nouveaux écosystèmes plus pauvres. En l'espace de vingt ans, le deuxième barrage de la ville de Katiola a disparu à 90% (Figure 38 A). Le cours d'eau à 3km de l'entrée de Darakolokaha, village situé à une quinzaine de kilomètres au nord de la sous-préfecture de Fronan, a également disparu à plus de 95% et le barrage Nikolo, dont une partie est exploitée par la Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire (SODECI), a perdu 30% de sa surface (Figure 38 B).



A (cours de la ville de Katiola)



B (rivière Nikolo sous-préfecture de Katiola)

Figure 38: Disparition des cours d'eau (photo réalisé en mai 2008)

Il est à noter, et ceci de façon générale, que chaque cours d'eau du département de Katiola a vu une partie de sa surface diminuée et disparaître sous la végétation. Par ailleurs il est à préciser que le Nabion, contrairement aux autres cours d'eau, ne souffre pas de ce phénomène d'eutrophisation ; ses eaux sont claires et riches en poisson. Parmi les autres éléments qui marquent le paysage, les zones d'aménagement rizicole de Lopé dans la sous-préfecture de Katiola, Nianra dans la sous-préfecture de Timbé ont été facilement identifiées. De façon complémentaire à la télédétection, les observations de terrain nous permettent de mieux saisir la disparition des cours d'eau. Cette disparition des cours d'eau est très sensible sur les cours d'eau du département de Katiola.

3.3.2- Deuxième observation

La deuxième observation est que nous avons pu identifier et cartographier pour la première fois un barrage à vocation agricole qui existe dans le département de Katiola (Figure 39). La surface de ce cours d'eau fait trois fois celle du barrage hydroélectrique de Taabo. Il est à noter que le barrage de Taabo produit 45% de l'électricité consommée en Côte d'Ivoire et a une surface de 70 km². Il s'agit d'un barrage situé dans la sous-préfecture de Niakaramadougou, précisément dans le village de Kafiné. Il est construit sur le Nabion avec un apport moyen annuel de 17,7 millions de m³ et une surface du bassin versant de 220 km², soit plus de trois fois celle du barrage hydroélectrique de Taabo avec une capacité de retenue de 45 millions de m³. Les apports moyens annuels d'eau du barrage ont été évalués à partir de données de la station météorologique de Bouaké, sur la période de 1976 à 1995. Le volume moyen des apports sur cette période est évalué par la formule de Turc remaniée par l'ORSTOM.

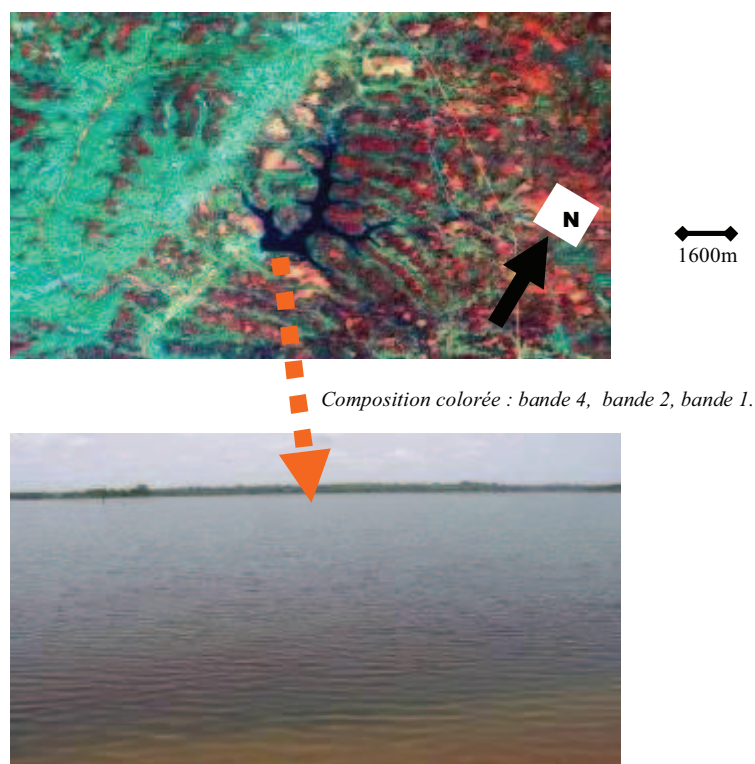


Figure 39: Barrage à vocation agricole cartographié grâce aux images LANDSAT à Kafiné sous-préfecture de Niakaramandougou

Conclusion partielle

L'étude des images LANDSAT nous a permis de faire le suivi des eaux de surfaces du département de Katiola de 1984 à 2008. Il nous a été possible d'établir et de mettre à jour la cartographie du département de Katiola, mais aussi de faire des discriminations au sein des différents types d'eau de surface en fonction de leur nature. Pour les zones déjà cartographiées, on a pu effectuer une mise à jour rapide de l'information. Pour les zones mal connues, ou peu accessibles, la télédétection a été un outil d'investigation précieux. Nous avons pu cartographier le barrage de Kafiné qui depuis sa construction en 1980 n'a été porté sur aucune carte. On a pu ainsi aisément discriminer les surfaces d'eau, qui apparaissent sur l'image en noir pour les eaux propres et en bleu ciel pour les cours d'eau qui traversent les plantations sucrières de Tafiré et de Ferkéssédougou. Quant aux cours d'eau envahis par la végétation, ils sont apparus en noir ou en bleu ciel pour les parties non envahies et rose pour les parties envahies par les végétaux. Nous avons pu ainsi établir clairement l'ordre d'apparition des végétaux sur les plans d'eau jusqu'à leur disparition totale. La succession de la végétation montre que la qualité physico-chimique des terres du département évolue avec le temps.

3.4-RESULTATS DU TRAITEMENT DES RELEVES DE PUIITS ET FORAGES

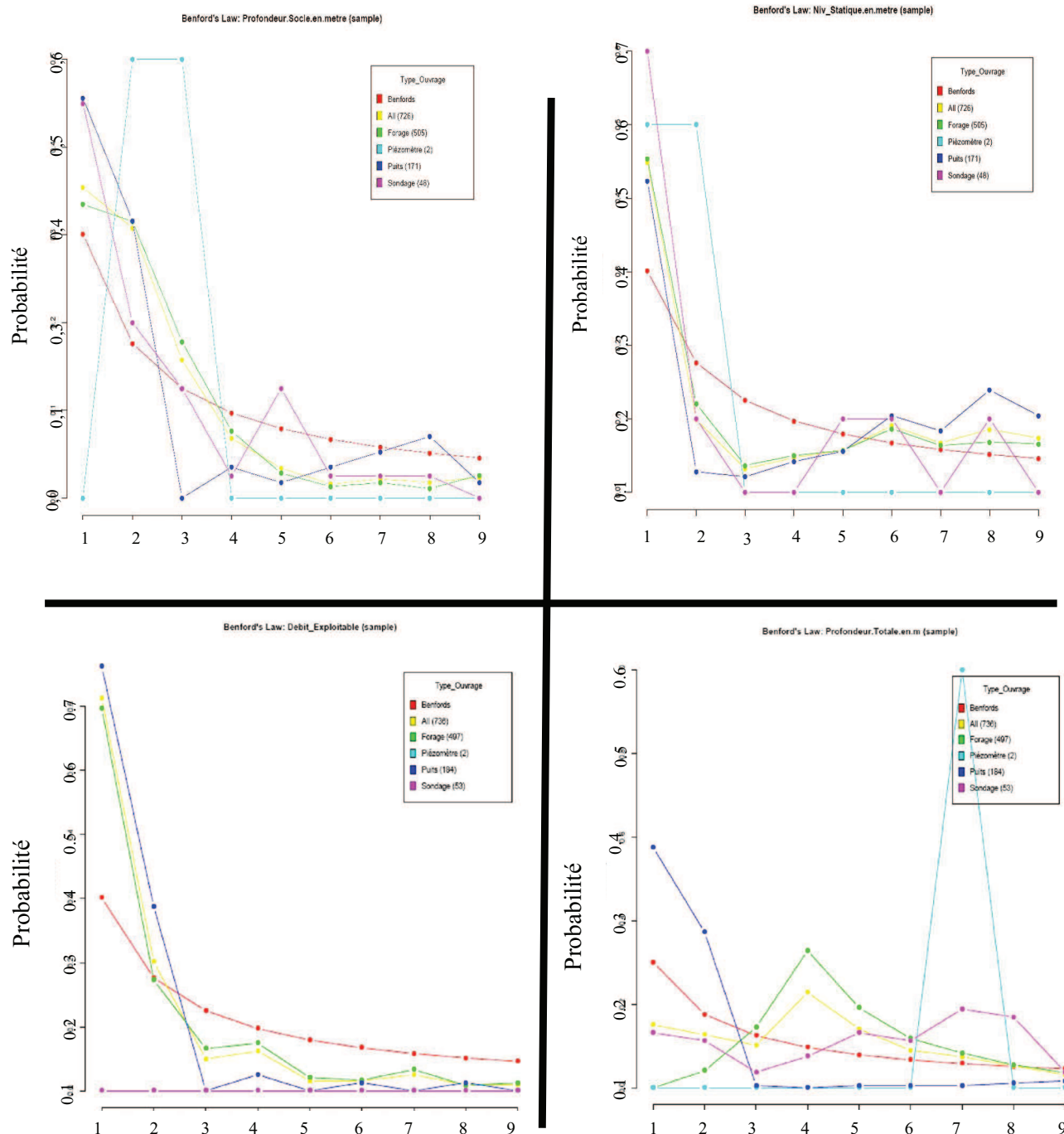
Dans les sections précédentes nous avons étudié les eaux de surface et leurs environnements topographiques. Dans cette section, nous allons étudier les eaux souterraines du département de Katiola et leurs principales caractéristiques.

3.4.1- Analyse et interprétation statistique

Les données recueillies sont suffisantes pour mener notre étude dans la mesure où elles excèdent largement 50 échantillons de mesure. Les variables étudiées ici sont des variables quantitatives. Les valeurs relatives à ces variables proviennent de mesures in situ. L'information disponible est donc constituée par les relevés de puits et forages. Ici le biais conditionnel c'est-à-dire l'effet information et l'effet support sont à négliger dans la mesure où nous disposons de valeurs mesurées in situ.

3.4.2- Analyse et interprétation qualitative

La figure 39 présente les courbes des valeurs de débits, de niveau statique, de profondeur de socle et de profondeur totale selon la loi de Benford. Les allures des courbes de sondages et de piézomètres sont très contrastées et ne coïncident pas du tout avec la courbe idéale de Benford (courbe rouge). Cela s'explique d'une part par le fait que le nombre de valeur de ces paramètres n'est pas suffisant élevé. D'autre part les valeurs de sondage ne peuvent pas être modélisées selon la loi de Benford. Les tracés des valeurs de profondeur, de débit et de niveau statique présentent une allure parabolique très peu harmonieuse. Les chiffres « 4 », « 5 », « 8 » apparaissent beaucoup plus de fois que prévu par la loi de Benford tandis que le chiffre 3 n'est pas assez représenté. Il y a prépondérance des chiffres « 4 », « 5 », « 8 » ou encore « effet roi ». Cette prépondérance des chiffres « 4 », « 5 », « 8 » montre que les variables étudiées ne croissent pas exponentiellement. Cela s'interprète de la façon suivante les débits, la profondeur et le niveau statique sont indépendants et sont distribués de façon inégale suivant l'espace.



(En abscisse le nombre d'occurrence de chiffre)

Figure 40: Distribution selon Benford de débits, de profondeur de socle, de type d'ouvrage et profondeur totale

En raison de la difficulté à mettre en évidence la géométrie spatiale de la productivité des ouvrages sur l'étendue du département, nous avons travaillé avec les données de puits et forages comme témoin de la réalité. Le département de Katiola est situé en grande partie sur une zone de socle. Les méthodes de recherche hydrogéologique des facteurs susceptibles d'intervenir dans la productivité des puits et forages sont essentiellement orientées vers la recherche de fractures. Au gré de ces méthodes les nombreuses informations contenues dans

la base de données des relevés de puits et forages déjà exécutés sur le département se retrouvent très peu exploitées. Pour comprendre la répartition de la productivité des ouvrages, en particulier sa répartition spatiale, nous en avons établi une cartographie sur tout le département de Katiola à partir des relevés de puits et forages. L'intérêt pratique de l'étude est double. D'une part, la cartographie permet de mettre en place des outils de suivi et d'évaluation de la situation (sous forme de bases de données). D'autre part, la connaissance des différents facteurs est indispensable à l'élaboration des plans d'action environnementale ou de gestion des espaces ruraux afin de réduire l'impact de l'érosion.

Les graphiques des figures 42 à 57 représentent les répartitions spatiales des niveaux statiques et des débits. Cette cartographie peut servir autant que les lignes de fractures obtenues à partir des photographies aériennes ou des images satellitaires dans le repérage des sites d'implantation de puits ou de forages. La méthode basée sur la recherche de fracture pour le repérage de site de forage est souvent confrontée à certaines interrogations qui demeurent souvent sans réponse. Ce sont notamment la distribution des débits dans le réseau de fracture, la variation de la profondeur de l'arrivée dans les mêmes formations, la distribution du réseau de fracture suivant la profondeur, le positionnement des ouvrages sur les fractures kilométriques. Les cartes produites avec les niveaux statiques et les débits peuvent contribuer à donner des éléments de réponses basés sur les valeurs mesurées sur le terrain. Les figures 42 à 45 et 48 à 50 présentent les lignes équipotentiels des niveaux statiques et les lignes équipotentiels des débits telles que réparties sur l'ensemble du département de Katiola.

3.4.3-Carte du réseau de linéaments

La carte du réseau de fracture a été obtenue à partir de photographies aériennes. Elle s'est limitée aux éléments visibles car les informations sur l'état de la roche en profondeur ne sont pas disponibles. La position et la direction sont relevées sur la figure 41. Le réseau de fractures est majoritairement orienté suivant la direction NW-SE et suivant la direction N-S. Ce qui permet de définir deux familles de fractures selon leur direction. D'une façon générale, ces linéaments s'intègrent parfaitement à la tectonique cassante de la Côte d'Ivoire. Ils appartiennent à la phase volcano-tectonique du Birimien. Les couloirs de cisaillement correspondent à des directions majeures dans le socle africain. Les distributions de longueurs, d'orientations, et la fonction de répartition spatiale des fractures sont reproduites de manière satisfaisante. Un des problèmes majeurs des milieux fracturés vient de la multitude d'échelles

spatiales mises en jeu qui rend leur description complexe. Vu le taux élevé des faibles débits et faibles pourcentages de succès nous sommes amené à dire que la fracturation, qu'elle soit kilométrique ou non, n'est pas assez suffisante pour déterminer avec exactitude les sites d'implantation de puits et forages et garantir des débits exploitables. A cela s'ajoute le fait que très peu de fractures kilométriques traversent les différentes localités du département de Katiola (figure 41). Ce qui nous a conduit, grâce aux données rapportées lors de la réalisation des puits et forages, à construire des modèles numériques. Ces modèles numériques sont nécessaires pour reconstituer la réalité de terrain et de déterminer les sites d'implantation. L'analyse quantitative de la productivité des ouvrages est importante pour modéliser les propriétés des réservoirs induites par la fracturation, avec leurs conséquences sur les écoulements souterrains. Elle permet de quantifier la productivité des ouvrages.

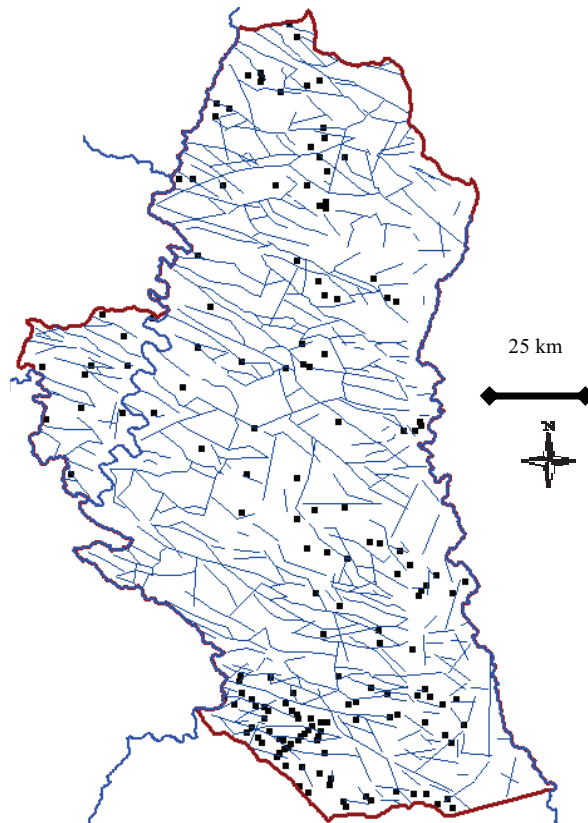


Figure 41 : Carte du réseau de linéaments

3.4.4- Répartition de la profondeur de socle sur la zone d'étude

La figure 42 représente la répartition du niveau de la nappe rapporté par les relevés de puits et forages. Elle a été obtenue par interpolation linéaire des différents niveaux de puits et forages, sans aucun traitement statistique et géostatistique. Nous sommes dans un

environnement très hétérogène. Les résultats de la figure 42 nous permettent de voir la répartition du niveau statique. Cette hétérogénéité se voit à travers l'obtention de plusieurs courbes de niveaux différentes dans les mêmes formations.

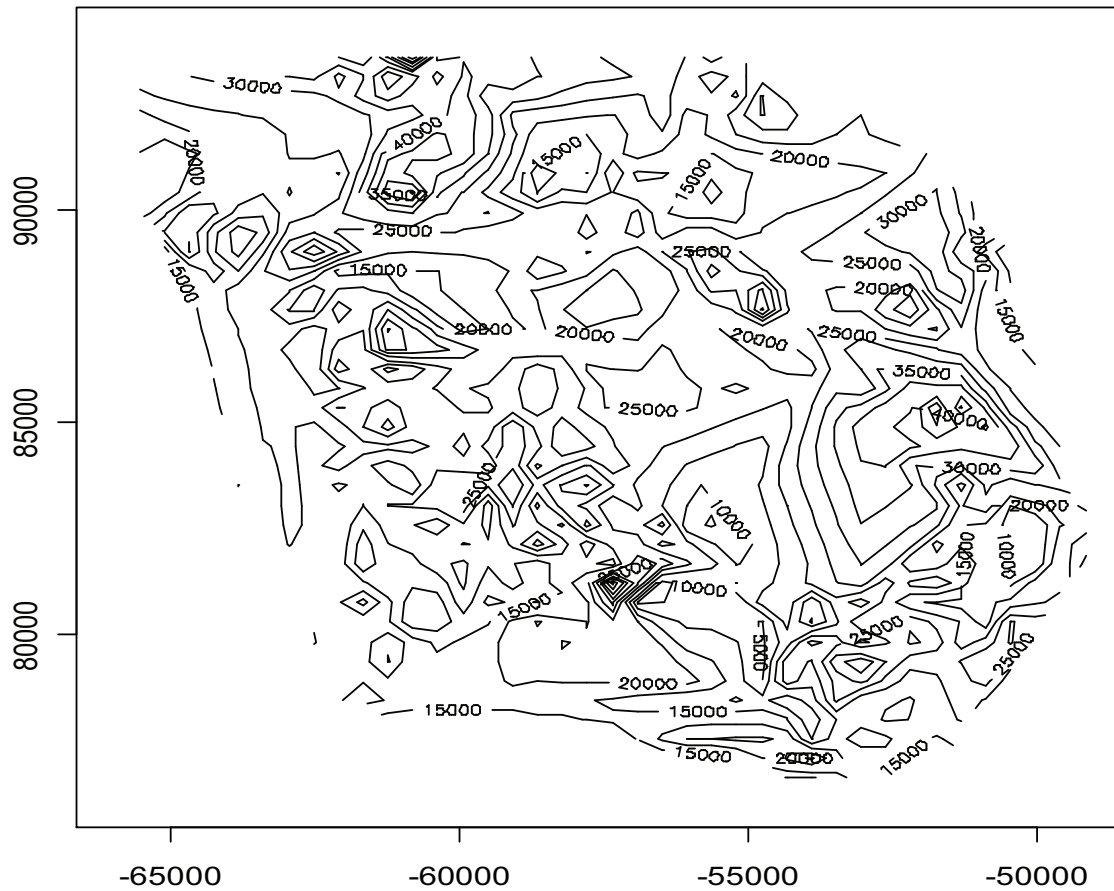


Figure 42: Modèle numérique des courbes de niveaux statiques des puits et forages exécutés sur le département de Katiola en millimètre

La densité de répartition des courbes de niveau et la différence de valeur entre celles-ci montrent une inégale répartition de la nappe. Elle pourrait s'expliquer par le fait que nous sommes en milieu fracturé. L'écoulement dans ces systèmes géologiques fracturés dépend de plusieurs facteurs dont la géométrie des fractures, leur densité, leur dimension, leur orientation et leur connexion. Ceci pourrait traduire que les fractures du département de Katiola sont hétérogènes. Cette hétérogénéité est multi-échelle et la géométrie des réseaux de fractures est anisotrope. La géométrie des écoulements est donc fortement chenalisée car les flux se concentrent le long de quelques chemins privilégiés. Les zones concentriques des courbes de niveau correspondent au niveau statique les bas (figure 42). Ces zones concentriques sont les creusets des bassins hydrogéologiques du département de Katiola. Elles

constituent les endroits privilégiés vers lesquelles coulent les eaux souterraines et les eaux infiltrées. Afin de comprendre le sens d'écoulement et de détecter les zones renfermant les eaux souterraines nous avons procédé par analyse piézométrique. Pour avoir plus de précisions, nous avons effectué une analyse par krigeage (figure 43), afin de révéler ces bassins hydrogéologiques et les sens privilégiés d'écoulement. L'analyse des niveaux statiques (figure 43) à laquelle nous avons ajouté en point noir les différents ouvrages exécutés sur le département de Katiola montre que l'écoulement vers les zones où sont concentrées les courbes de niveau. Sur la figure 43 ces zones ou encore petit bassin hydrogéologiques sont de couleurs jaunes. À gauche de l'image (figure 43) une échelle montre les correspondances entre niveau de couleur et profondeur de niveau statique. En un mot la figure 43 présente une coupe transversale des aquifères du département de Katiola vu de haut.

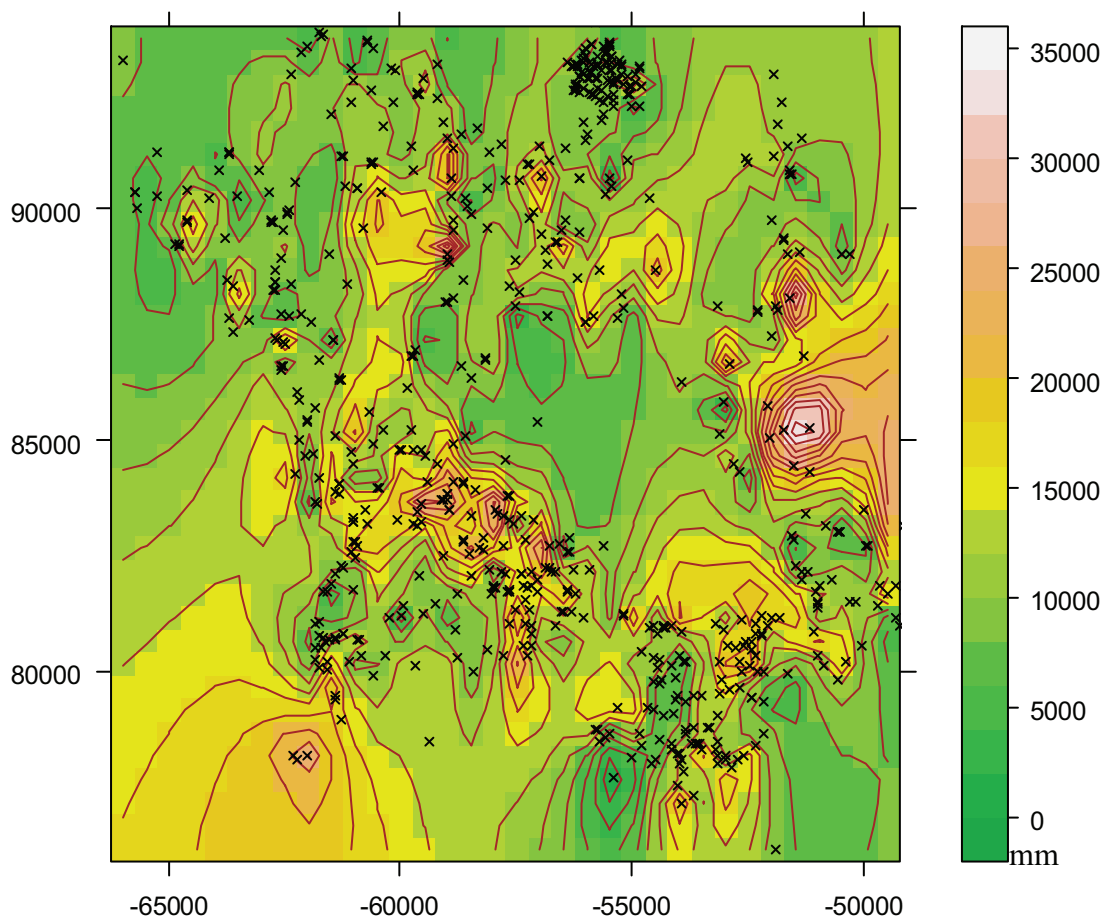


Figure 43: Modèle numérique des niveaux statiques des puits et forages exécutés sur le département de Katiola obtenus par krigeage

La figure 44 fait une esquisse des valeurs des courbes de niveau contenu dans la figure 43. Elle joue rôle de descriptif (légende des courbes de niveau). C'est une version avec un nombre réduit de courbe auquel nous avons ajouté de chaque de niveau.

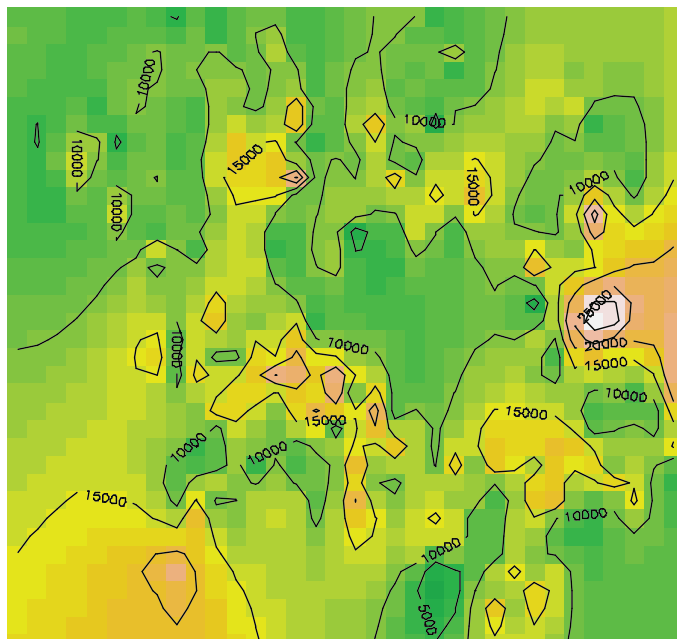


Figure 44: légende du modèle numérique des niveaux statiques de la figure 43 en millimètre

En plus de son rôle de légende, la figure 44 donne une vision assez globale du bassin hydrogéologique du département de Katiola. En suivant les zones jaunes des figure 44 et figure 43, on voit que le bassin hydrogéologique du département de Katiola est de forme circulaire.

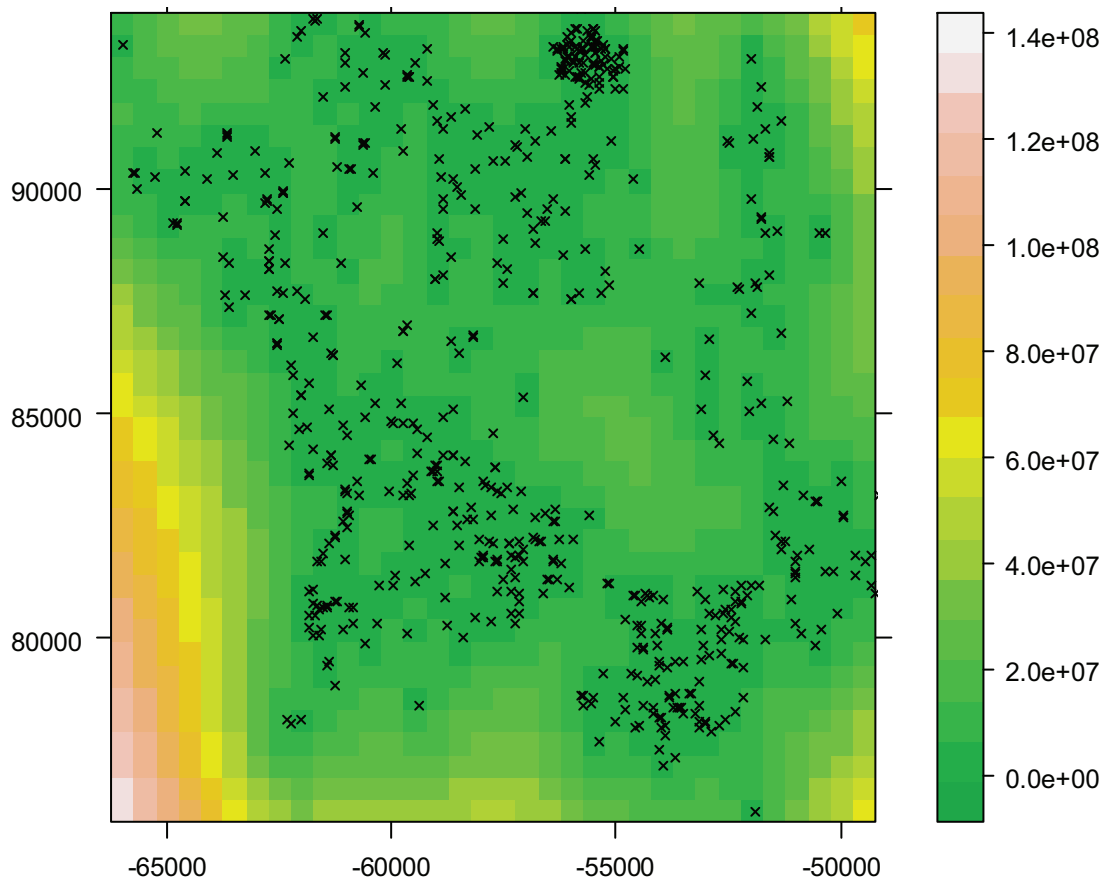


Figure 45: Variance du modèle numérique des niveaux statiques exprimant les erreurs d'estimations

La figure 45 montre la variance qui exprime la dispersion autour des valeurs de niveau statique que nous avons calculé. La couleur vert foncé présente les zones qui ont été estimé avec certitude c'est-à-dire avec une marge d'erreur de inférieur à 0. Sa forme correspond parfaitement aux résultats des figures 42, 43, 44 ce qui confirme ces résultats.

3.4.5-Modèle de répartition spatiale des débits

Les différents résultats relatifs à l'évolution spatiale des débits sont représentés ci-dessous. Ces résultats présentent des valeurs d'exploitation potentielles.

La répartition spatiale des débits a été réalisée à partir des variogrammes. La figure 46 et 47 décrit la continuité spatiale du phénomène. Un modèle de variogramme théorique a été ajusté à chacun des variogrammes expérimentaux. L'ajustement des variogrammes synthétise les observations sur la variabilité spatiale des débits. Les valeurs caractéristiques de ces variogrammes sont regroupées dans le tableau.

3.4.5.1-Variogramme omnidirectionnel

Le variogramme omnidirectionnel nous a permis de déterminer la stationnarité suivant les toutes les directions de l'espace. Il met en relation la dispersion des débits et la distance entre les différentes paires. Il nous renseigne sur l'aspect général de la continuité des valeurs de débits observé dans l'aquifère.

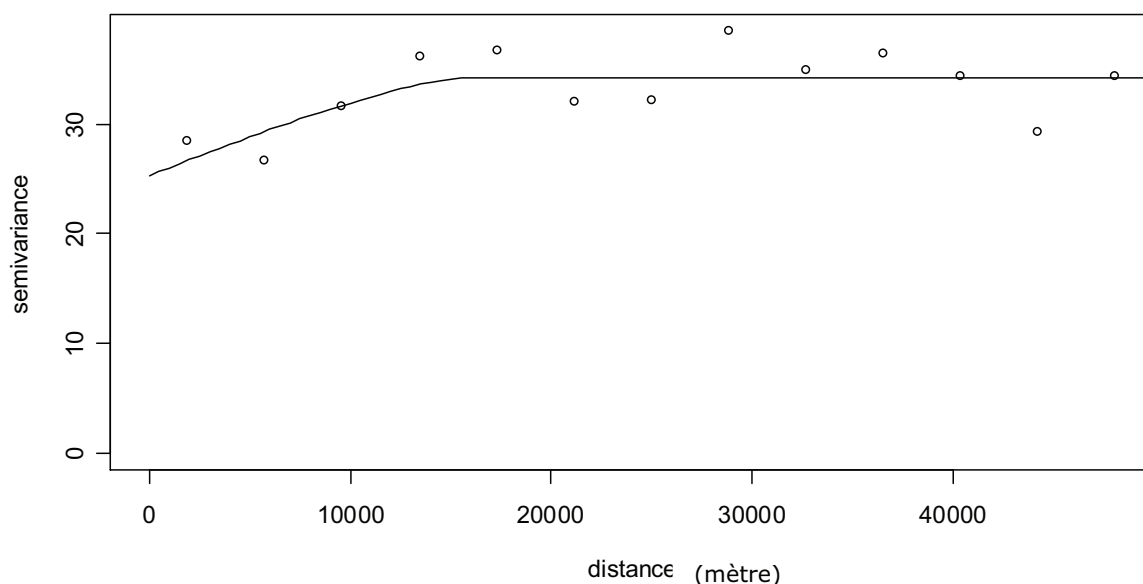
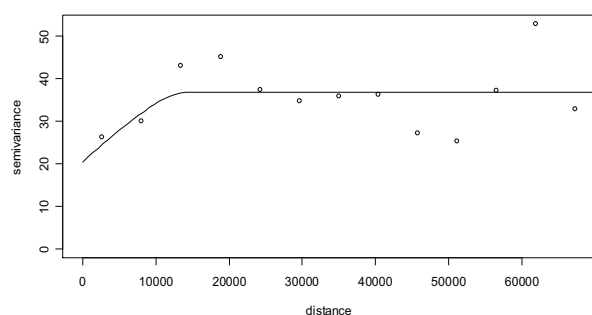
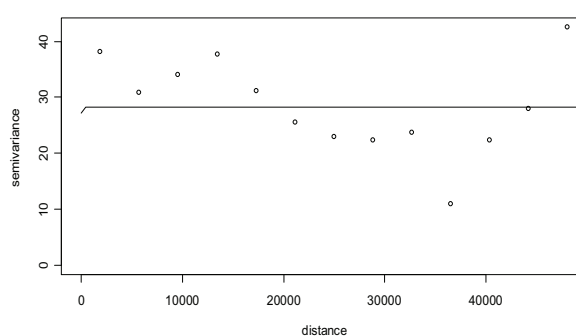


Figure 46 : Variogramme omnidirectionnel

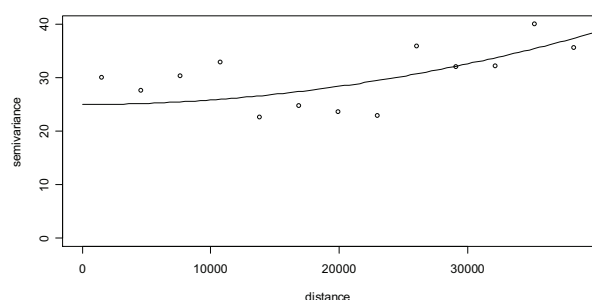
Un variogramme théorique (modèle circulaire) de portée 16024.9439 mètres et de seuil 8.9820 a été ajusté au variogramme expérimental mais ce modèle en particulier ne rend pas compte des dérives suivant les directions de l'espace. Nous avons calculé les variogrammes expérimentaux suivant les quatre directions principales de l'espace ; afin de mieux appréhender la continuité des valeurs de débits mesurés.



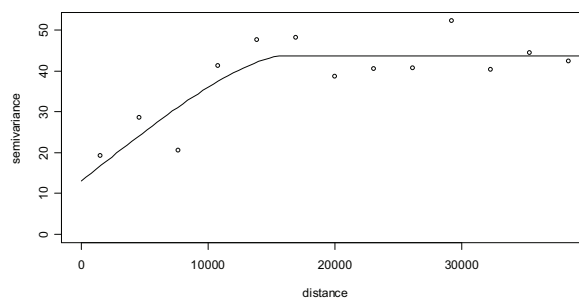
Variogramme direction 0°



Variogramme direction 45°



Variogramme direction 90 °



Variogramme direction 135°

Figure 47 :Variogramme suivant les quatre direction principales de l'espace

Un variogramme théorique (modèle gaussien) de portée 13614.6931 mètres et de seuil 16.3251 mètres a été ajusté au variogramme expérimental suivant la direction zéro degré. Pour les autres directions nous avons obtenu des variogrammes de type circulaires. Mais l'on note un léger changement au niveau des portées et des effets de pépité.

Tableau VIII : Paramètres de régionalisation de la productivité

Variogramme expérimental	Modèle ajusté	Paramètre de covariance		Effet de pépité
		seuil	portée	
<i>Omnidirectionnel</i>	Circulaire	8.9820	16024.9439	25.3235
Direction 0° (N-S)	Circulaire	16.3251	13614.6931	20.4153
Direction 45° (NE-SO)	Circulaire	0.0000	16004.1964	28.2414
Direction 90° (E-W)	Gaussien	3837.9615	673164.9257	24.9531
Direction 135° (NW-SE)	Circulaire	30.7451	15804.7966	12.9722

- La variable débit présente un variogramme d'aspect général différent selon les directions. Il est intéressant de voir le comportement à l'origine des variogrammes qui présente un effet de pépité correspondant ici au bruit résiduel non corrélé, ce qui démontrent une variation de la productivité purement aléatoire sur l'ensemble de notre aire d'étude. Les variogrammes présentent suivant les directions un comportement de type non dérivable caractéristique de données indépendantes entre elles. Cette indépendance est due à la disparité structurale et géologique de l'aquifères. Son interprétation nous conduit à formuler une

hypothèse de stationnarité limitée à des voisinages restreints autour des valeurs mesurées. En un mot, la variable débit est inégalement répartie au niveau de l'aquifère. Si l'on veut estimer correctement la variable débit il faut procéder à une répartition par classe en fonction du type d'aquifère ou par krigeage.

3.4.6-Productivité (débit) en fonction de profondeur de l'ouvrage

La figure 48 représente la carte des débits du département de Katiola obtenu par krigeage. Une comparaison faite entre les cartes des débits et les cartes de niveau statique montre une grande similitude. Ce qui montre bien que les niveaux statiques délimitent parfaitement les bassins hydrogéologiques du département de Katiola. Les zones jaunes représentent les sites qui ont fournis les gros débits. Les zones en vert présente les sites qui ont fournis les faibles débits. Les alignements formés par les zones jaunes coïncides très fortement avec le lit du N'zi à l'Est et celui du Bandama à l'Ouest. Le département de Katiola dans sa partie sud est constitué de relief bas (figure 27) et d'un réseau hydrographique très dense (figure 30). C'est dans cette partie sud que l'on rencontre les fortes densités de hauts débits. Cela nous permet de dire que les eaux souterraines du département de Katiola sont très fortement liées à la morphologie de surface et aux eaux de surface (figure 48).

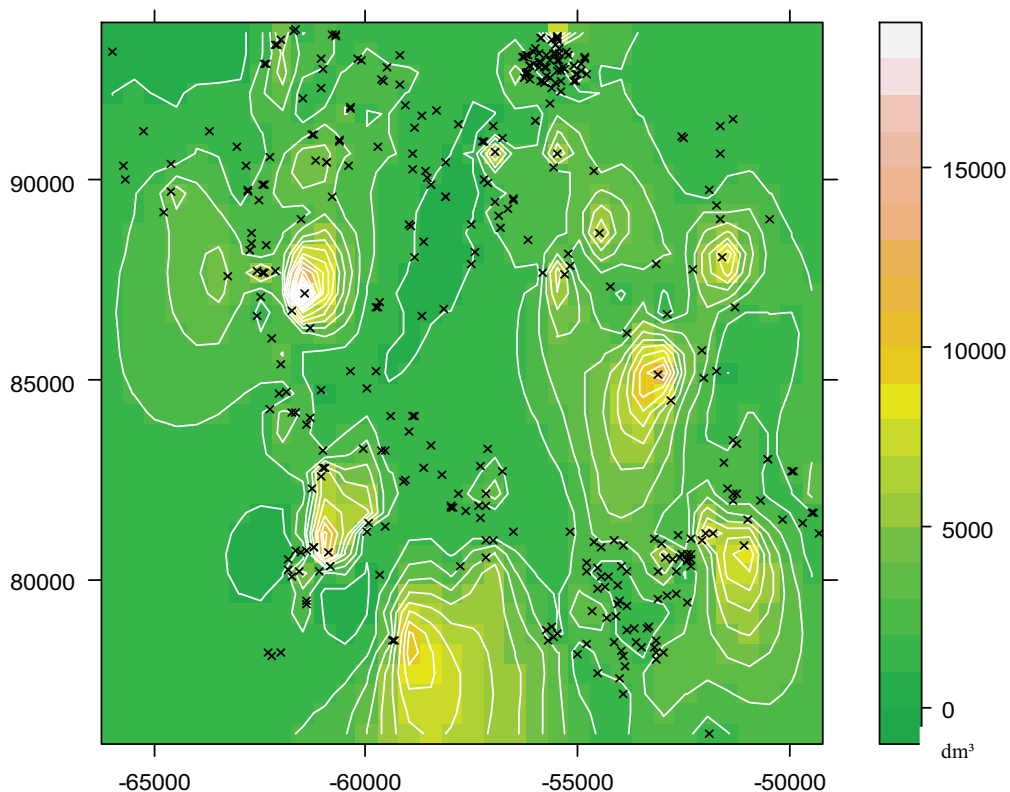
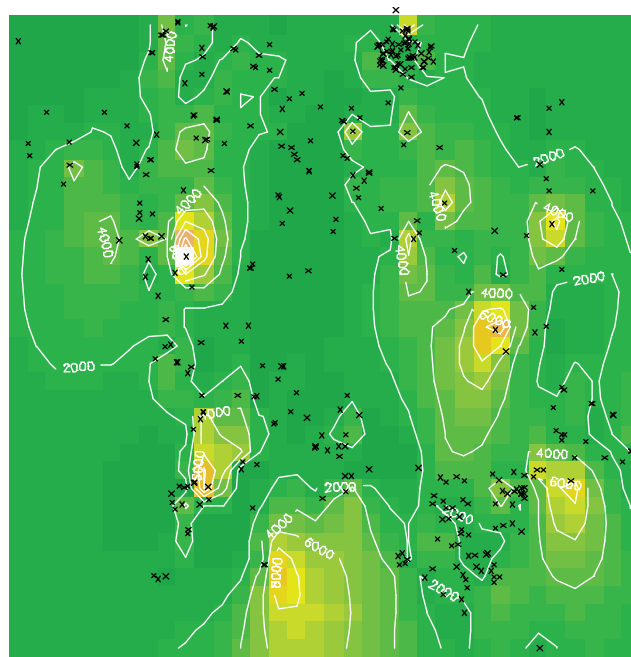


Figure 48: Carte du modèle numérique des débits obtenus par krigeage



Les mesures sont exprimées en mm^3

Figure 49: légende du modèle numérique des débits de la figure 48

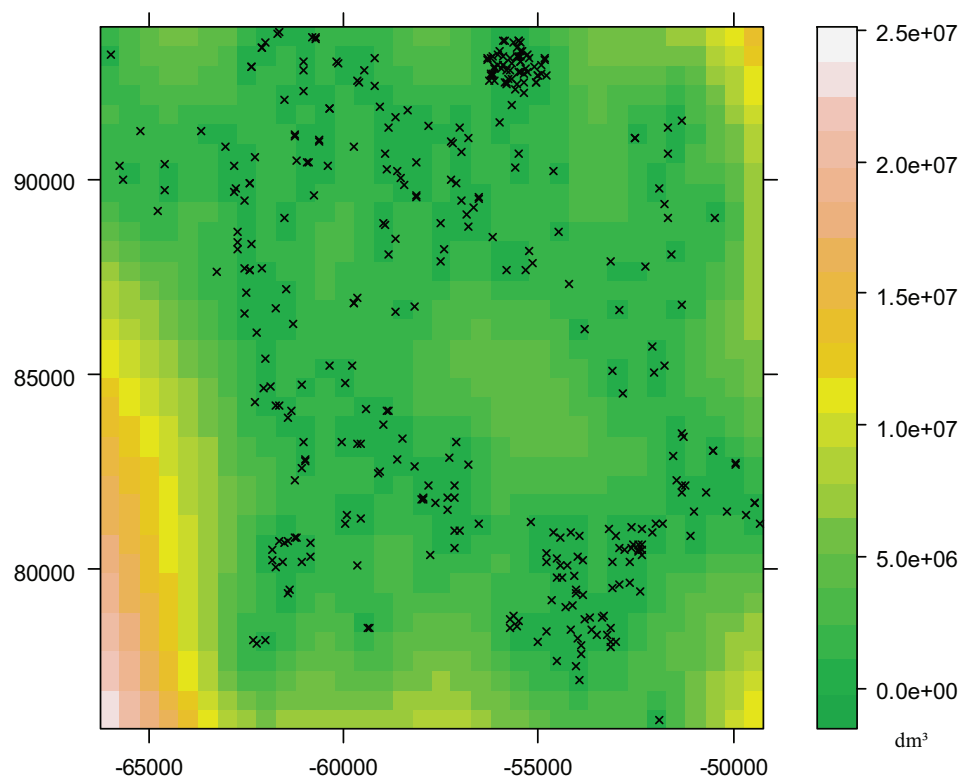


Figure 50: Dispersion autour des valeurs du modèle numérique des débits

La figure 50 correspond à la variance des débits de la figure 48. Elle exprime la marge d'erreur en chaque point de notre zone d'étude par rapport à la valeur de débit mesurée. Les

zones vertes pures de la figure correspondent au lieu où les débits ont été estimés avec grande précision. Ces zones se superposent parfaitement aux bassins hydrogéologiques de la figure 48.

On note que le potentiel hydrogéologique du département de Katiola est faible et les aquifères se présente sous forme de petites nappes perchées. Quand à la structure et le fonctionnement des masses d'eaux souterraines, elles sont étroitement liées à la géologie (figure 52). Ces réservoirs d'eau souterraine sont, pour l'essentiel, rechargés par les précipitations et la profondeur de la nappe n'excède jamais 100 mètres (figure 51). Ceci a pour conséquence de rendre les masses d'eau relativement vulnérable à toute pollution pouvant être répandue à la surface du sol. Ces nappes d'eau sont toutefois exploitées en majorité à des fins privées, par des forages servant à l'alimentation en eau potable des populations rurales.

3.4.7- Caractéristiques des débits des puits et forages

Sur les 1056 relevés de puits et forages exécutés, seulement 197 ont produit des débits de $2\text{m}^3/\text{h}$ ou plus. Ce qui représente un pourcentage de succès de 18,65%. Un pourcentage très faible témoin d'un taux élevé d'échec qui se manifeste par des débits inexploitablement faibles. Les intervalles en pointillés sur chaque figure représentent les écarts moyens et les points noirs représentent la moyenne du paramètre analysé. L'étude des données de puits et forages nous a permis de dégager les constats suivants : les débits des puits et forages de la vallée du Bandama augmentent avec la profondeur jusqu'à 50 mètres. Au-delà des profondeurs de 50 mètres on observe une diminution des débits avec un léger pic pour les profondeurs de 70 à 80 mètres. Cette légère croissance de la productivité chute à partir de 75 mètres de profondeur jusqu'à devenir quasi nulle (figure 51). Les formations les plus fiables qui ont un débit assez homogène sur l'étendue du département sont les fractures (figure 52). Les fractures se rencontrent dans les formations de socle telles que les granites. À l'analyse de la figure 53 les reliefs de plateaux et de pente fournissent les grands débits. À travers ces courbes nous sommes également renseignés sur la profondeur à partir de laquelle les fractures sont captées par les ouvrages, les profondeurs à partir de laquelle les fissures deviennent jointives, c'est-à-dire la profondeur à partir de laquelle l'on doit arrêter l'exécution de tout ouvrage. Au-delà de cette profondeur de 80 mètres, l'obtention de débits exploitables devient accidentelle et hasardeuse.

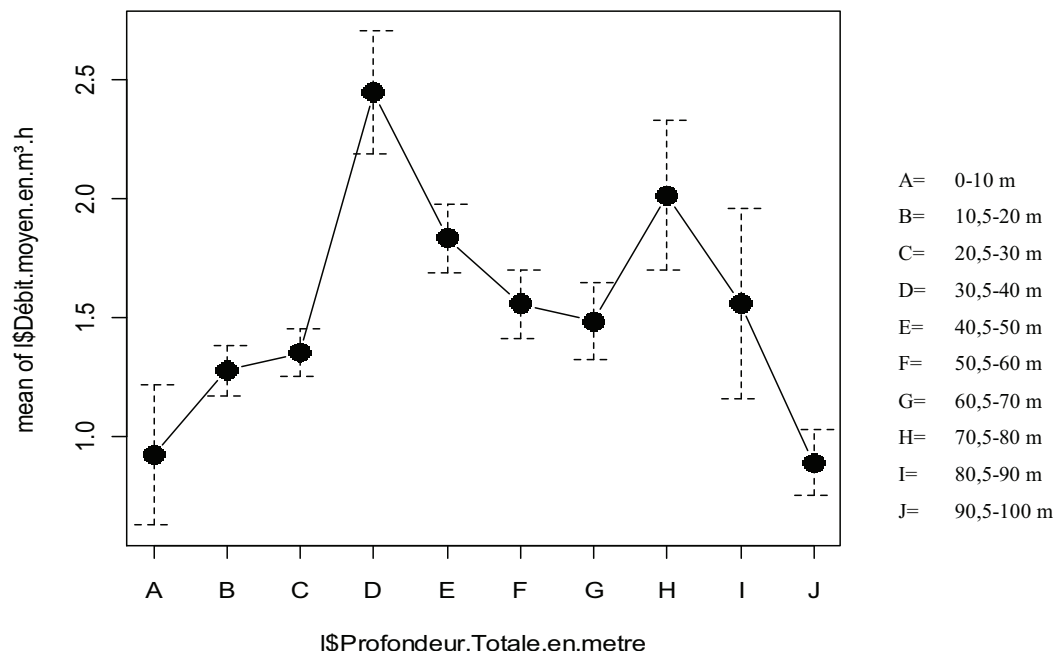
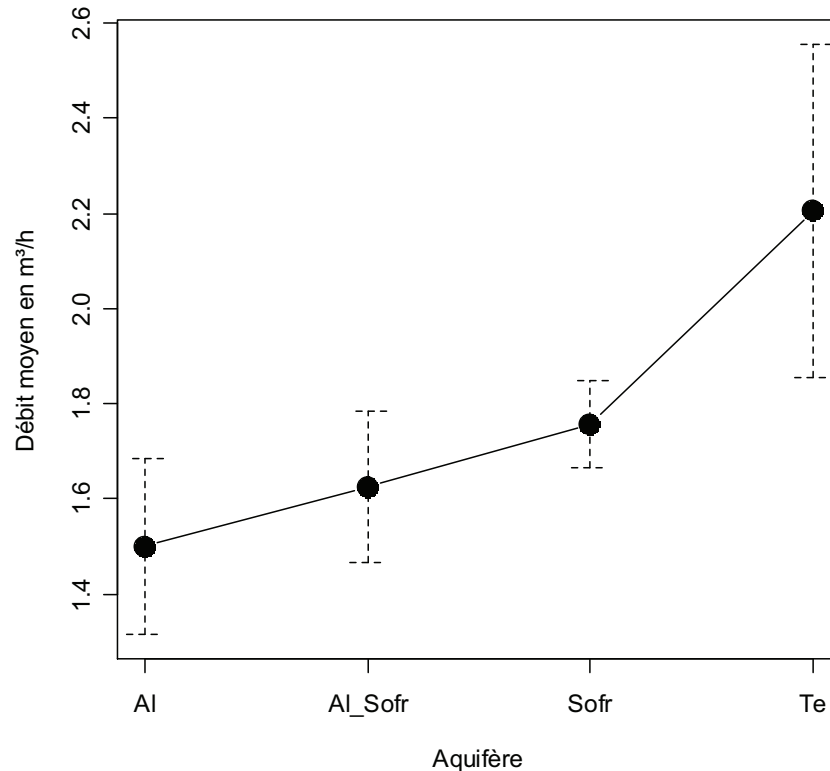


Figure 51: Débit moyen en fonction de la profondeur

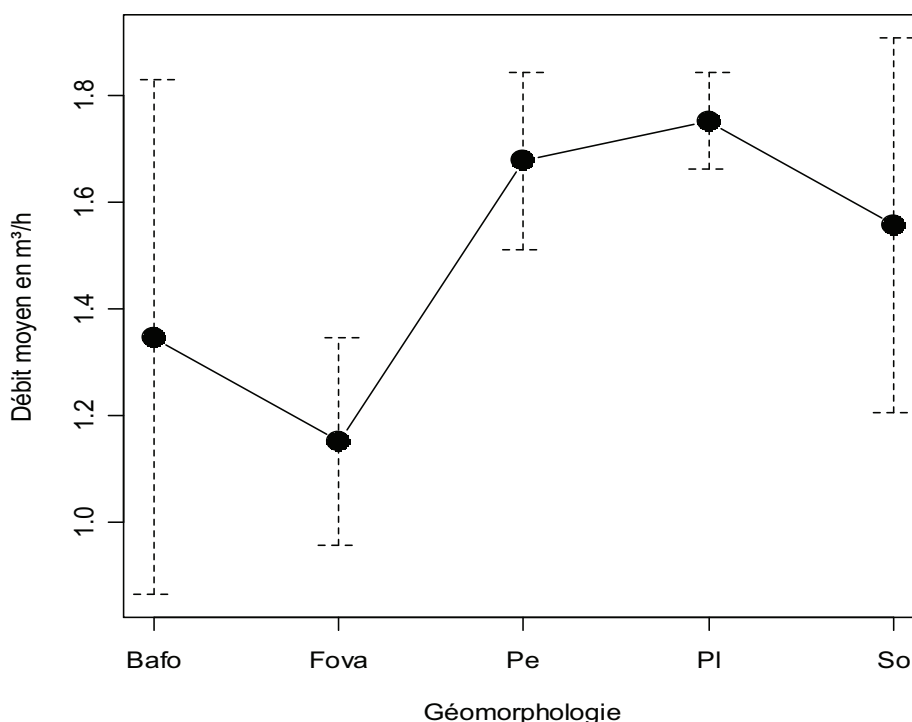
La Figure 51 établit la relation entre la profondeur des ouvrages et le débit moyen. Elle montre les intervalles de profondeur dans lesquelles sont excusés les puits et forages. La productivité croît avec la profondeur jusqu'à atteindre un débit maximal de 2,5 m³/h qui se situe entre 20,5 et 40,5 mètres. Un deuxième pic s'observe pour des profondeurs allant de 70 à 80,5 mètres avec un débit de 2 m³/h. Pour l'exécution des ouvrages nous indiquons qu'il vaut mieux ne pas forer au-delà de 50 mètres de profondeur. Vu la répartition assez faible autour des moyennes de profondeur calculées nous disons que la profondeur d'exécution des ouvrages est à considérer et à respecter pour l'obtention de bon débit.



Sofr = Socle fracturé, Al_sofr = Altération et socle fracturé, Te = Tertiaire (formation du continental terminal), Al = Altération, Al = Altération et socle fracturé.

Figure 52: Débit moyen en fonction de l'aquifère

Les altérites constituent le premier réservoir interceptant les eaux d'infiltration issues des précipitations et du ruissellement. Elles forment des aquifères qui sont généralement les premiers atteints lors de l'exécution des ouvrages. La très grande présence d'éléments colloïdaux dans les altérites ne facilite pas la circulation de l'eau, d'où l'obtention de faibles débits dans les alterites (figure 52). La figure 52 ci dessus montrent que les formations de socle fracturé (fractures) fournissent des débits nettement acceptables par rapport aux autres formations. À côté de ces formations de socle fracturé les formations tertiaires (continental terminal) présentent une moyenne de débit élevée quand l'ouvrage est réalisé avec succès. Malheureusement cette valeur est fictive compte tenu de la forte répartition autour de la valeur moyenne. Nous expliquons cela par le fait qu'il n'y a pas assez d'informations sur ce type de formation ; de ce fait les fortes valeurs de la base de données influencent les faibles valeurs. Les formations de socle fracturées sont à rechercher lors du positionnement des ouvrages de captage.



Bafo = Bas-fond, Fova = Fond de vallée, Pe = Pente, Pl = Plateau, So = Sommet.

Figure 53: Débit moyen en fonction de la géomorphologie

La figure 53 présente la productivité des ouvrages en fonction de la morphologie de surface. Son allure montre que les reliefs de pente, de plateaux, dans lesquelles l'on rencontre les fractures sont les plus productifs. Les sommets présentent quelques gros débits avec un taux de succès très faibles. Les bas-fonds et les fonds de vallée ont produit des débits faibles avec une moyenne inférieure à 1,5 m³/h. La probabilité de succès dans les formations de sommet, de bas fond, et de fond de vallée est très faible. Cela se lit à travers la forte disparité autour de la valeur moyenne. C'est dans les formations de plateau et pente que l'on rencontre les fractures. Ce qui montre bien que les résultats de figures 53 sont en adéquation avec ceux de la figure 52.

3.4.8- Caractéristiques des puits et forages en fonction des formations

Afin d'explicitier les différents paramètres qui conditionnent la variation des débits et de mieux juger les relations reliant les différentes paramètres et faire une analyse détaillée des données, on a effectué des essais de corrélation linéaire. Ces essais consistent à examiner la tendance du nuage de points obtenu à partir de trois variables choisies dans les relevés des puits et forages. Ceci permet de mettre en évidence la variabilité et les potentialités en eau de la nappe en fonction de chacune de ces variables. Les débits sont généralement faibles (figures 51 à 57), avec un régime très irrégulier ; ils augmentent avec la profondeur pour

atteindre des débits maximum ne dépassant jamais les 20 m³/h pour des profondeurs comprises entre 15 et 30 mètres.

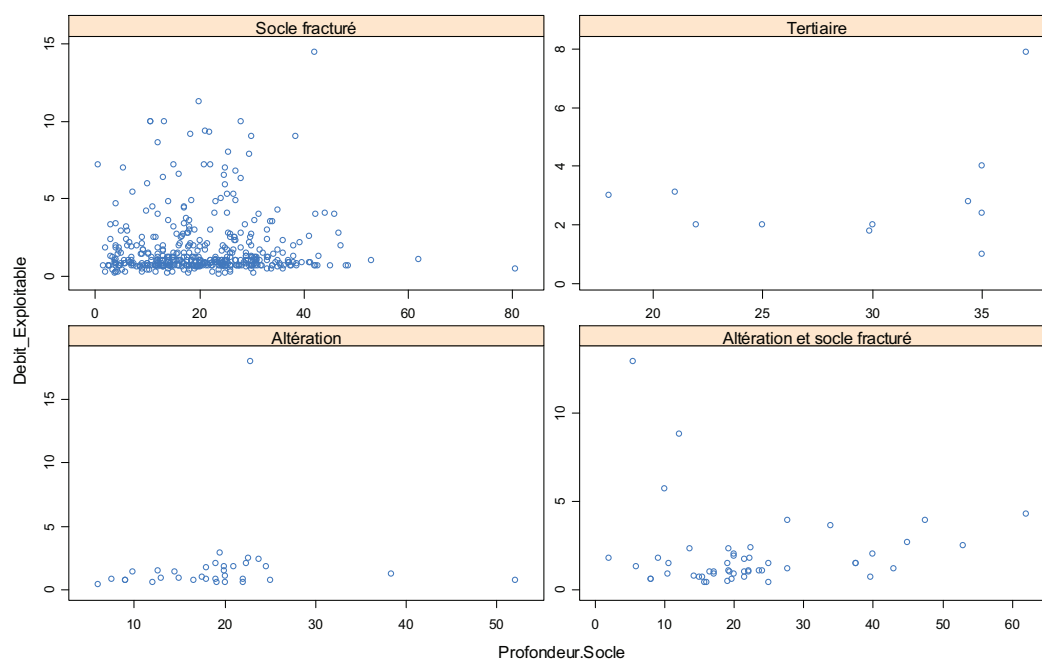


Figure 54: Puits et forages en fonction de la profondeur de socle, du débit et du type d'altération

Le régime des nappes est très irrégulier sur tout le département, leur productivité croît avec la profondeur de socle pour atteindre des valeurs maximales de profondeur comprises entre 15 et 40 mètres. Au-delà des épaisseurs d'altérité de 40 mètres les forages, la productivité devient inexploitable.

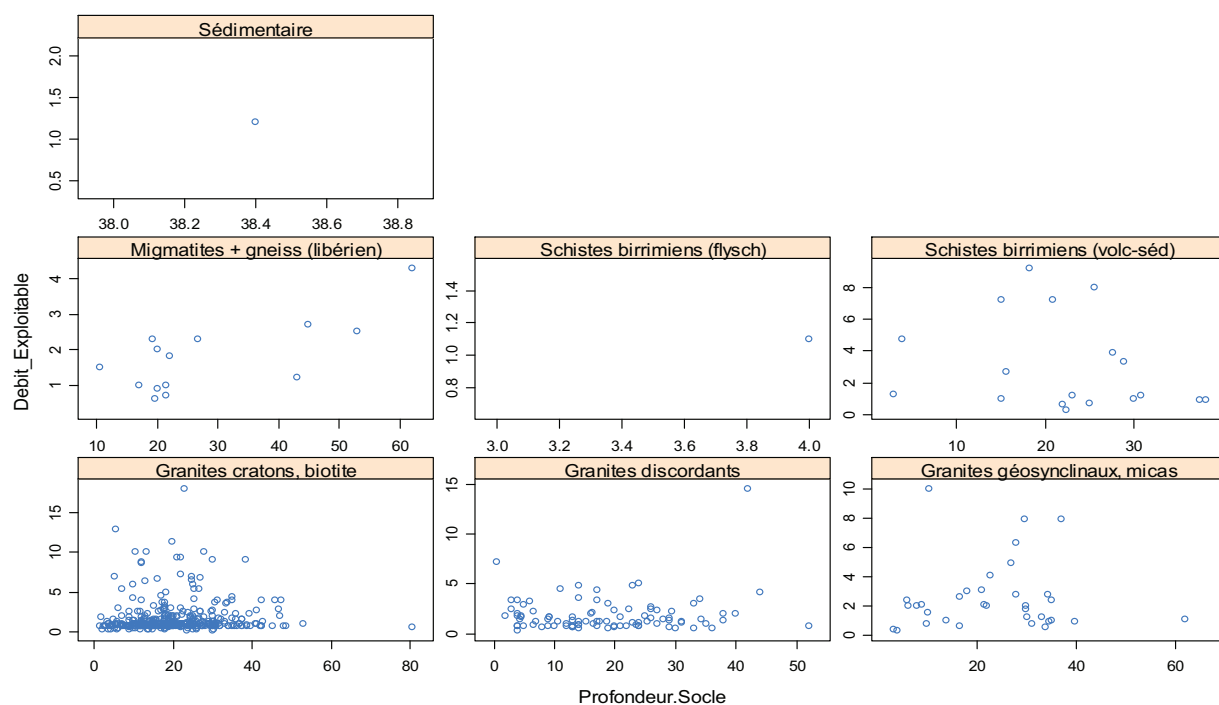


Figure 55 : Puits et forages en fonction de la profondeur de socle, du débit et des formations

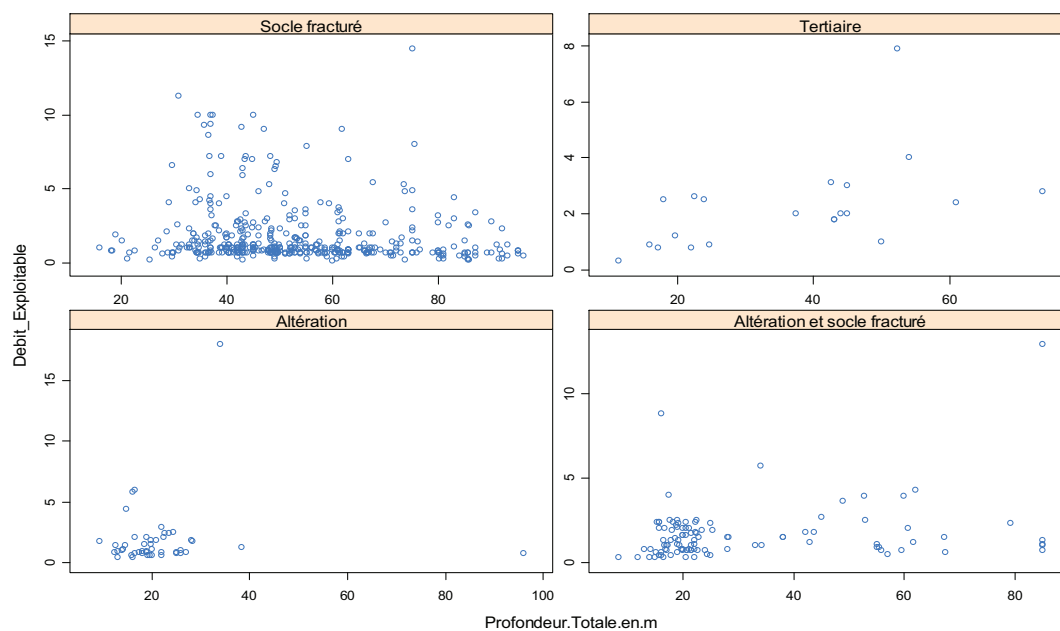


Figure 56: Puits et forages exécutés sur le degré carré de Katiola en fonction de la profondeur totale, du débit et du type d'altération

La figure 56 indique que les formations de socle fracturé ont été privilégiées pour l'implantation des ouvrages. Il apparaît également que ce sont ces formations qui ont produit les plus grands débits.

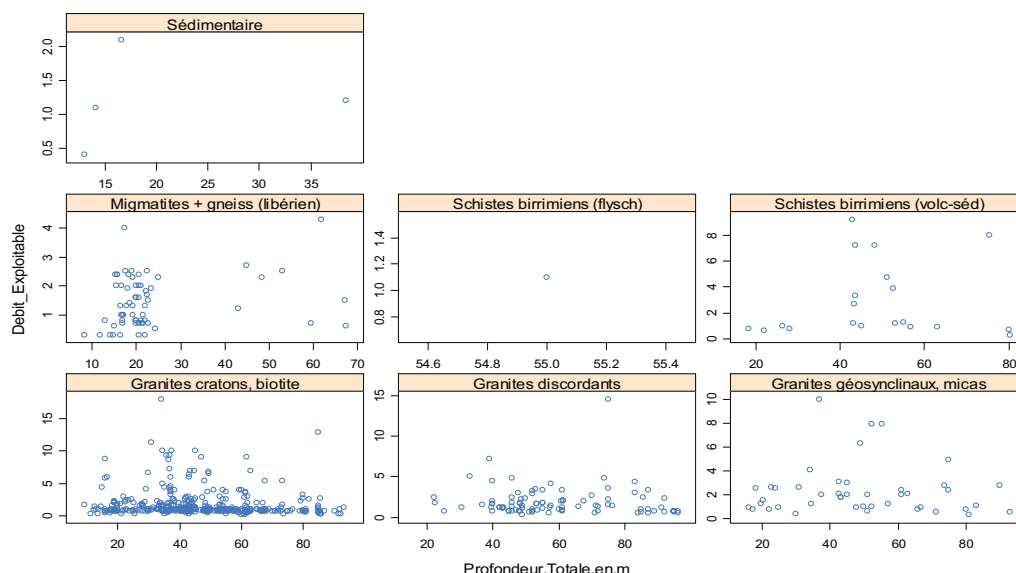


Figure 57: Puits et forages exécutés sur le degré carré de Katiola en fonction de la profondeur totale, du débit et des formations géologiques

L'analyse de la figure 57 nous indique que la presque totalité des ouvrages ont été exécutés dans les granites. Cependant les plus forts débits ont été observés dans les formations de granites. Certains ouvrages ont fourni des débits allant jusqu'à 8 m³/h, c'est-à-dire quatre fois la valeur moyenne des débits observés sur le département. Ces formations de granites sont à rechercher pour le positionnement des ouvrages. Elles sont difficiles à trouver compte tenu de la rareté des affleurements et de la puissante couverture d'altérites.

Conclusion partielle

L'exploitation des données d'hydraulique villageoise (débit, profondeur, formations géologiques) nous a permis de constater que les forages sont généralement profonds et de faible productivité. Les relations entre productivité et géomorphologie, d'une part, et celle entre géologie et productivité, d'autre part, ont montré que ce sont ces formations de granites fracturés et les plateaux et pentes qui fournissent les meilleurs débits.

L'étude de la caractérisation de la répartition spatiale de la productivité des aquifères dans la vallée du Bandama, nous a permis de faire quelques observations sur la distribution des différents puits et forages du département de Katiola. Ces observations sont les suivantes :

- La productivité des ouvrages ne dépend pas de l'épaisseur du sol
- Les formations géologiques à rechercher sont les granites fracturés
- les formations géomorphologiques à rechercher sont les plateaux et les pentes
- Les débits exploitables, c'est-à-dire au moins $2\text{m}^3/\text{h}$, ont été obtenus pour des profondeurs de forages allant jusqu'à 50 mètres. Pour l'exécution de puits ou de forages, il ne faudrait donc pas forer au-delà de 75 mètres.

CONCLUSION GENERALE

L'étude des ressources en eau du département de Katiola a conduit aux conclusions suivantes.

L'analyse et l'étude comparative des images LANDSAT de 1986 à 2000 ont permis de mettre en évidence la disparition de certains cours d'eau. Cette disparition est toujours précédée d'un enherbement suivi d'un envasement avant l'assèchement, phénomènes suivis grâce aux caractéristiques de l'imagerie multispectrale. L'analyse des images LANDSAT a aussi conduit à relever qu'aucun barrage hydroagricole du département n'avait été précédemment cartographié. Le barrage de Kafiné (220 km²) sur la rivière Nabion, qui fait plus de trois fois la surface du barrage hydro-électrique de Taabo, n'existe sur aucune carte de la Côte d'Ivoire.

Cette étude a également tiré profit du potentiel des données SRTM. Leur traitement a permis de faire une cartographie assez détaillée des limites de bassin versant, du réseau hydrographique, et d'établir l'ordre des cours d'eau selon Strahler. Le calcul de l'Index Topographique d'Humidité montre bien la corrélation entre la topographie, et les terres cultivées par les paysans. Malgré l'étendue de notre zone d'étude, il a été possible de trouver une corrélation entre les indices topographiques, la répartition des champs et les caractéristiques du sol. De l'étude des données de puits et de forages nous avons obtenu les principales conclusions suivantes :

- les formations de socle fracturé ont produit les meilleurs débits allant jusqu'à 14,5m³/h avec un débit moyen de 3,63 m³/h ; 68% des ouvrages exécutés dans les schistes sont productifs avec un pourcentage de succès de 38,4% pour un débit moyen de 2,34 m³/h;
- la productivité en fonction de la morphologie du terrain a permis de constater que les ouvrages les plus productifs ont été exécutés sur des reliefs de plateaux ; il est à noter que certains forages exécutés sur d'autres reliefs se sont montrés productifs ;
- les débits exploitables, c'est-à-dire d'au moins 2m³/h, ont été obtenus pour des profondeurs moyennes de forages variant entre 30 et 40 mètres ;
- pour les épaisseurs d'altérites variant entre 20 et 40 mètres, nous avons obtenu des débits exploitables ; il est indiqué d'exécuter les ouvrages dans les altérites sur des épaisseurs variant dans l'intervalle de 20 à 40 mètres.

L'analyse des données de nappe a montré que la nappe était répartie de façon inégale. Certaines zones présentent une répartition assez homogène et continue. D'autres en revanche présentent une répartition très discontinue. La profondeur de la nappe varie également d'un village à l'autre. Les données pluviométriques ont montré une décroissance des quantités de précipitation. La combinaison de la diminution des précipitations et de la disparition des eaux de surface entraîne un phénomène de sécheresse qui est une porte d'entrée pour le désert voisin.

Perspectives

Plusieurs améliorations pourraient être apportées aux approches proposées dans cette thèse. De plus, les approches développées pourraient être testées avec de nouveaux jeux de données, plus volumineux dans le cas 3D par exemple, afin de pouvoir davantage reconstituer et mieux appréhender les phénomènes d'environnement. Dans des travaux futurs, les approches suggérées dans cette thèse pourraient être utilisées en association avec d'autres données environnementales (ex. données mesurant les propriétés physiques de l'eau, du sol, la température et l'insolation) afin d'analyser les effets potentiels des changements environnementaux. Nous envisageons également :

- la mise au point de solution SIG pour l'amélioration et le soutien de la communication dans le domaine des géoressources ;
- la maîtrise des principaux logiciels libres de géosciences pour offrir le meilleur accès et la meilleure compétence dans le développement durable.

Bibliographie

- ABOUCAMI W., BOHER M., MICHARD A. et ALBAREDE F., 1990. A major 2.1 Ga old event of mafic magmatism in West Africa: an early stage of crustal accretion. *J. Geophys. Res.*, 95, 17605-17629
- ABOUMA-SIMBA S., DEROIN J.-P. et REGNOULT J.-M., 2007. Apport de la télédétection radar et de la géophysique aéroportée à la connaissance géomorphologique et géologique de la province de la Nyanga (Sud-Ouest du Gabon). *Photo-Interprétation*, 42, 4, p.23-34 & 68-71.
- Actes du séminaire 21-27 Janvier 1986, DOUALA (CAMEROUN). Éditions de l'ORSTOM, Collection COLLOQUES et SÉMINAIRES PARIS 1987.
- ADJANOHOOUN E., 1964. Végétation des savanes et des rochers découverts en Côte d'Ivoire Centrale. O.R.S.T.O.M., PARIS 238 pp.
- AOUNI L., 1997. Apport de la télédétection dans la mobilisation des ressources en eaux de surface et la gestion du secteur irrigué, Télédétection et ressources en eau Actes de l'atelier international Montpellier, France, 30 novembre - 1 décembre 1995 organisé par LCT - CEMAGREF – ENGREF, ORSTOM, Organisation Des Nations Unies Pour L'alimentation et l'Agriculture, Rome.
- ARDOIN S., DEZETTER A., SERVAT É., BOCQUILLON C., 2001. Redéfinition des fonctions de production des modèles globaux de relation pluie-débit en milieu semi-aride africain. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science, Volume 333, Issue 10, Pages 611-616.*
- AVENARD J.M., Le Climat M. Eldin ; Aperçu Sur Les Régimes Hydrologiques ; G. Girard, J. Sircoulon, P. Touchebeuf ; La Végétation J.L. Guillaumet, E. Adjanooun ; Les Sols A. Perraud Le Milieu Naturel De La Côte D'ivoire Aspect De La Géomorphologie, ORSTOM Paris 1971, 401p.
- AZONSI F., 2002. Proceedings of the International Workshop Tripoli, Libya, Managing shared aquifer resources in Africa Utilisation des aquifères du bassin sédimentaire côtier entre le Bénin et le Togo dans un contexte de variabilité climatique ; problèmes émergents.
- BACCARIA N., BOUSSEMAA M. R. et SNANEB M. H. 2005, Nécessite de développement d'une Méthodologie d'inventaire basée sur des Photographies aériennes numérisées, la réalité de terrain et un SIG : le cas des aménagements de conservation des eaux et du sol en Tunisie, Télédétection, 2005, vol. 5, n° (1-2-3), p. 3-18 ©, Contemporary Publishing International Publié sous l'enseigne Éditions scientifiques GB.
- BAGHDADI N et GRANDJEAN G., LAHONDERE D., PAILLOU P., LASNE Y., 2005. Géophysique externe, climat et environnement, Apport de l'imagerie satellitaire radar pour l'exploration géologique en zones arides. *C. R. Geoscience* 337 719-728.
- BAILLARGEON S., 2005. M.Sc. Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Faculté des sciences et de génie Université Laval Québec. 137 pp.
- BARBIER A. M. septembre 2006, Elaboration de méthodologies innovantes de traitements des données satellitaires dans un cadre agro-environnemental., Académie de Toulouse, Division Espace- Toulouse 73 pp.
- BAUDOT Y., 1997. L'influence de la résolution effective des données télédétectées sur les possibilités d'analyse des milieux urbains complexes. Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF. p. 3-13.
- BEZET O., 2005. Étude de la qualité temporelle des données dans un système distribué pour la fusion multi-capteurs Université de Technologie de Compiègne, France. Thèse 168 pp.
- BIEMI J., GWYN H., DESLANDES S. et JOURDA J.P. 1991. Influence des linéaments sur la productivité des forages dans le bassin versant de la haute Marahoué, Côte d'Ivoire :

- apport de la télédétection et d'un Système d'Information Hydrogéologique à référence spatiale. 7^{ème} congrès de l'AQT, Québec, 23 - 25 octobre 1991.
- BITOM D., VOLKOFF B., BEAUVAIS A., SEYLER F., NDJIGUI P. D., 2004. Rôle des héritages latéritiques et du niveau des nappes dans l'évolution des modelés et des sols en zone intertropicale forestière humide. *Comptes Rendus Geosciences*, Volume 336, Issue 13, p. 1161-1170.
- BOHER M., ABOUCHAMI W., MICHAUD A., ALBAREDE F. et ARNDT N.T., 1992. Crustal growth in West Africa at 2.1 Ga. *Journal of Geophysical Research*, vol. 97, n° B 1, p. 345-369.
- BONN F., CHARBONNEAU L. et BRECHU R., 1989. Analyse de l'utilisation du sol à partir des données SPOT et TM : aspects méthodologiques Télédétection et Sécheresse. Éd. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris © p. 83-92. BRGM 1992. L'eau des granites. Synthèse de l'étude *Exploitabilité des eaux souterraines en zone de socle au Burkina Faso 1984-1991*.
- BOONKLONG O., JAROENSUTASINEE M. et JAROENSUTASINEE K., 2007. Computation of D8 Flow Line at Ron Phibun area, Nakhon Si Thammarat, Thailand. *Proceedings of world academy of science, engineering and technology*, volume 21, January 2007.
- BROOK, G. 1988. Hydrological factors influencing well productivity in the crystalline rock regions of Georgia South-eastern. *Geology*, vol.29, p. 65-81.
- BRUNNER P., H.-J. HENDRICKS FRANSSEN, L. KGOTLHANG, P. BAUER-GOTTWEIN et W. KINZELBACH, 2007. How can remote sensing contribute in groundwater modeling? *Hydrogeology Journal*, 15: 5-18.
- CALMANT S. et SEYLER F., 2006. Continental surface waters from satellite altimetry, *Comptes Rendus Geosciences*, Volume 338, Issues 14-15, p 1113-112.
- CAMIL, J., 1984. Pétrographie, chronologie des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implications pour l'histoire géologique du craton Ouest africain. Thèse de doctorat d'état, Université d'Abidjan, Carte des indices minéraux du département de Katiola, éditée en 2007 par la SODEMI. Échelle = 1/550000.
- Carte géologique de la Côte d'Ivoire. Editée et publiée en 1965 par la direction des mines et géologie de la Côte d'ivoire. Échelle= 1/1000000.
- Carte géologique du département de Katiola, elle a été dressée et imprimée par le bureau de recherches géologiques et minières en 1963 d'après des documents fournis en 1961 par la direction de la géologie et de la prospection minière de Côte d'ivoire. Échelle = 1/500000.
- CHAPLOT V., CURMI P., WALTER C., BERNOUX M., 2000. Analyse de cartes pédologiques pour identifier le rôle du régime tectonique sur la répartition régionale de la perméabilité des altérites. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 330, 479-483.
- CHARLES-EMMANUEL J., 2001. Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'hydrologie, Application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants. Thèse Université. Marne-La-Vallée (France), Sciences de l'Information Géographique. 350 pp.
- CHE X., SEQUEIRA J., 2000 Laboratoire LSIS (UMR CNRS 6168) Equipe LXAO (ESIL) Extraction du réseau hydrographique à partir du modèle numérique de terrain Université de Corse, France. Atelier Traitement des eaux usées – Modélisation 9 pp.

- CHILES J. P., 2004. La modélisation géostatistique de la variabilité spatiale et ses applications Académie de Paris Université Pierre et Marie Curie UFR 928 Sciences de la Terre et Évolution des Systèmes Naturels, Mémoires des Sciences de la Terre N° 2004.01, 71 pp.
- CHOROWICZ J., et DEROIN J.-P., 2003. La télédétection et la cartographie géomorphologique et géologique, Gordon and Breach éditeur.
- Conseil Général du Département de Katiola (juillet 2003). Monographie du département de Katiola. 15pp.
- Conseil Générale du Département de Katiola (Août 2003). Bilan Diagnostic, stratégies et perspectives de développement département de Katiola, 53 p.
- CORBANE C., BAGHDADI N., HOSFORD S., SOMMA J., CHEVREL S. 2004. Application d'une méthode de classification orientée Objet pour la cartographie de l'occupation du sol : Résultats sur aster et LANDSAT ETM. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n°175 (2004-3).
- CRESSIE N., 1993: *Statistics for spatial data*, John Wiley & Sons, New York, 900 p
- DEHBI Y., BONN F., HE Dong-Chen et LAVOIE A., 2007. Évolutions du recouvrement végétal dans un bassin versant : Cas du bassin versant de la rivière aux brochets au Québec. *Revue Télédétection*, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 185-201.
- DEROIN J.-P., DELOR Cl., SIMÉON Y & YAO B., 1994. Remote sensing survey applied to synthetical geological mapping in Ivory Coast (West Africa). *Europto*, 2320, p.2-11.
- DEROIN J.-P., DELOR Cl., SIMÉON Y. & YAO B., 1995. Contribution of remote sensing and other techniques to the geodynamic setting of the Palaeoproterozoic in Ivory Coast (West Africa): comparison to field data. *Géodynamique du Paléoprotérozoïque*, Orléans, 17 novembre 1995, séance spécialisée de la Société Géologique de France, résumé.
- DESPRATS J.F., DUTARTRE P, BARRAT J.M. et FAYE A., 1995. Modélisation hydrogéologique et cartographie du potentiel d'infiltration région Khurutshe Botswana. 181-193p. Publication scientifique BRGM n° 95016.
- DEVIN L., GALLOWAY et HOFFMANN J., 2007. The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 15: 133–154.
- DICKINSON, G.C., 1969. Maps and Air Photographs. Edward Arnold (Publishers) Ltd, London.
- DOUMBIA S., POUCKET A., KOUAMELAN A., PEUCAT J.J., VIDAL M., DELOR C., 1998. Petrogenesis of juvenile-type Birimian (Paleoproterozoic) granitoids in Central Côte-d'Ivoire, West Africa: geochemistry and geochronology, 33-63.
- DU BERGER R., LEMIEUX G.-H., ROULEAU A., BEGIN R., SAVADOGO A.N., NAKOLENDOUSSE S., KOUSSOUBE Y. et DIALLO S., 1996. Étude des facteurs de productivité des aquifères de socle cristallin du Burkina Faso. Rapport final, Centre d'études des ressources minérales de l'Université du Québec à Chicoutimi et Laboratoire d'hydrogéologie de l'Université de Ouagadougou, 70 p.
- EL HARTI A., BANNARI A., BACHAOUI E. M., Aarab E. M., GIROUARD G., GHMARI A. E. 2004. Synergie entre la télédétection multispectrale et les données de terrain pour la conception d'un nouveau modèle géodynamique d'ouverture du bassin paléozoïque des Jebilet centrales (Maroc). *C. R. Geosciences* 336, 1311–1320.
- ENCYCLOPÆDIA UNIVERSALIS, 2008.
- ENGALENC M., 1978 L'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'ouest. Comité Inter africain d'Etudes Hydrauliques (C.I.E.H), 318 pp.

- FONTAINE S. J. et FONTAINE B. 1997, Evolution saisonnière des corrélations entre précipitations en Afrique guinéenne et températures de surface de la mer (1945–1994). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Volume 324, Issue 10, p. 785-792.
- GADOU G., ZAHARI L., DELOR C., SIMEON Y., YAO B. et DEROIN J.-P., 1993. Carte géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, feuille Katiola. Projet FAC II, Direction des Mines et de la Géologie, Abidjan, Côte-d'Ivoire (inédit).
- GASCUEL-ODOUX C. et MEROT Ph., 1986. Variabilité spatiale du transfert de l'eau dans le sol: Utilisation du traçage et analyse géostatistique. *Journal of Hydrology*, Volume 89, Issues 1-2, 93-107.
- GASSE F., 2006. Climate and hydrological changes in tropical Africa during the past million years *Comptes Rendus Palevol*, Volume 5, Issues 1-2, p.35-43.
- Geomines (1982). Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. Ministère des travaux publics et des transports. Direction centrale de l'hydraulique, république de Côte d'Ivoire, Carte de Katiola, Cahier n° 11, 24 pp.
- GILG J. P., 1972. Photographie aérienne et cartographie des structures agraires. Cahier O.R.S.T.O.M., sér. Sci. Hum, vol. IX, no 2, 1972: p 185-190.
- GNOUMA R., 2006, Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron, Thèse Université INSA de Lyon, 448 pages. N° d'ordre 2006-ISAL-0084.
- GRATTON Y., 2002. Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale Institut national de la recherche scientifique INRS-Eau-Terre-Environnement. *Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique*, www.iag.asso.fr
- HAKDAOUI et RAHIMI, 2007. Contribution of combined and not supervised classification of LANDSAT ETM+ imagery to the geological cartography of Kerdoud inlier, Anti-Atlas, Morocco, *Photo interprétation*, Numéro Spécial Hommage à Jean CHOROWICZ.
- INS (2000) Statistique de la population du Recensement Général de la Population et de l'Habitat RGPH 1998.
- Institut français de l'environnement (IFEN) – Office national de la chasse et de la faune sauvage, 2005. Application de la télédétection à l'étude des zones humides : identification des prairies, des roselières, des peupleraies et des gravières. Document Technique. International, Publié sous l'enseigne Éditions Scientifiques GB.
- KAMAGATE B., SEGUIS L., FAVREAU G., SEIDEL J. L., DESCLOITRES M., AFFATON P., 2007 Processus et bilan des flux hydriques d'un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin (Donga, haut Ouémé). *Comptes Rendus Geosciences*, Volume 339, Issue 6, 418-429.
- KAVEH et DEFFONTAINES B., 2007. Shuttle radar topographie mission DTEM analysis for the study of the main percolation direction (site of Bursa, Turkey). *Photo Interprétation*, Numéro Spécial Hommage à Jean CHOROWICZ.
- KHODJA H.; LUBES-NIEL H.; SABATIER R.; MASSON J.-M.; SERVAT E.; PATUREL J. E., 1998. Analyse spatio-temporelle de données pluviométriques en Afrique de l'ouest. Recherche d'une rupture en moyenne. Une alternative intéressante : les tests de permutations. *Revue de Statistique Appliquée*, 46, n° 1, 95-110.
- KOFFI B.G., OUATTARA G., YAO A.K. & DEROIN J.-P., 2008a. Intérêt des images radar ERS pour la géologie en Afrique tropicale : Application à la cartographie lithostructurale dans la région de Ferkessédougou (Côte d'Ivoire, Afrique de l'Ouest). *Photo-Interprétation*, 44, 1, p.3-20 & 31.

- KOFFI B.G., OUATTARA G., YAO A.K. & DEROIN J.-P., 2008b. Réalisation de spatio-cartes géologiques à l'aide de l'imagerie satellitale radar ERS pour une prospection minière efficace en Afrique de l'Ouest. Application aux localités de Tortiya et Tienko en Côte d'Ivoire. *Photo-Interprétation*, 44, 2, p.19-30.
- KOFFI G. B. 1998, Possibilités et limites des images RADAR ERS en cartographie géologique applications en Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie.
- KOUMELAN, A.N., 1996. Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition archéen-protérozoïque. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, Rennes, 277 p.
- KOUSSOUBÉ Y., SAVADOGO A. N. et NAKOLENDOUSSÉ S., 2003. Les différentes signatures des fractures de socle cristallin en zone sahélo-soudanienne du Burkina Faso (bassin versant de Bidi, Province du Yatenga). *Télédétection*, vol. 3, n° 5, p. 419–427.
- KOUSSOUBÉ Y., SAVADOGO A. N. et NAKOLENDOUSSÉ S., 2003. Les différentes signatures des fractures de socle cristallin en zone sahélo-soudanienne du Burkina Faso (bassin versant de Bidi, Province du Yatenga). *Télédétection*, 2003, vol. 3, n° 5, p. 419–427.
- KOUSSOUBE Y., SAVADOGO A. N., NAKOLENDOUSSE S. et BAZIE P., 2000. Efficience de trois méthodes géophysiques d'investigation latérale dans l'identification de contacts géologiques entre des formations du Protérozoïque inférieur du Burkina Faso. *Revue PANGEA* n° 33/34, juin/décembre 2000, p. 49-60.
- KYLE C.F., MATTHEW W., BECKER L. MATOTT S., DAW A., BANDILLA K. et FLEWELLING D.M., 2007. Development of a numerical groundwater flow model using SRTM elevations. *Hydrogeology Journal*, 15: 171–181.
- LASM T., 2000. Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyse statistiques et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen) : Thèse de doctorat unique, université de Poitiers, 274 pp.
- LEBEL T., VISCHER T., 2005. Climat et cycle de l'eau en zone tropicale : un problème d'échelle, *C. R. Geoscience* 337 29–38.
- MARECHAL J.C., WYNS R., LACHASSAGNE P., SUBRAHMANYAM K., TOUCHARD F., 2003. Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d'altération. *Comptes Rendus Geosciences*, 335, Issue 5, Pages 451-460.
- MASSOUD H., 1988. Modélisation de la petite fracturation par les techniques de la géostatistique. *Document BRGM*, n°155, 197p.
- MATHERON G., 1962. Traité de géostatistique appliquée. *Mémoire BRGM*, n° 14.
- MERZOUK A., BADRAOUP M., FASSI D., AKESKOUSS H., BONN F., HINSE M. et GWYN H., 1990. Essai méthodologique de classement et cartographie des terres en vue de la conservation des sols et des eaux en zones semi-arides : Apport de la télédétection. *Télédétection et Sécheresse*, 163-171.
- NICHOLSON S. E., KIM J. et HOOPINGARNER J., 1988. Atlas of African rainfall and its interannual variability, Tallahassee, Floride State University.
- PARIS R., LAVIGNE F., 2005. Les tsunamis en Indonésie : modélisation, impact morphosédimentaire et prévention des risques. Dpt. SHS CNRS - ATIP Jeunes Chercheurs 2005, 66p.
- PARIZEK R.R. 1976. *Lineaments and ground water*. Memurtry, G.T. et Petersen, G.W. (éds) Interdisciplinary application and interpretation of EREP data within the Surquehanna

- River basin. SKYLAB EREP Investigation # 475, NASA contract n° 9, 134076, *ORSER SSEL*, vol. 4, p.59-86.
- PAYRAUDEAU S. 2002 ; Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens. Doctorat Sciences de l'Eau, UMR Structures et Systèmes Spatiaux Cemagref, Engref de Montpellier, ENGREF 436 pp.
- POSS R., 1982. Etude morpho-pédologique de la région de Katiola (Côte d'Ivoire), Cartes des paysages et des unités morpho-pédologiques, Notice Explicative N° 94, ORSTOM PARIS © ISBN 2.7099-0644-9.
- POTREL, J. J. PEUCAT, C. M. FANNING, 1990. Archean crustal evolution of the West African Craton: example of the Amsaga Area (Reguibat Rise). U---Pb and Sm---Nd evidence for crustal growth and recycling. *Precambrian Research*, Volume 90, Issues 3-4, 107-117.
- PROVENCHER L. et DUBOIS J.M., 2006. La Photo-interprétation au Québec: historique et perspectives. *Télédétection*, vol. 6, n° 1, p. 57-70.
- PUECH C., 1997. Remote sensing and water resources; Proceedings of the international workshop Series title: Water reports 1997. W7320/B, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome 1997. ISBN 9789250040707 ; edition 1
- QUESSY S., Août 1996. Utilisation d'une image LANDSAT et d'un système d'information Géographique (sig) pour la détermination de sites potentiels à la coupe d'éclaircie précommerciale en forêt boréale, l'université du Québec à Chicoutimi Mémoires de Maîtrise 132 pp.
- R Development Core Team, 2007. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- RAKOTOMANANA F., RAKOTONIAINA S., RANDREMANANA R., RASOLOMAMONJY J., BÉNIÉ G. et RAKOTONDRAOMPIANA S., 2006. Amélioration de la classification d'image par la méthode contextuelle ICM : application à la détection des gîtes larvaires potentiels du paludisme à Madagascar, *Télédétection*, vol. 6, n° 1, p. 19-29.
- RAMANANTSIZEHENAA P. et RAMIRANIRINAB B., 2005. Système d'Informations Géographique Et Épidémiologie De La Bilharziose Dans La Région de Manandriana, Madagascar. *Télédétection*, Vol. 5, N°1-2-3, p. 139-152.
- RAMOS M. H. D., 2002. Analyse de la pluviométrie sous des systèmes nuageux convectifs : Etude de cas sur des données de la ville de Marseille et de la méthode ISIS de Météo France. Thèse de docteur de l'université Joseph Fourier – Grenoble 1 Spécialité : Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement Ecole Doctorale : Terre Univrs Environnement. 169 pp.
- RASSON JP, ORBAN-FERAUGE F., DAWAGNE JM et DELPEREE F., 1990. Apport d'une nouvelle hypothèse de base en classification d'images satellitaires pour la cartographie de la couverture végétale. *Télédétection et Sécheresse*, p. 265-271.
- RAZACK M., 1984. Application des méthodes numériques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés en hydrogéologie. Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles. Université du Languedoc, Montpellier, France, 384 p.
- RENAUD J., 2006. Université St Etienne France, Mise en place du modèle agro-environnemental SWAT sur le bassin versant du Mercube (Haute-Savoie) : Vers une modélisation des transferts de phosphore, 75 pp.
- RIAD S., 2003. Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles a partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc, Thèse en cotutelle Université des sciences et technologies de Lille & université ibnou zohr d'Agadir préparée au

- laboratoire de mécanique de Lille pour obtenir le grade de docteur de l'université en génie civil spécialité : hydrologie de surface, 154 pp.
- RIPLEY B. D., 1981. Spatial statistics. Wiley, New York SAS Institute Inc. (1985). SAS/STAT user's guide, Version 5. Edition. SAS Institute Inc. Cary
- ROUSSEL J., J.-P, LECORCHE J.F. PONSARD, J. SOUGY, M. VILLENEUVE 1984, Panafrican to Hercynian deformations in the Mauritanides and tectonic significance of gravity anomalies, *Tectonophysics*, Volume 109, Issues 1-2, 20 October 1984, Pages 41-49, 53-59.
- SAVADOGO N. A., NAKOLENDOUSSE S. et DIALLO S., 1997. L'étude comparée de l'apport des méthodes électromagnétique Max Min et électriques dans l'implantation des forages gros débits dans les régions de socle cristallin du Burkina Faso. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 24, No. 1/2, p. 169-181.
- SAVANE I., GOZE B. et BIEMI J., 1997. Évaluation des ressources en eau dans le socle par l'étude des fractures à l'aide des données LANDSAT (bassin d'Odienné, Côte d'Ivoire). Actes de l'Atelier international sur la télédétection et la gestion des ressources en eau, Éd. FAO, Rome. p. 144-156.
- SCHMIDT F. et PERSSON A., 2003. Comparison of DEM Data Capture and Topographic Wetness Indices, Precision Agriculture Springer Netherlands, ISSN: 1385-2256 (Print) 1573-1618 (Online), Volume 4, Number 2 / juin 2003, pages 179-192.
- SEIBERT J., STENDAHL J. et SØRENSEN R., 2007. Topographical influences on soil properties in boreal forests. *Geoderma*, Volume 141, Issues 1-2, p.139-148.
- Séminaire régional sur les latérites : Sols, Matériaux, Minerais, SESSIONS 1 ET 3.
- SERVAT E., PATUREL J. E., Lubès-Niel H., BROU K., MASSON J. M., 1997. Variabilité des régimes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Volume 324, Issue 10, 835-838.
- SIRCOULON, P. TOUCHEBEUF, GUILLAUMET, E. et ADJANOHOON, 1971. Le Milieu naturel de la Côte d'Ivoire aspect de la géomorphologie, ORSTOM Paris 1971, 401p.
- SOREL D. et VERGELY P, 2004. Atlas Initiation aux cartes et aux coupes géologiques (1er cycle/Licence, Prépas, Capes) (coll. Sciences Sup, Série Atlas), 96p. Édition Lavoisier.
- SØRENSEN R. et SEIBERT J., 2007. Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components. *Journal of Hydrology*, Volume 347, Issues 1-2, 15 December 2007, Pages 79-89.
- SOUGY J., 1962. West African fold belt. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 73, 871–876.
- THIÉBLEMONT D., DELOR C., COCHERIE A., LAFON J.-M., GOUJOU J.-C., BALDÉ A., BAH M., SANÉ H., FANNING C.M., 2001. A 3.5-Ga granite–gneiss basement in Guinea: further evidence for early Archean accretion within the West African Craton, *Precambrian Res.*, 108, p. 179–194.
- TRAORE K., 1997. La télédétection comme moyen d'appui à la planification des ressources en eau (cas du Sud-Ouest du Burkina Faso), FAO, LCT - CEMAGREF – ENGREF, ORSTOM, 1997.
- WILSON P. J., GALLANT J., 2000. Terrain Analysis: Principles and Applications
- YERGEAU M., 1989. Agriculture, désertification, conservation des sols. Télédétection et Sécheresse. Éd. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris © P. 75-81.

Site Internet

(Source <http://www.portailsig.org/faq/faq-esri/raster/item-spatial-analyst.html>, 07/11/2008).

(Source <http://www.bafu.admin.ch/hydrologie/01835/02118/02120/index.html?lang=fr>, 06/06/2008).

(Source <http://geonetwork.icrisat.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?currTab=simple&id=30>, 07/11/2008).

Annexes

Annexe 1 : Tableau détaillé des populations du département de Katiola en fonction du lieu d'habitation.

localités par circonscription								
administratives	nombre de campements	nombres de ménage recensés	population résidente					
localités			village noyau	ensemble campement	ensemble localité			
					hommes	femmes	total	rapport masculinité
ensemble département	151	34028	2E+05	13336	84010	81642	2E+05	105,4
sous-préfectures de Katiola								
ensemble sous-préfecture	79	9000	43845	4819	24542	24122	48664	101,6
secteur communal	79	9000	43845	4819	24542	24122	48664	101,6
Foro-foro	3	101	322	178	249	251	500	99,2
Katiola		7127	38515		19256	19259	38515	100,3
Kowara		96	551		269	282	551	95,4
Kpefele	1	278	1221	125	713	633	1346	112,6
Lougbonou	64	795	648	4189	2635	2202	4837	119,7
Ndana		74	429		215	214	429	100,5
Nicolo		217	1030		479	551	1030	86,9
Tiediarikaha	8	72	98	234	174	158	332	110,1
Touro Gare	3	240	1031	93	552	572	1124	96,5
sous-préfecture de Niakara	11	6380	30672	1780	16048	16359	32407	98,2

ensemble sous-préfecture	11	6380	30672	1780	16048	16359	32407	98,2
secteur communal		1602	8254		4071	4183	8254	98,6
sous-préfecture de Niakara								
ensemble sous-préfecture								
secteur non communal	11	4778	2373	1780	11977	12176	24153	98,6
Angolokaha		119	576		300	276	576	108,7
Arikokaha		141	674		336	338	674	99,4
Badiokaha		141	766		373	393	766	94,9
doussoulokaha		81	542		274	268	542	102,2
folofonkaha		175	826		407	419	826	97,1
Fononkaha	1	83	229	128	184	173	357	106,4
Kafine		242	1032		507	525	1032	96,6
Kanawolo	2	539	2003	703	1261	1445	2706	87,3
Kiohan		51	284		138	146	284	94,5
Kolokaha		96	502		258	244	502	105,7
Koulokaha		129	818		413	405	818	102
Latokaha		257	1533		776	757	1533	102,5
Loho	2	161	346	432	426	352	778	121
Longo		223	1207		600	607	1207	98,8
Nanbanakaha		151	703		349	354	703	98,6
Nangoniekaha		224	985		470	515	985	91,3
Niangbo	2	117	623	55	500	118,3	678	93,2
Niediekaha		241	1240		607	633	1240	95,9
Nieretenkaha		28	143		77	66	143	116,7

Ouregukaha	2	185	780	49	415	414	829	100,2
Pekaha		125	500		271	229	500	118,3
Petionnara		394	1490		735	755	1490	97,4
Petunkaha		148	860		437	423	860	103,3
Sepikaha		329	1043		1034	1009	2043	102,5
Serigbokaha		98	484		242	242	484	100
Sinkaha	2	196	664	413	533	544	1077	98
Timorokaha		104	520		227	293	520	77,5
sous-préfecture de Tafiré								
ensemble sous-préfecture	7	5516	26730	1347	14354	13723	28077	122,1
secteur communal	1	2540	15239	6	7696	7549	15245	139,1
koulokakaha		23	122		57	65	122	87,7
N'Golodougou		162	1490		753	737	1490	102,2
Tafire		2332	13518		6836	6682	13518	146
Tieletanakaha	1	22	109	6	50	65	115	76,9
secteur non communal	6	2976	11491	1341	6658	6174	12832	105,8
Badikaha		276	1500		778	722	1500	107,8
cite Usine	2	569	1360	321	937	744	1681	125,9
Ferme Semenciere		80	249		187	162	349	115,4
Kafebelekaha		3	5		1	4	5	25
Korlokaha		21	108		56	52	108	107,7
Kouroukouna	1	120	638	105	386	357	743	108,1
Kpakounakaha		217	1322		680	642	1322	105,9
Pangalakaha		22	140		61	79	140	77,2
Segbelekaha		18	78		40	38	78	105,3

Selilekaha	3	288	635	915	809	741	1550	109,2
SUCAF-CI VILLAGE1		728	2201		1130	1071	2201	105,5
SUCAF-CI VILLAGE2		352	1768		927	841	1768	110,2
SUCAF-CI VILLAGE3		206	1055		532	523	1055	101,7
Tiengarakaha		76	332		134	198	332	67,7
sous-préfecture de Fronan								
ensemble sous-préfecture	37	3650	17129	1977	9260	9846	19106	93,6
secteur communal		1680	8863		4144	4719	8863	86,9
		1680	8863		4144	4719	8863	86,9
secteur non communal	37	1970	8266	1977	5116	5127	10243	99,9
Darakokaha	2	318	1708	115	912	911	1823	100,1
Kanangonon	11	509	2006	995	1494	1507	3001	99,1
Ouandiekaha	2	123	677	38	328	387	715	84,8
SODESUCRE	15	428	1401	699	1079	1021	2100	105,7
Tafolo	6	383	1634	77	864	847	1711	102
Takala		33	176		80	96	176	83,3
Tiengala	1	176	664	53	359	358	717	100,3
sous-préfecture de Timbé								
ensemble sous-préfecture	11	1569	7051	286	3444	3893	7337	90,7
secteur non communal	11	1569	7051	286	3444	3893	7337	90,7
Attienkaha		115	602		287	315	602	91,1
Kabala		212	1057		510	547	1057	93,2
Kafigue		83	284		138	146	264	94,5
Kasseme	5	143	736	137	393	480	873	81,9
Koffissiokaha		219	1286		602	684	1286	88

Ourougbankaha		89	270		132	138	270	95,7
Timbé		392	1419		639	780	1419	89,7
Toumboho	2	155	766	49	355	460	815	77,2
Yekolo	4	161	631	100	388	343	731	113,1
sous-préfecture de Tortiya								
ensemble sous-préfecture	6	7913	26934	3127	16362	13699	30061	118
secteur communal	1	6605	24339	734	13569	11504	25073	116,9
Kationron	1	333	685	734	742	677	1419	109,6
Tenindieri		150	574		297	277	574	107,2
Tortiya		6122	23080		12530	10550	23080	117,8
secteur non communal	5	1308	2595	2393	2793	2195	4088	124,4
Allasso	1	22	99	56	85	70	155	121,4
Lotialga	1	101	301	148	224	225	449	99,6
Nabedjakaha	1	65	210	134	169	175	344	96,6
Sangadjokaha	2	1002	1421	2055	2003	1473	3476	136
Zanakaha		118	564		312	252	564	123,8

service de gestion et de planification des ressources en eau (s.g.p.r.e.) page 2 sur 6 ministère de l'hydraulique. république du Sénégal logiciel
progres-senegal / antea-burgeap1999 28/07/2004 12:57

Annexe 2 : Caractéristiques techniques des capteurs

CAPTEURS	DATE LANCEMENT	ORBITE	RESOLUTION SPATIALE	RESOLUTION SPECTRALE	DETECTEUR ORIENTABLE	STEREO	LARGEUR DE FAUCHEE	REPETITIVITE
DONNEES DE SATELLITES								
LANDSAT 1 à 3								
RBV	1972, 1975, 1978	915 km	56 X 79 m	RBV : 3 bandes dans le visible	NON	NON	185 kms	18 jours
		Quasi polaire héliosynchrone						
MSS	1972, 1975, 1978	915 km		MSS : 4 bandes			185 kms	18 jours
		Quasi polaire héliosynchrone						
			56 X 79 m	4 : 500 - 600 nm				
			56 X 79 m	5 : 600 - 700 nm				
			56 X 79 m	6 : 700 - 800 nm				
			56 X 79 m	7 : 800 - 1100 nm				
LANDSAT 4 et 5								
MSS	1982 et 1984	705 km		Idem LANDSAT 1,2,3	NON	NON	185 kms	16 jours
		Quasi polaire héliosynchrone						
TM	1982 et 1984	705 km		Thematic Mapper à 7 bandes			185 kms	16 jours
		Quasi-polaire héliosynchrone						
			30 x 30 m	1 : 450 à 520 nm (bleu)				
			30 x 30 m	2 : 530 à 610 nm (vert)				
			30 x 30 m	3 : 620 à 690 nm (rouge)				
			30 x 30 m	4 : 780 à 910 nm (IR proche)				
			30 x 30 m	5 : 1570 à 1780 nm (IR moyen)				
			120 x 120 m	6 : 10 400 à 12 600 nm (IR thermique)				
			30 x 30 m	7 : 2100 à 2350 nm (IR moyen)				
LANDSAT 7								
ETM+	1999	705 km		ETM+ (enhanced thematic Mapper)	NON	NON	185 kms	16 jours
		Quasi polaire héliosynchrone						
			30 x 30 m	1 : 450 à 520 nm (bleu)				
			30 x 30 m	2 : 530 à 610 nm (vert)				
			30 x 30 m	3 : 620 à 690 nm (rouge)				
			30 x 30 m	4 : 780 à 910 nm (IR proche)				
			30 x 30 m	5 : 1570 à 1780 nm (IR moyen)				
			60 x 60 m	6 : 10 400 à 12 600 nm (IR thermique)				
			30 x 30 m	7 : 2100 à 2350 nm (IR moyen)				
			15 x 15 m	8 : 500 à 900 nm (panchromatique)				

Annexe 3: Carte détaillée du département de Katiola