

Mise en place d'une base de données pour une modélisation hydrologique distribuée du bassin versant du Bandama (Côte d'Ivoire) : apport d'un modèle numérique d'altitude, de la télédétection et du SIG Physitel

Kassi Alexis KOUAME^{1*}, Koffi Fernand KOUAME², Amani Michel KOUASSI³,
Sekouba OULARE¹, Gnangui Christian-Rodrigue ADON² et Monique BERNIER⁴

¹ LSTEE, UFR STRM, Université de Cocody, 22 Bp 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

² CURAT, UFR STRM, Université de Cocody, 22 Bp 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

³ Institut National Polytechnique Houphouët Boigny (INP-HB), BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

⁴ INRS, ETE, Canada, 490, rue de la Couronne, Québec, Québec, Canada G1K 9A9

* Correspondance, courriel : kkassialexis@yahoo.fr

Résumé

Le fleuve Bandama, l'un des plus importants fleuves de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest) est le seul dont le bassin versant est entièrement situé sur le territoire ivoirien. Il prend sa source dans le Nord du pays et coule globalement dans une direction Nord-Sud. Son bassin versant est à cheval sur les deux principales formations végétales caractéristiques des régions tropicales : la savane (Nord) et la forêt (Sud). Le déplacement du front forêt-savane, causé par les coupes anarchiques de bois, les extensions de plantations industrielles ont eu des impacts sur le régime des écoulements (de surface et souterrains) des eaux dans cet hydrosystème. De plus, les aménagements hydrauliques (construction des barrages hydro-électriques de Kossou et Taabo) et hydro-agricoles (construction d'environ 250 barrages pour l'irrigation) ont encore des impacts très importants sur le fonctionnement et les caractéristiques hydrogéologiques du bassin. Pour mieux comprendre le fonctionnement de cet hydrosystème et dans le contexte d'une gestion durable des ressources en eau, la modélisation hydrologique du bassin versant du Bandama s'avère nécessaire.

L'objectif de cette étude est de fournir les paramètres physiques du bassin versant du Bandama à partir du modèle numérique d'Altitude (MNA) et de la télédétection, utilisables à des fins de modélisation hydrologique distribuée. La démarche adoptée comporte deux (2) étapes. La première étape consiste en la cartographie des descripteurs physiques du bassin qui influencent les processus hydrologiques tels que la topographie, le réseau hydrographique, la couverture végétale et le type de sol. A partir du module PHYSITEL et d'un Modèle Numérique d'Altitude (MNA), les cartes des pentes et des orientations des facettes sont dérivées et ensuite couplées au réseau hydrographique pour la caractérisation de la structure interne d'écoulement du bassin et la détermination d'Unités Hydrologiques Relativement Homogènes (UHRH : petits sous bassins versants utilisés comme unités de simulations des processus hydrologiques). La classification supervisée des images satellitaires MODIS permet de produire des cartes d'occupation du sol. La carte des types de sols est extraite de la carte pédologique de la Côte d'Ivoire. La seconde étape consiste au croisement des cartes thématiques établies. La combinaison de ces cartes thématiques permet de déterminer le type de sol dominant et les occupations du sol par UHRH.

Mots-clés : *hydrosystème, modélisation hydrologique, MNA, télédétection, PHYSITEL, UHRH.*

Abstract**Implementation of a database for a distributed hydrological modelling of the Bandama watershed (Côte d'Ivoire): contribution of digital elevation model, remote sensing and GIS methods**

The Bandama River, one of the most important rivers of Côte d'Ivoire (western Africa) is the only one whose watershed is completely situated on the Ivorian territory. It takes its source in the North of the country and flows globally into a North-South direction. Its watershed is on the two main characteristic vegetable formations of the tropical regions: the savanna (North) and the forest (South). The movement of the forest-savanna front, caused by the anarchy wooden cuttings, the extensions of industrial plantations had impacts on the regime of surface and underground drainages in this hydrosystem. Furthermore, the hydraulic arrangements (construction of the hydroelectric dams of Kossou and Taabo) and hydro-agricultural (construction of about 250 dams for the irrigation) still have very important impacts on the functioning and the hydrogeologic characteristics of the watershed. For a better understanding of the functioning of this hydrosystem and in the context of a durable management of water resources, hydrologic modelling of the Bandama watershed is necessary. The objective of this study is to supply the physical parameters of the Bandama watershed from the Digital Elevation Model (DEM) and remote sensing, useful in purposes of distributed hydrological modelling. The adopted methodology is based on two (2) steps. The first step consists on the mapping of the physical descriptors of the watershed which influence the hydrological processes such as topography, river network, land cover and type of soils. The data integration in a geographical information system allowed physiographical discretization and the determination of Relatively Homogeneous Hydrological Units (RHHU: small watersheds used as units of simulations of the hydrological processes) on which spatial heterogeneities of watershed surface states (types of soil and land use) are taking into account. The supervised classification of the satellite images MODIS allows to produce land use maps. The map of the types of soils is extracted from the pedological map of Côte d'Ivoire. The second step consists in combining established thematic maps in order to determinate the type of dominant soils and land uses by RHHU.

Keywords : *hydrosystem, hydrologic modelling, DEM, remote Sensing, PHYSITEL, RHHU.*

1. Introduction

La caractérisation des variables de temps et d'espace qui gouvernent le cycle hydrologique, ainsi que l'analyse des changements des états de surface sont indispensables pour la gestion efficace de l'eau dans un bassin versant [1]. Les nouvelles technologies et les outils numériques se présentent comme des outils adaptés à la connaissance des ressources hydriques [2] ainsi que pour leur gestion rationnelle. Au cours de ces dernières décennies, l'usage des modèles mathématiques [3] est devenu courant dans les procédures de développement et de gestion des ressources hydriques dans un territoire donné. Cela permet non seulement d'évaluer les ressources en eau, mais aussi de planifier, de développer et de proposer des solutions à des problèmes de génie civil, de gestion quantitative et qualitative des eaux, de conservation des sols, etc. De nombreux modèles hydrologiques [3] ont été développés depuis la deuxième moitié des années 80. Parmi ces modèles, certains procèdent par une approche globale et considère le bassin comme une « boîte noire », c'est-à-dire un tout indifférencié (modèles globaux) tel que le modèle GR4 [4], tandis que d'autres permettent un découpage en des mailles ou des petites unités (modèles distribués) tel que le modèle HYDROTEL [5]. Avec ces derniers il devient possible de faire une représentation de plus en plus fine

d'un hydrosystème, siège de processus hydrologiques variés avec des interactions multiples et à la fois complexes, intégrant des paramètres naturels et/ou liés aux activités humaines [6]. Selon A. Pietroniro et R. Leconte [7], dans la modélisation distribuée, les progrès réalisés dans les domaines de l'informatique et de l'observation de la terre, notamment au niveau de l'exploitation du modèle numérique d'altitude (MNA), des données de télédétection et des systèmes d'informations géographiques (SIG) ont contribué à améliorer les capacités des modèles hydrologiques existants, ainsi qu'au développement des nouveaux modèles. Le couplage des techniques d'observation de la terre à la modélisation mathématique permet de prendre en compte la variabilité spatiale et temporelle des processus et des diverses variables d'état au niveau du bassin [5]. La modélisation spatialisée devient alors un bon outil pour la compréhension du fonctionnement d'un hydrosystème et la prise en compte des modifications de certaines variables comme par exemple, l'occupation et l'utilisation du sol, les pratiques et les aménagements du territoire. En s'appuyant sur des représentations physiques des processus, l'on peut espérer pouvoir dériver les paramètres des modèles directement à partir des observations sur le terrain [8]. Les modèles les plus complexes représentent le bassin versant comme un système continuellement en évolution par rapport aux variables de temps et d'espace. Cela nécessite l'utilisation d'un nombre très important de paramètres. Les modèles à base physique SHE [8] et THALES [9] en sont des exemples. L'applicabilité de ces modèles est réduite car très peu de bassins possèdent des bases de données très détaillées et continues. D'autres modèles plus flexibles, comme TOPMODEL [10] et HYDROTEL [11] offrent un bon compromis pour l'exploitation des données disponibles. Le bassin versant du Bandama, à l'instar de la plupart des bassins sub-sahéliens, ne dispose pas de données suffisantes pour une étude hydrologique rigoureuse. Le modèle hydrologique HYDROTEL, pour lequel cette base de données est constituée, est un modèle qui peut s'appliquer sur ce bassin versant grâce à sa flexibilité.

HYDROTEL a été validé sur la rivière Chaudière de la province du Québec [12]. Il a été testé avec succès sur des bassins versants d'autres provinces canadiennes (Ontario et Colombie-Britannique). Récemment, ce modèle a été utilisé en milieu tropical, plus précisément en Côte d'Ivoire par [6] pour simuler les écoulements dans le bassin versant du N'zo et [13] dans le bassin versant du N'zi. HYDROTEL est subdivisé en deux logiciels : le logiciel PHYSITEL qui permet la préparation de la base de données et le logiciel HYDROTEL qui sert à effectuer les simulations hydrologiques. L'objectif de cette étude est de déterminer les paramètres physiques du bassin versant du Bandama utilisables à des fins de modélisation hydrologique distribuée à partir des données issues de la télédétection et des SIG. Pour atteindre l'objectif général, les objectifs spécifiques suivants ont été abordés : cartographier les descripteurs physiographiques du bassin versant du Bandama (topographie, occupation du sol, types de sol) et déterminer les unités spatiales homogènes du bassin par le croisement de ces descripteurs physiographiques.

2. Description du site d'étude

Le bassin versant du Bandama s'étend du Nord au Sud de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 5°14N et 10°21N et les longitudes 4°W et 7°W. Il a une superficie de 97 000 km² et une forme rectangulaire. Il est drainé par le fleuve Bandama et ses deux principaux affluents : la Marahoué et le N'zi. Ce fleuve, d'une longueur de 1 050 km, est le seul parmi tous les grands fleuves de la Côte d'Ivoire dont le bassin versant est entièrement en territoire ivoirien. Il prend sa source à une altitude de 480 m, entre Korhogo et Boundiali. Après une orientation E-W de son cours supérieur jusqu'à Ferkéssédougou, il prend une direction N-S. De Ferkéssédougou à sa confluence avec le Bou, le Bandama décrit une succession de nombreux méandres. Au droit de Kossou, la vallée se resserre notablement. C'est à cet endroit qu'est construit depuis 1971 le barrage de Kossou (le plus important barrage hydroélectrique du pays). Peu après Kossou, il reçoit

la Marahoué ou Bandama rouge, long de 550 km. Le Bandama prend ensuite une direction NW-SE jusqu'à sa confluence avec le N'zi, affluent long de 725 km. Il reprend ensuite une direction N-S jusqu'à son embouchure à Grand-Lahou [14,15].

La zone d'étude est limitée par les bassins versants du Niger au Nord, les bassins versants du Boubo, de l'Agnéby et l'océan atlantique au Sud, le bassin versant de la Comoé à l'Est et le bassin versant du Sassandra à l'Ouest (*Figure 1*).

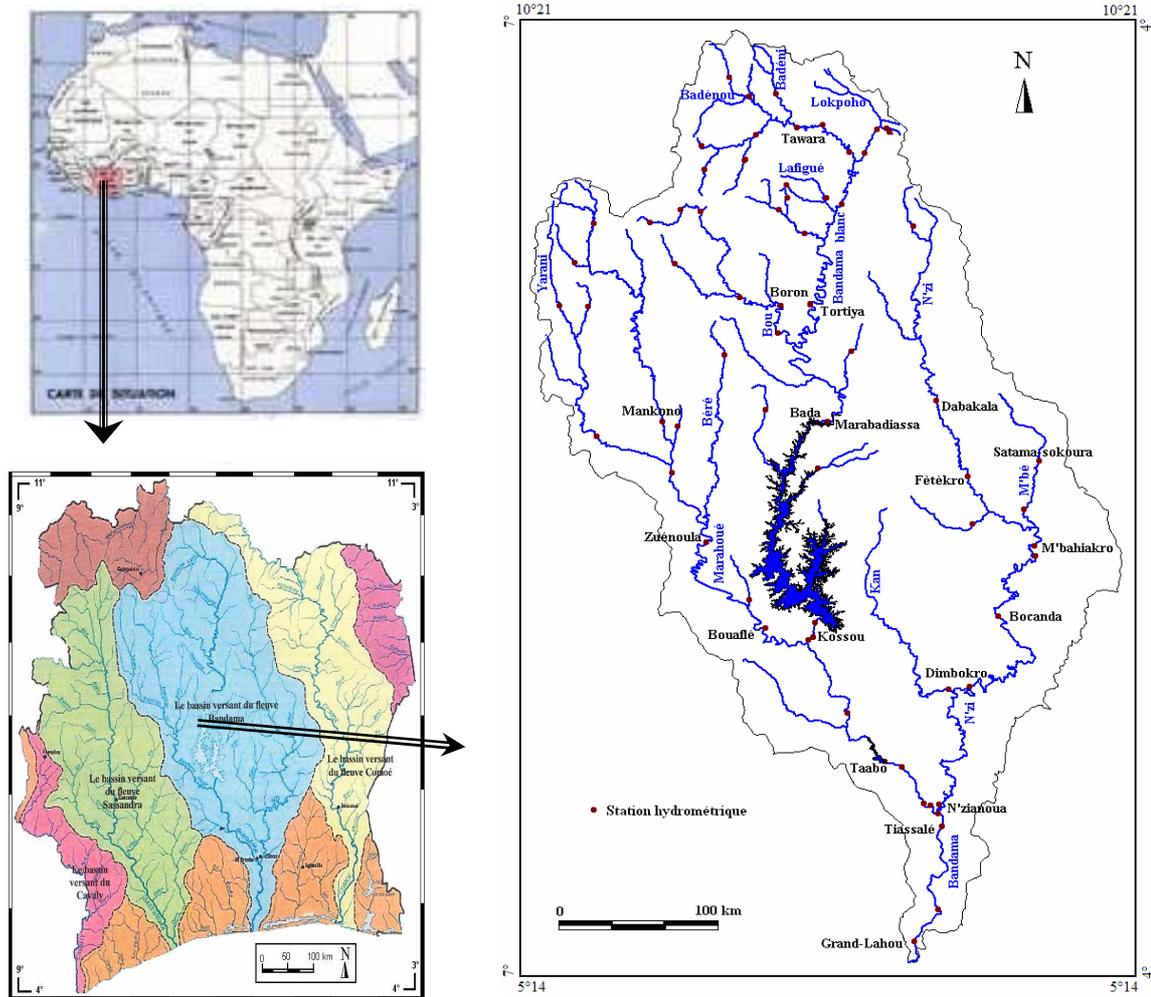


Figure 1 : Carte de présentation de la zone d'étude (bassin versant du Bandama)

3. Matériel et méthodes

3-1. Données utilisées

3-1-1. Imagerie satellitaire

Les images MOD13A3 « Indice de végétation » ont servi à l'élaboration de ce travail. Les caractéristiques de ces images sont présentées dans le *Tableau 1*.

Tableau1: *Produit MOD13A3* (<http://edcdaac.usgs.gov/modis/mod13.html>)

| Bandes | Nom | Résolution spatiale (m) | Résolution temporelle (mois) |
|---------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | NDVI | 1000 | 1 |
| 2 | EVI | 1000 | 1 |
| 3 | Qualité de NDVI | 1000 | 1 |
| 4 | Qualité d'EVI | 1000 | 1 |
| 5 | Réflectance du rouge | 1000 | 1 |
| 6 | Réflectance de PIR | 1000 | 1 |
| 7 | Réflectance du bleu | 1000 | 1 |
| 8 | Réflectance du MIR | 1000 | 1 |
| 9 | Angle moyen de vue au zénith | 1000 | 1 |
| 10 | Angle moyen du soleil au zénith | 1000 | 1 |
| 11 | Angle moyen de l'azimut relatif | 1000 | 1 |

Pour la détermination des classes d'occupation du sol, des images MODIS-NDVI (MOD13A3) de Février 2006 fournies par un site Internet américain (<http://modarch.gsfc.nasa.gov/MODIS/RESULTS/DATAPROD/>) ont été utilisées. Ces images sont issues des scènes MOD13A3 h17v07 (Nord de la Côte d'Ivoire) et MOD13A3 h17v08 (Sud de la Côte d'Ivoire). Elles ont déjà subies des prétraitements, c'est-à-dire des corrections radiométriques et géométriques.

3-1-2. Données cartographiques auxiliaires

Le Modèle Numérique d'Altitude (MNA) du Bandama est fourni par le site américain « <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3/Africa> » en format SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Ces données ont été recueillies, au cours d'une mission d'une dizaine de jours (11/02/2000 – 22/02/2000) par la navette spatiale américaine Endeavour, grâce à la technique de l'interférométrie radar. Ce MNA possède une résolution spatiale de 90 m et une précision altimétrique de 16 m/10 m (absolu/relatif). La couverture du bassin versant a nécessité vingt-quatre (24) fichiers SRTM allant du 4 au 7° longitude Ouest, et du 5° au 10° latitude Nord.

Pour l'établissement de la carte texturale du sol du bassin versant du Bandama, nous avons utilisé les cartes pédologiques à l'échelle 1/500 000 du Nord-Est, Nord-Ouest, Sud-Est et Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire réalisées par *Perraud*(1971).

La réalisation du réseau hydrographique numérique de la zone d'étude a été effectuée à partir des cartes topographiques du Sud-Est, Sud-Ouest, Nord-Est et Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire à l'échelle 1/200 000 réalisées par le Centre de Cartographie et de Télédétection (CCT) en 1995.

3-2. Description du Système d'Information Géographique « PHYSITEL »

PHYSITEL a été développé à l'INRS Eau, Terre et Environnement du Canada depuis 1985 [5]. Il est conçu pour servir à la préparation de la base de données physiographiques du modèle hydrologique HYDROTEL [11]. Il permet l'intégration de divers types de données provenant de la télédétection et des SIG. Les données utilisées par PHYSITEL sont de type matricielle (MNA, types et occupation du sol) et vectoriel (réseau

hydrographique, limite du bassin versant). PHYSITEL permet de caractériser la structure interne d'écoulement d'un bassin versant à partir d'un modèle numérique d'altitude (MNA). La détermination de la structure interne d'écoulement sert de base pour la caractérisation des unités hydrologiques, représentées par des sous-bassins. Les informations portant sur les états de surface qui conditionnent les phénomènes hydrologiques « évaporation-écoulement-infiltration » peuvent être intégrées pour déterminer les paramètres hydrologiques des unités de calcul. Ainsi, il est possible de prendre en compte les variabilités spatiales du couvert végétal et des différents types de sols du bassin.

3-3. Approche méthodologique

3-3-1. Cartographie des descripteurs physiographiques

Les processus hydrologiques sont influencés par des descripteurs physiographiques tels que la topographie, les types de couvert végétal et les types de sols [6,11,16-18]. Pour cette étude, les informations sur les descripteurs physiographiques du bassin ont été obtenues à partir du MNA, de la télédétection et des SIG.

◆ Morphologie du bassin et calcul des orientations d'écoulement

La pesanteur étant le moteur essentiel des écoulements liquides, le premier facteur important de la genèse des débits est la topographie [6,19]. Les bassins versants, bien que de petite taille, présentent de grandes hétérogénéités spatiales au niveau des pentes. Pour tenir compte de cette hétérogénéité, nous avons effectué une description rigoureuse de la morphologie du bassin à partir du modèle numérique d'altitude (MNA) qui est une représentation matricielle de la topographie (*Figure 2*).

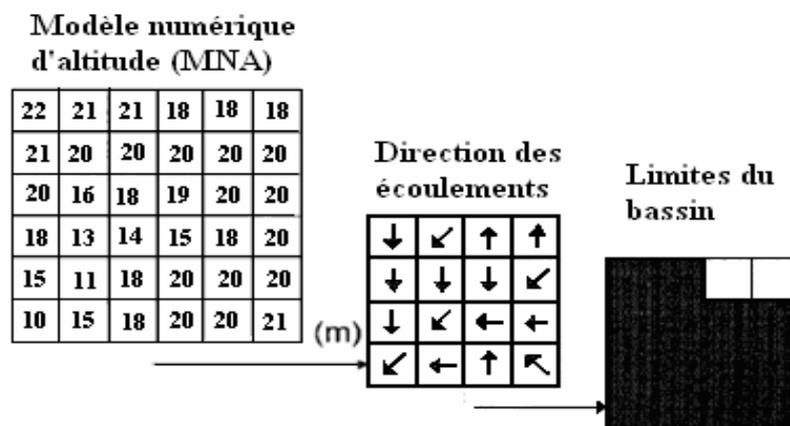


Figure 2 : Détermination du sens des écoulements à partir du MNA [11]

Dans l'approche spatialisée, la détermination du « chemin de l'eau » se fait à l'intérieur de chacune des mailles du MNA. Notons que le réseau d'écoulement qui est déterminé tient compte des directions d'écoulement imposées sur les mailles par le réseau hydrographique. C'est dans le secteur des plaines, plateaux et vallées où les pentes sont faibles, comme le bassin versant du Bandama, que le couplage du réseau hydrographique au MNA est efficace en ce sens qu'il permet de bien représenter les sinuosités des cours d'eau et de mieux construire un réseau de drainage plus proche de la réalité selon l'approche DRLN préconisé par [20].

◆ *Cartographie de l'occupation du sol à partir d'une image MODIS*

Les écoulements sont influencés par les états de surface. Les états de surface ont été utilisés pour l'estimation des débits dans plusieurs bassins dans les régions sahéliennes et soudano-sahéliennes [18]. Pour la connaissance des classes d'occupation du sol du bassin versant du Bandama, nous avons utilisé une image MODIS-NDVI qui a permis de décrire le paysage naturel du bassin. Il s'agit d'une image du mois de Février 2006. La disponibilité, la résolution spatiale et la netteté de l'image (absence de couvertures nuageuses) ont guidé ce choix. Avant son utilisation, l'image doit subir un certain nombre de traitements (*Figure 3*).

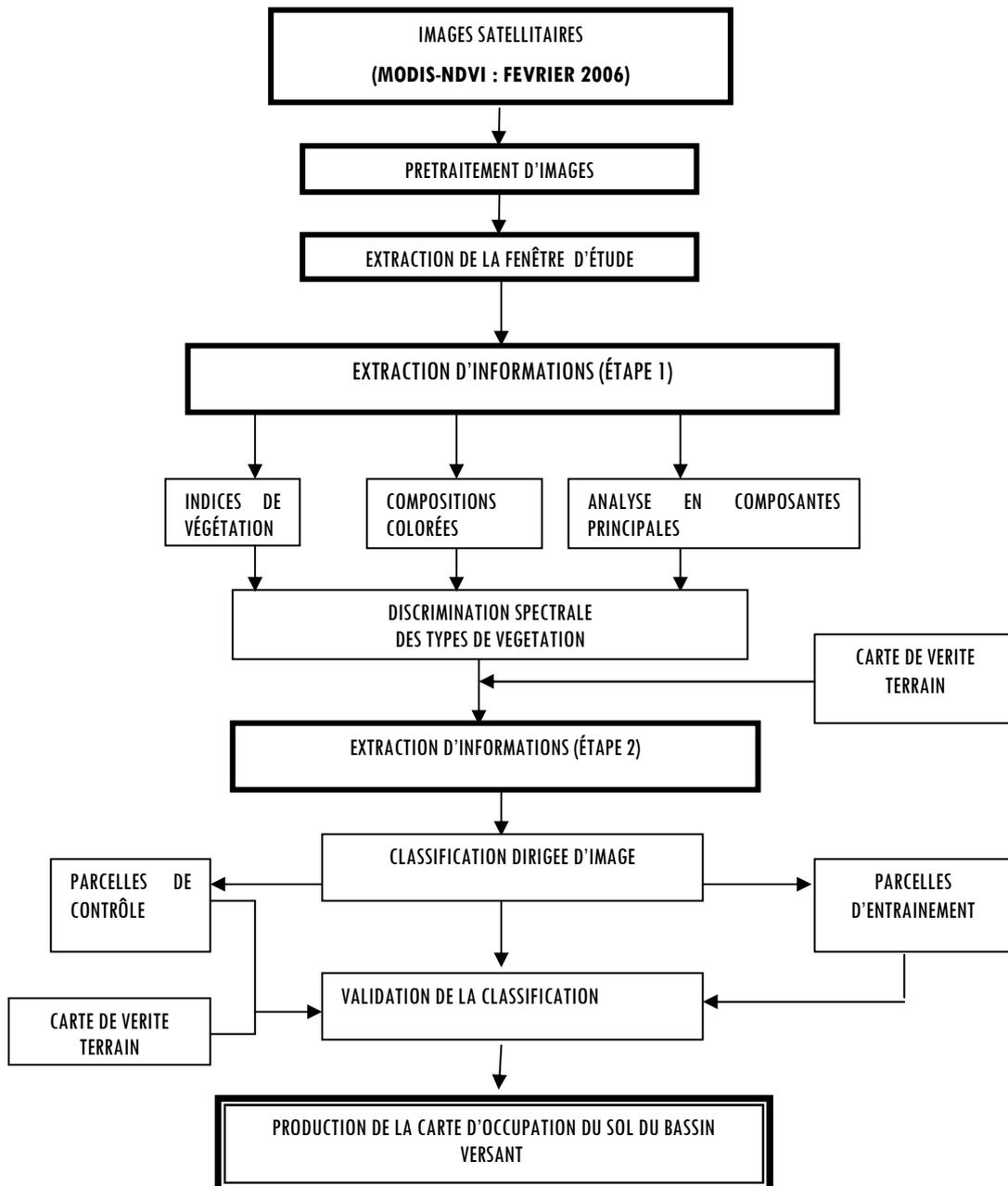


Figure 3 : *Synthèse des traitements de télédétection et cartographie de l'occupation du sol*

La classification dirigée de l'image est réalisée à l'aide de l'algorithme du maximum de vraisemblance en s'appuyant sur différentes cartes thématiques (carte de végétation, 1971 ; carte topographique, 1995 ; carte du réseau routier, 1999) et sur des données de terrain du bassin. L'identité et la localisation des sites spécifiques représentant des régions homogènes sur l'image ont été obtenues à travers la combinaison des observations sur le terrain et des données cartographiques. Ces régions sont communément appelées des sites d'entraînement car les caractéristiques spectrales de ces régions sont utilisées pour entraîner le classificateur qui est ici, l'algorithme du maximum de vraisemblance que nous avons utilisé pour classer le reste de l'image.

◆ *Cartographie du type de sols*

L'infiltration et l'écoulement de l'eau dans le bassin dépendent de la structure et de la texture du sol, de son épaisseur ainsi que du type de formation rencontrée à sa base [17,21]. Dans un souci de simplification et de modélisation des processus, la démarche adoptée pour cette étude est basée uniquement sur l'analyse texturale des sols du bassin versant. L'analyse granulométrique des sols du bassin est effectuée à partir de la carte pédologique du Nord-Est, Nord-Ouest, Sud-Est et Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire réalisée par [22] à l'échelle de 1/500 000, et en s'appuyant sur la nomenclature du triangle textural (Figure 4) de l'United States Department of Agriculture (USDA). Nous avons identifié six (6) unités pédologiques (**Tableau 2**). Il s'agit des sols hydromorphes, sols ferrallitiques fortement désaturés sous forte pluviométrie, sols ferrugineux tropicaux, sols sur roches basiques et zone de cuirassement, sols ferrallitiques fortement désaturés sous pluviométrie atténuée et des sols ferrallitiques moyennement désaturés. Le positionnement des types de sol dans le triangle textural (**Figure 4**) a permis de rééchantillonner les classes texturales en tenant compte de la teneur en argile et en sable. Cette approche a permis l'identification de quatre (04) classes texturales du sol pour le bassin du Bandama : sandy clay ou sable argileux, loamy sand ou sable limoneux, clay loam ou argile sableuse, sandy loam ou limon sableux. La correspondance entre ces classes et les propriétés hydrodynamiques des sols est relative aux résultats des travaux de [23].

Tableau 2 : Composition granulométrique des sols du bassin

| TYPES DE SOL | % | % | % | Texture |
|---|-------|-------|--------|---------------------------------------|
| | Sable | Limon | Argile | |
| 01 Sols hydromorphes | 33,0 | 28,9 | 38,1 | Sandy-clay (Sable argileux) |
| 02 Sols ferrallitiques fortement désaturés sous forte pluviométrie ; Sols ferrugineux tropicaux | 87,1 | 6,9 | 6,0 | Loamy-sand (Sable limoneux) |
| 03 Sols sur roches basiques et zone de cuirassement | 20,6 | 48,0 | 31,4 | Clay-loam (Argile sableuse) |
| 04 Sols ferrallitiques fortement désaturés sous pluviométrie atténuée ; Sols ferrallitiques moyennement désaturés | 75,4 | 9,4 | 12,2 | Sandy-loam (Limon sableux) |

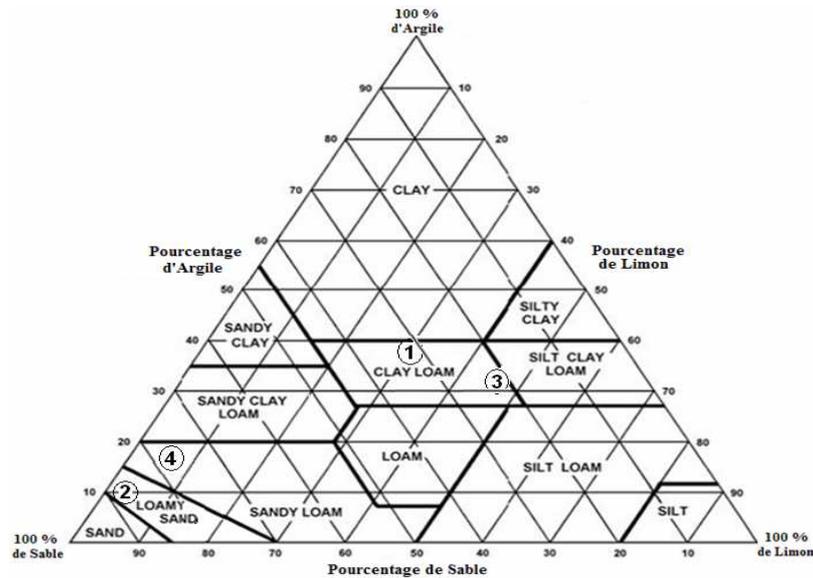


Figure 4 : Rééchantillonnage des sols du bassin à partir du triangle textural (USDA)

3-3-2. Détermination des Unités Hydrologiques Relativement Homogènes (UHRH)

Le concept de découpage spatial est généralement fondé sur des hypothèses liées à la compréhension des processus hydrologiques pour un espace donné. Le découpage spatial part des hypothèses suivantes selon *K. INDARTO* [24] :

- les processus hydrologiques sont constitués par l'ensemble de sous processus élémentaires : la précipitation, l'évaporation, le ruissellement, etc. ;
- ils sont des variables dans l'espace et dans le temps ;
- les résultats de calcul de chaque unité peuvent être agrégés pour obtenir une réponse globale.

Dans le cadre de cette étude, le découpage du bassin versant du Bandama en Unités Hydrologiques Relativement Homogènes (UHRH) est obtenu à partir de la structure interne d'écoulement. Une UHRH est définie comme la surface associée à un tronçon de rivière, pour laquelle la réponse hydrologique est supposée homogène [11,24].

3-3-3. Intégration des états de surface dans les UHRH

L'intégration des données d'occupation du sol et du type de sol au niveau des UHRH permet de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des états de surface qui influencent les processus hydrologiques. Sur les UHRH, le SIG PHYSITEL permet d'intégrer les variabilités spatiales des états de surface (couvert végétal, types de sol) de sorte que la simulation des processus hydrologiques nécessitant des informations sur l'occupation du sol et les types de sol, soit répétée pour chaque combinaison de sol et d'occupation du sol [25]. L'algorithme disponible dans le SIG PHYSITEL calcule le pourcentage de chaque classe d'occupation du sol et de type de sol à l'intérieur des UHRH. L'ensemble des données physiographiques structurées à l'intérieur des UHRH, constitue la base de données du bassin sur lequel on peut appliquer un modèle de simulation à base physique. Les paramètres hydrologiques affectés aux équations de ce type de modèle sont estimés en fonction des caractéristiques physiographiques du bassin repartis dans les UHRH.

3-3-4. Caractérisation des propriétés hydrauliques et des états physiologiques à l'intérieur des UHRH

Les classes d'occupation du sol définies dans les UHRH sont utilisées pour extraire les paramètres hydrologiques suivants : l'interception, les indices foliaires, la profondeur racinaire et la rugosité du milieu représentée par le coefficient de Manning. L'eau évaporée provient d'une zone de faible épaisseur en dessous de la surface, alors que l'eau transpirée provient d'une zone qui dépend de la profondeur racinaire et de la couverture végétale [26]. La perte d'eau par évapotranspiration dépend donc du taux de couverture végétale du sol et de la profondeur du système racinaire. La rugosité du milieu, c'est-à-dire son aptitude à produire un écoulement de surface est exprimée par le coefficient de Manning. La rugosité joue un rôle important dans la rétention de l'eau et le déclenchement du ruissellement. Elle dépend de la couverture du sol et du régime ou du type de l'écoulement [27]. La plupart de ces paramètres hydrologiques liés à l'occupation du sol sont estimés en fonction de la densité de végétation [18].

De même que les paramètres liés à l'occupation du sol, les paramètres hydrodynamiques des sols sont également pris en compte au cours de cette étude. Les paramètres hydrodynamiques correspondants aux types de sol du bassin versant du Bandama ont été obtenus à partir de leur texture (**Tableau 3**).

Tableau 3 : Propriétés hydrauliques des sols du bassin en fonction de leur texture [23]

| Nom textural | θ_s | θ_{cc} | θ_{pf} | K_s | ψ_s | γ | α |
|-----------------|------------|---------------|---------------|--------|----------|----------|----------|
| Sable limoneux | 0,401 | 0,125 | 0,055 | 0,0611 | 0,2058 | 0,553 | 6,0 |
| Limon sableux | 0,412 | 0,207 | 0,095 | 0,0259 | 0,3020 | 0,378 | 4,5 |
| Sable argileux | 0,432 | 0,336 | 0,208 | 0,0015 | 0,7033 | 0,177 | 1,5 |
| Argile sableuse | 0,321 | 0,339 | 0,239 | 0,0012 | 0,7948 | 0,223 | 1,0 |

θ_s est la teneur en eau à saturation (m^3/m^3), θ_{cc} la teneur en eau à la capacité au champ (m^3/m^3), θ_{pf} la teneur en eau au point de flétrissement permanent (m^3/m^3), K_s la conductivité hydraulique (m/h), ψ_s le potentiel matriciel à saturation (m), γ la distribution de la dimension des pores et α l'exposant pour l'évaluation du coefficient d'assèchement.

4. Résultats

4-1. Moteur des processus hydrologiques : la topographie du bassin versant

La carte des altitudes obtenues à partir du MNA, présente le bassin versant du Bandama comme une zone plane dont les altitudes varient de 0 à 846 m. Cependant, plus de 80 % du bassin a une altitude inférieure à 400 m (**Figure 5**).

Les pentes calculées à partir de ces altitudes ont été regroupées en quatre (4) classes (**Figure 6**), à savoir : les pentes faibles (0-2 %), les pentes moyennes (2-5 %), les pentes fortes (5-10 %) et les pentes très fortes (>10%).

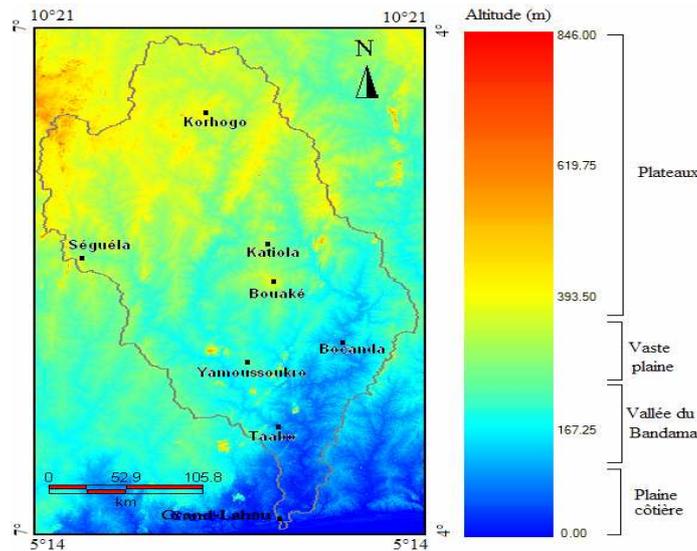


Figure 5 : Modèle Numérique d'Altitude du bassin versant du Bandama

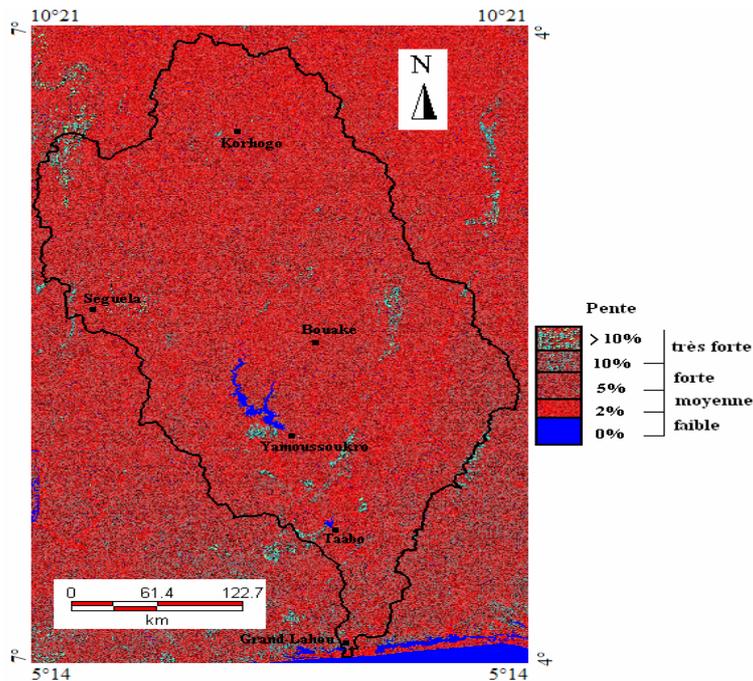


Figure 6 : Carte des pentes du bassin versant du Bandama

L'analyse de ces deux paramètres montre que le relief du bassin du Bandama est monotone (faible variation des altitudes et des pentes). Cette topographie douce du bassin rend les écoulements difficiles et favorise le stockage des eaux en surface [28]. Cependant, une étude approfondie des états de surface (occupation du sol, types de sols, etc.) s'avère aussi nécessaire pour déterminer de façon plus précise les ruissellements et les infiltrations dans le bassin versant. La carte des pentes pourra être prise aussi en compte lors de la réalisation de certains travaux tels que la construction de barrages ou de lacs collinaires au niveau du bassin versant. Pour cette étude, la carte des pentes a été utilisée pour tracer le « chemin de l'eau » dans le bassin versant du Bandama.

4-2. Structure interne d'écoulement du bassin versant

La **Figure 7** indique le bassin versant modélisé du Bandama, caractérisé par sa structure interne de l'écoulement, pouvant aller jusqu'au micro chevelu (thalwegs, fossés, ruisseaux, etc.) qui est le facteur contrôlant l'organisation superficielle du chemin de l'eau. Sur le bassin modélisé, nous pouvons augmenter les détails sur le réseau hydrographique en augmentant le nombre de drains. L'augmentation du nombre de drains permet d'affiner la structure interne d'écoulement.

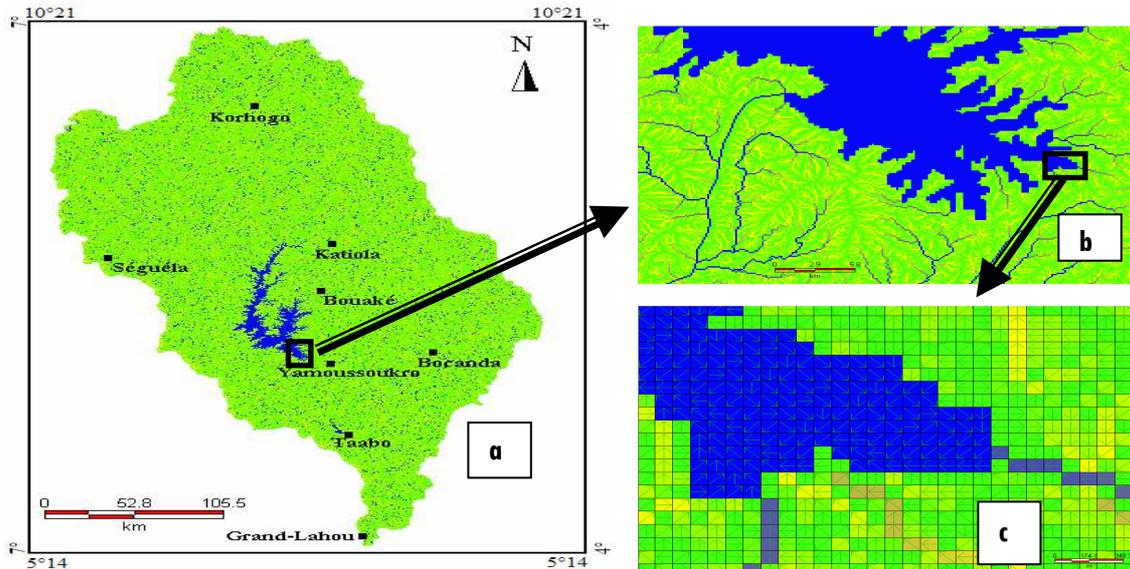


Figure 7 : Bassin versant modélisé du Bandama

4-3. Délimitation du bassin versant

Les limites du bassin versant calculées respectent la forme générale du bassin observé comme l'indique la **Figure 8**. Les bordures nord-ouest et sud-est sont restituées de manière satisfaisante. Les erreurs importantes concernent les bordures nord-est et surtout sud-ouest où se trouve l'exutoire.

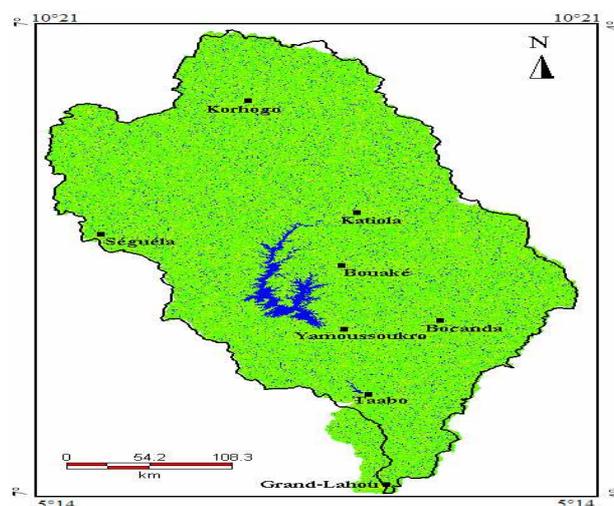


Figure 8 : Délimitation du bassin versant (contour réel en noir)

La superficie totale est obtenue en multipliant la superficie élémentaire d'une cellule (pixel : 90mX90m=8100 m²) par le nombre total de cellules (pixels) du bassin qui est de 12263767 après correction. La superficie calculée par le modèle est de 99336 km² contre 97000 km² pour le bassin topographique, soit une surestimation de 2,4 %. Cette bonne estimation des contours du bassin est due d'une part, à la bonne performance de PHYSITEL et d'autre part, à la bonne résolution du MNA utilisée (de l'ordre de 90 mètres). Les corrections effectuées sur les orientations des écoulements dans les zones de débordement (**Figure 9**) ont permis d'ajuster les contours modélisés aux contours topographiques du bassin. Les mailles ne faisant pas partie du bassin ont été réorientées vers l'extérieur.

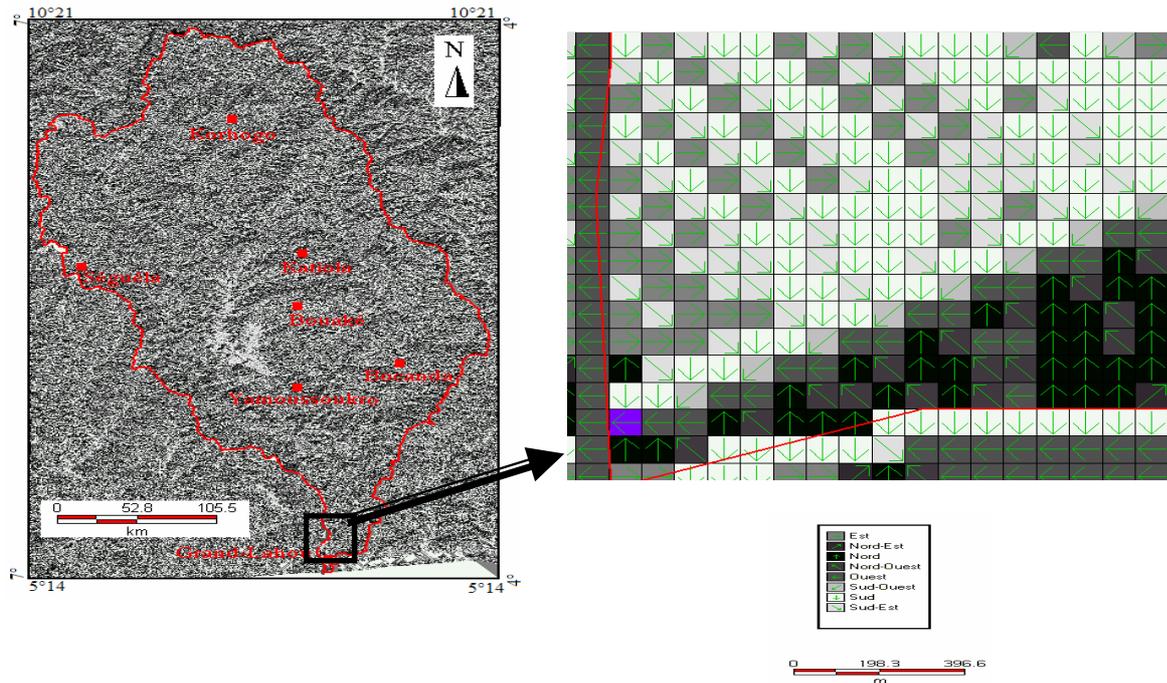


Figure 9 : Direction d'écoulement à l'intérieur chacune des mailles du bassin

4-4. Discrétisation spatiale du bassin versant

A partir du réseau hydrographique couplé au MNA, nous avons obtenu 7 827 zones hydrologiquement homogènes ou UHRH (**Figure 10**). Avec ces unités spatiales ou UHRH, nous obtenons une représentation fine de l'hydrosystème, siège de processus hydrologiques variés avec des interactions multiples et à la fois complexes. Cette manière de représenter l'hydrosystème est fondée sur le concept qui considère le bassin comme un ensemble de réservoirs interconnectés continuellement en évolution par rapport aux variables temps et espace [6]. Les paramètres liés aux états de surface doivent être déterminés et intégrés à ces UHRH afin de tenir compte de leur influence sur les processus hydrologiques.

Les processus hydrologiques peuvent être aussi influencés par l'occupation du territoire, c'est-à-dire par les types de végétation à la surface du sol, les types de sol, la présence de surfaces imperméables comme la roche dénudée, les routes, les zones urbaines ou industrielles. PHYSITEL calcule le pourcentage de chacune de ces classes d'occupation du territoire à l'intérieur de chacune des UHRH à partir des données de télédétection.

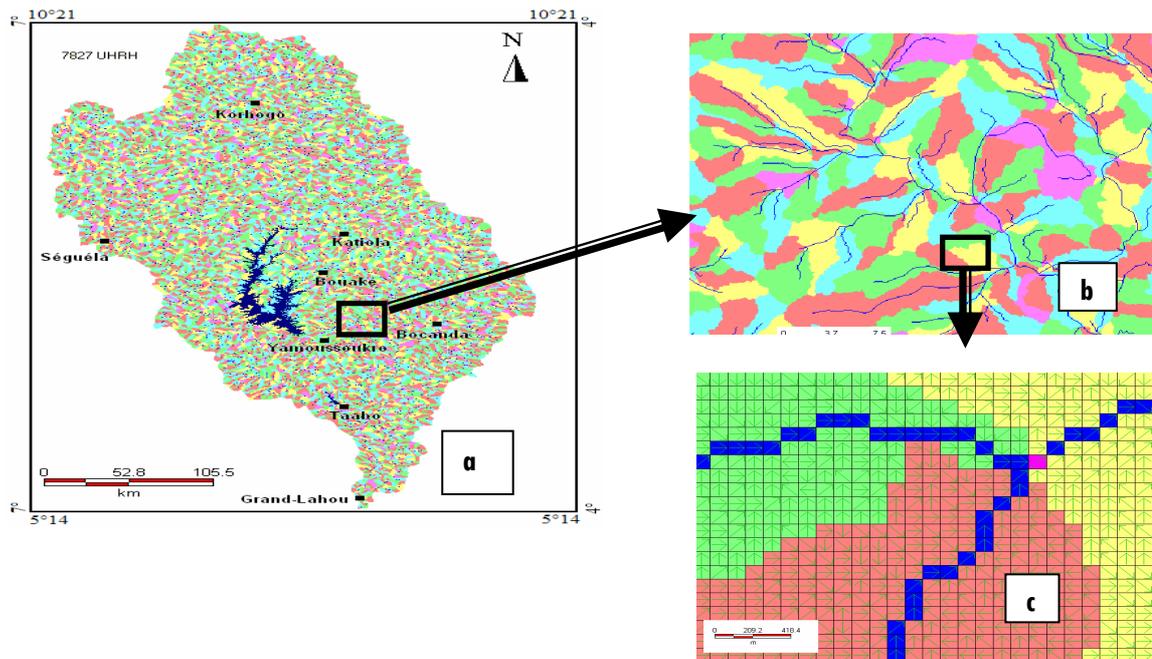


Figure 10 : Le bassin versant du Bandama subdivisé en unités hydrologiques relativement homogène (UHRH)

4-5. Description et estimation des paramètres hydrologiques liés aux états de surface

4-5-1. Paramètres liés à l'occupation du sol

La classification supervisée de l'image MODIS-NDVI du bassin versant du Bandama (*Figure 77*) donne cinq (5) classes d'occupation du sol : forêt dense (33,83 %), forêt claire et /ou savane arborée (boisée) (31,85 %), savane arbustive et/ou savane herbeuse (29,67 %), zones de cultures-sols nus-localités (2,47 %) et eau (2,17 %). Le domaine des forêts (forêt dense, forêt semi-décidue) occupe environ 15% du bassin tandis que les savanes et les zones anthropisées (la forêt claire, localités et les sols nus) couvrent environ 85% du bassin (*Tableau 4*).

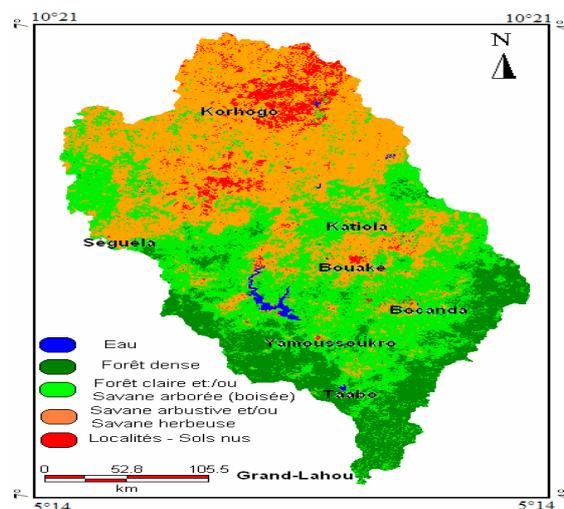


Figure 11 : Carte d'occupation du sol du bassin versant du Bandama en février 2006

Tableau 4 : *Pourcentage des classes d'occupation du sol du bassin versant du Bandama*

| Types d'occupation du sol | Pourcentage (%) |
|---|-----------------|
| Forêt dense | 33,83 |
| Forêt claire et /ou savane arborée (boisée) | 31,85 |
| Savane arbustive et/ou savane herbeuse | 29,67 |
| Sols nus- localités | 2,47 |
| Eau | 2,17 |

4-5-2. Évaluation de la classification

L'évaluation de la classification est analysée à partir de la matrice de confusion (*Tableau5*).

Tableau 5 : *Matrice de confusion*

| Classes | Forêt dense | Forêt claire | Savane arbustive | Sols nus | Eau |
|------------------|--------------|--------------|------------------|--------------|---------------|
| Forêt dense | 87,84 | 0,00 | 0,00 | 00,00 | 0,00 |
| Forêt claire | 12,16 | 63,72 | 7,88 | 1,89 | 0,00 |
| Savane arbustive | 0,00 | 36,28 | 78,33 | 13,21 | 0,00 |
| Sols nus | 0,00 | 0,00 | 13,30 | 84,91 | 0,00 |
| Eau | 0,00 | 0,00 | 0,49 | 0,00 | 100,00 |
| Total | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Ces résultats statistiques attestent que notre classification est satisfaisante, avec une précision globale de 82,07 %.

4-5-3. Paramètres liés aux types de sol

Le SIG PHYSITEL permet l'identification de quatre (04) classes texturales du sol pour le bassin du Bandama (*Figure 12*): sandy clay ou sable argileux (2 %), loamy sand ou sable limoneux (15 %), clay loam ou argile sableuse (8 %), sandy loam ou limon sableux (75 %). La correspondance entre ces classes et les propriétés hydrodynamiques des sols est relative aux résultats des travaux de *Rawls et Brankensiek* [23].

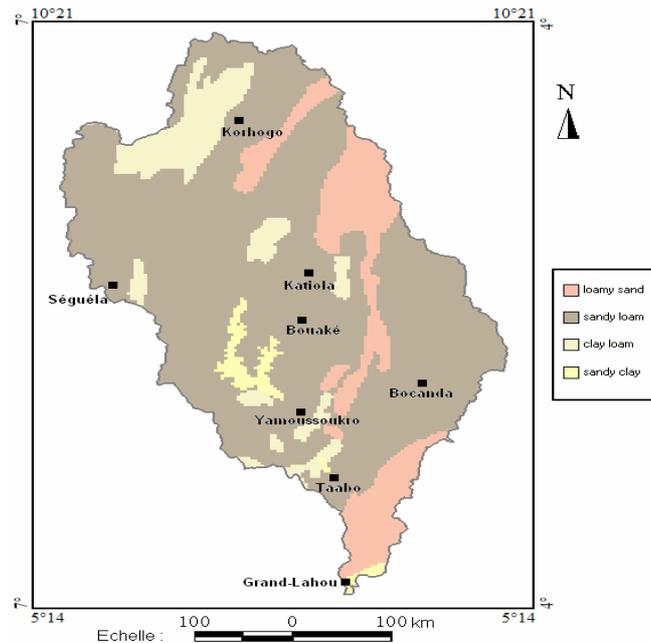


Figure 12 : Carte des classes texturales du sol

En effet, les résultats présentés par [29], sont relatifs à l'analyse statistique de données collectées sur 1323 sols avec 5350 horizons assemblées de 32 états américains. Ces résultats permettent d'estimer les propriétés hydrodynamiques des sols à partir de leurs caractéristiques physiques et du triangle de classification texturale USDA. D'après [29], ces résultats peuvent être utilisés pour étudier des modèles théoriques par comparaison avec un ensemble large de données expérimentales.

Ces paramètres sont utilisés par de nombreux modèles à base physique : KINEROS [30] ; STICS [31] ; HYDROTEL [5] pour l'estimation des paramètres physiques apparents et hydriques des sols.

4-5-4. Intégration de l'hétérogénéité des états de surface dans chaque UHRH

La prise en compte des états de surface est très importante dans la caractérisation du fonctionnement d'un hydrosystème. La base de données du bassin versant du Bandama est constituée de deux types de données : les données topographiques à savoir le MNA et les données issues des états de surface (occupation du sol, types de sol). Le croisement de ces données spatiales permet de prendre en compte l'influence des états de surface sur les processus hydrologiques au niveau de chaque UHRH.

4-5-4-1. Intégration des paramètres liés à l'occupation du sol à chaque UHRH

Le croisement des cartes d'occupation du sol et d'UHRH donne toujours 7 827 UHRH. En effet, PHYSITEL calcule à partir de la carte d'occupation du sol, le pourcentage de chaque type d'occupation du sol par UHRH. Les classes d'occupation varient d'une UHRH à l'autre comme l'indique la **Figure 13**. Sur le plan hydrologique, cela entraîne aussi une variabilité de la réponse hydrologique (ruissellement, infiltration, évapotranspiration, interception par la végétation, etc.) d'une UHRH à l'autre face à une averse. Le processus global est obtenu par agrégation des processus élémentaires sur chacune des unités. Cette structuration du bassin versant avant sa modélisation permet d'obtenir des résultats plus proches de la réalité [6,12,24].

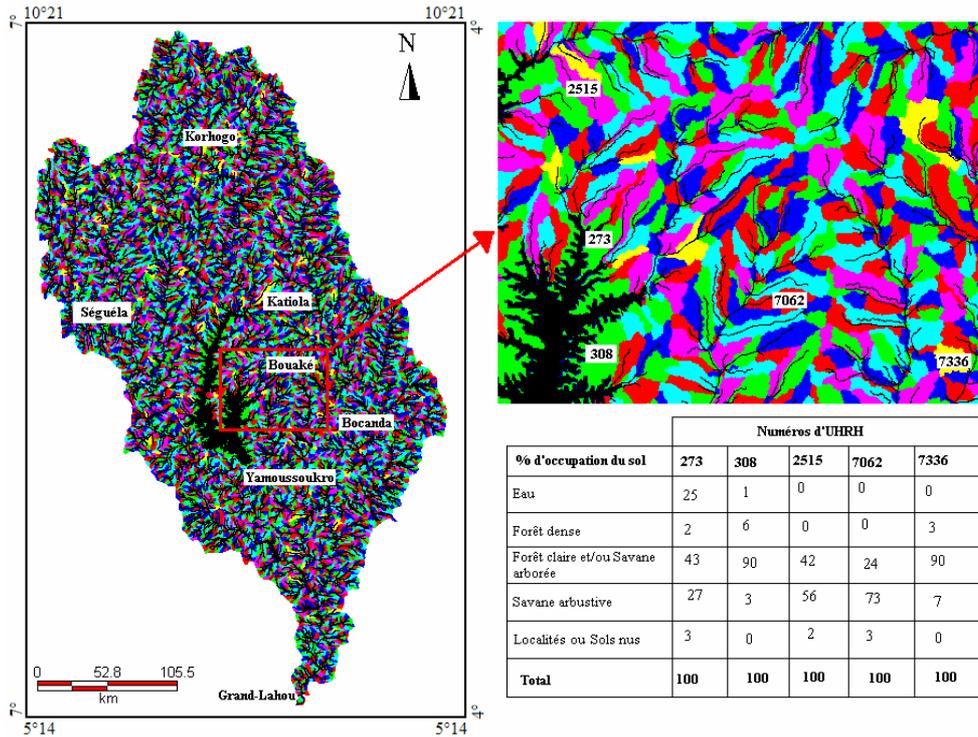


Figure 13 : Carte des UHRH intégrant les différents types d'occupation du sol

4-5-3-2. Intégration des paramètres liés aux types de sol à chaque UHRH

Dans un souci de simplification, le croisement des cartes texturales du sol et d'UHRH regroupe les UHRH en fonction de leur texture dominante et permet d'identifier les propriétés hydrauliques de chaque classe texturale.

La carte de texture des sols a été établie avec une résolution spatiale de 90 m pour la rendre cohérente à la maille de discrétisation physiographique à partir du MNA. Afin de simplifier les calculs, c'est la catégorie de sols dominants dans chaque UHRH qui est retenue et la variation de la texture en fonction de la profondeur n'est pas prise en compte. L'analyse des caractéristiques physiques des sols du bassin versant du Bandama indique quatre zones homogènes classées en fonction de leur capacité de rétention en eau (Figure 14). Les sols ayant une capacité très élevée de rétention en eau (sable argileux) apparaissent aux environs des lacs de Kossou et Taabo et les sols à capacité élevée de rétention en eau (argile sableuse) apparaissent en intrusion dans le bassin. Les sols à capacité faible (limon sableux) et très faible (sable limoneux) occupent le reste du bassin versant. Sur le plan hydrologique, cela entraîne des comportements différents face à une averse. Les sols susceptibles d'être vite saturés et de produire les ruissellements de surface après une averse sont les sols hydromorphes (sable argileux) et les argiles sableuses, tandis que les limons sableux et les sables limoneux sont les zones favorables à l'infiltration.

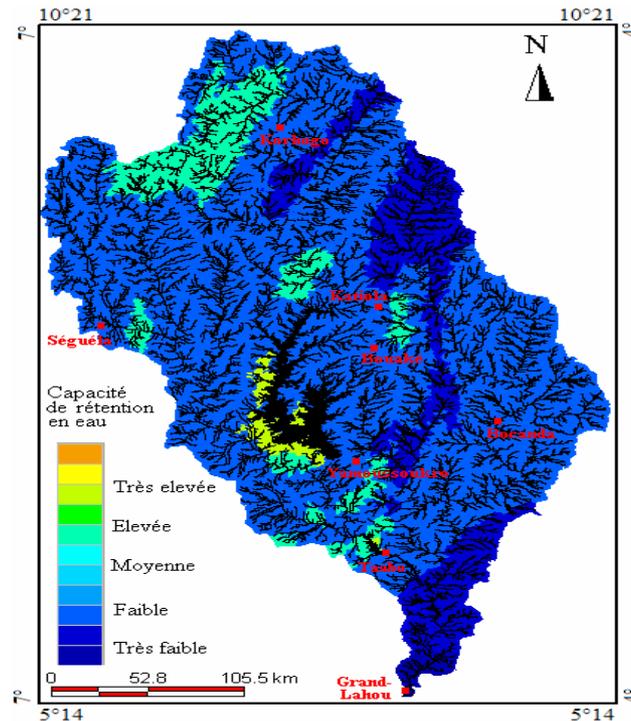


Figure 14 : Propriétés hydrauliques des sols par UHRH

5. Discussion

Le MNA est porteur de la morphologie du terrain sur ses grandes structures (crêtes, limites de bassin, direction des écoulements, réseau hydrographique). Il est beaucoup utilisé dans le domaine de l'hydrologie car il a les mêmes caractéristiques de précision, voire plus, que celle des cartes topographiques actuellement disponibles [11]. La plupart des modèles hydrologiques actuels de ruissellement utilisent le MNA pour décrire la morphologie des bassins : TOPMODEL [32] ; PHYSITEL [5] ; ANSWERS [33]. Cependant la précision des calculs dépend de la taille des cellules de la matrice du MNA. Plus la taille des cellules de la matrice est petite, plus les calculs s'affinent [34]. Ces erreurs, selon [35], sont dues vraisemblablement au nombre limité d'orientations des pentes (huit directions possibles) dans les mailles), mais aussi à la faible variation des altitudes dans cette zone (entre 0 et 400 m).

Le MNA utilisé dans le cadre de cette étude a une résolution spatiale de 90 m et une précision altimétrique de 16 m/10 m (absolu/ relatif), par rapport aux cartes topographiques disponible au centre de Cartographie et de Télédétection (CCT) de Côte d'Ivoire au 1/200 000 avec des courbes de niveau équidistantes de 40 m. Ce MNA a permis de définir les limites, le réseau de drainage, les pentes et le sens d'écoulement des eaux du bassin versant du Bandama. Par contre certaines structures telles que les rivières à méandres, les lacs et les réservoirs d'eau ne peuvent pas être identifiées à travers le MNA [11]. Pour faire face à cette difficulté, nous avons couplé le MNA au réseau hydrographique afin de mieux représenter ces structures dans le bassin versant.

L'intérêt des UHRH dans la compréhension des processus hydrologiques est double [12]. Premièrement, ces unités permettent de simplifier la représentation des caractéristiques physiographiques du bassin et de prendre en compte leur variabilité spatiale. Deuxièmement, les UHRH sont supposées générer différentes réponses hydrologiques dans le bassin versant. Le fonctionnement du bassin versant est donc assimilé à celui d'un ensemble de réservoirs interconnectés. C'est chaque unité et non plus l'ensemble du bassin qui

est représentée par un ensemble de réservoirs interconnectés, ce qui donne des résultats plus proches de la réalité [36]. *W. A. Flügel* [37] a utilisé cette approche pour simuler les processus hydrologiques dans le bassin de Bröl en Allemagne. Il précise que la variation de la dynamique des processus hydrologiques à l'intérieur d'une unité homogène peut être négligée par rapport à la variation d'une unité à une autre. Le découpage de l'espace en UHRH a été adopté dans les travaux de *K. F. Kouamé et al.* [6] et *K. Indarto* [24] respectivement dans les bassins versant de l'Orb en France et du N'zô en Côte d'Ivoire pour modéliser les écoulements de surface. Au Canada, l'étude hydrologique du bassin versant de la chaudière dans la province du Québec basée également sur ce concept, a été effectuée par [12]. Concernant les UHRH, quelques remarques peuvent être tirées : 1) la notion de taille des UHRH est arbitraire, 2) le nombre des UHRH est limité par la capacité de calcul du matériel informatique.

6. Conclusion

La problématique proposée au début de ce travail était de contribuer à la mise en place des éléments nécessaires à une modélisation hydrologique distribuée du bassin versant du Bandama à l'aide des données de télédétection et SIG. L'implantation d'un modèle distribué dans un bassin versant est précédée d'une étude approfondie des caractéristiques physiographiques et leur variabilité dans l'espace. L'étude approfondie des caractéristiques physiographiques du bassin versant du Bandama a permis de caractériser les Unités Hydrologiques Relativement Homogènes (UHRH) du bassin. Elles ont été obtenues par croisement des cartes thématiques établies et des données de télédétection. Ces unités permettent de caractériser les propriétés hydrauliques et les états physiologiques ainsi que leur variabilité spatiale dans le bassin versant.

Le complément logique à apporter à ce travail pour une bonne interprétation, voire une compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin du Bandama reste l'application d'un modèle de simulation et plus précisément le modèle HYDROTEL. Ce modèle utilise les UHRH comme unité de fonctionnement, auxquelles on affecte une pluie, une température, etc., pour simuler les processus hydrologiques.

Remerciements

L'acquisition des images satellitaires utilisées dans cette étude a été possible grâce à la collaboration de personnes étrangères via internet. Merci donc à Mr BRETT de la NASA pour sa disponibilité et ses conseils avisés depuis le téléchargement des images MODIS-NDVI jusqu'à leur traitement final. Merci également à Dr OUATTARA Adama du CURAT pour la programmation des algorithmes nécessaires à l'exploitation des images MODIS.

Références

- [1] - W. BEWKET and G. STERK, Dynamics in land cover and its effect on stream flow in Chemoga watershed, blue Nile basin, *Ethiopia. Hydrol. Proc.*, Vol. 19 (2005) 445-458.
- [2] - J. DUPONT, J. SMITZ, A.N. ROUSSEAU, A. MAILHOT et G. GANGBAZO, Utilisation des outils numériques d'aide à la décision pour la gestion de l'eau. *Revue des sciences de l'eau*, numéro spécial (1998) 5-18.
- [3] - V. P. SINGH and D.A. WOOLHISER, Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 7, N° 4 (2002) 270-292.

- [4] - EDIJATNO et C. MICHEL, Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La houille Blanche, No 2 (1989) 113-122.
- [5] - J. P. FORTIN, R. MOUSSA, C. BOUCQUILLON et J. P. VILLENEUVE, Hydrotel, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'informations géographiques. *Revue des sciences de l'eau*, N°8 (1995) 97-124.
- [6] - K. F. KOUAME, M. BERNIER, J. P FORTIN, R. LEFEBRE et J. BIEMI, Application du modèle hydrologique distribué 'HYDROTEL' à la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide : cas du bassin versant du N'zo en Côte d'Ivoire. 12è congrès de l'AQT, Chicoutimi (2005) 27.
- [7] - A. PIETRONIRO and R. LECONTE, A review of Canadian remote sensing and hydrology, 1999-2003, *Hydrological Processes*, vol. 19 (2005) 285-301.
- [8] - M. B. ABBOTT, J. C. BATHURST, J. A. CHUNGE, P.E. O'CONNELLE and J. RASMUNSEN, An introduction to the European Hydrological System « SHE-1 »: History and philosophy of a physically-based distributed modelling system. *J. Hydrol.* N° 87 (1986) 45-59.
- [9] - R. GRAYSON, I. Moore and T. Mc MAHON, Physically based hydrological modelling 1, A terrain based model for investigative purposes. *Water Resources Research*, Vol. 28, N°10 (1992) 2639-2658.
- [10] - K. J. BEVEN and M. J. KIRBY, A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, Vol. 24, N°1 (1979) 43-69.
- [11] - J. P. FORTIN, R. TURCOTTE, S. MASSICOTTE, R. MOUSSA, J. FITZBACK et J. P. VILLENEUVE, A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data: Application to Chaudière watershed. *Journal of hydrologic Engineering*, Vol. 6, N°2 (2001a) 100-108.
- [12] - J. P. FORTIN, R. TURCOTTE, S. MASSICOTTE, R. MOUSSA, J. FITZBACK et J. P. VILLENEUVE, A Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part 2: Application to the Chaudière watershed. *Journal of Hydrologic Engineering, American Society of Civil Engineering*, Vol. 6, N°2 (2001b) 100-108.
- [13] - G. C. ADON, K. F. KOUAME, B. H. KOUADIO, M. B. SALEY, A. M. KOUASSI, K. A. KOUAME, S. OULARE et J. P. JOURDA, Apports des données géospatiales et d'un modèle distribué à l'étude d'un hydrosystème à vocation agro-pastorale dans un contexte de récession pluviométrique en milieu tropical humide. Les XI^e journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF, Antananarivo du 3 au 7 novembre (2008) 113-116.
- [14] - H CAMUS, Hydrologie du Bandama, Tome 1, «Le Bandama blanc». Adiopodoumé : ORSTOM, (1972a) 96.
- [15] - H CAMUS. Hydrologie du Bandama, Tome 2, « Les affluents du Bandama blanc ». Adiopodoumé : ORSTOM, (1972 b) 96.
- [16] - P. CHEVALLIER, Simulation de pluie, télédétection, modélisation. Exemple de la Mare d'oursi, Burkina Faso, Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM, Colloques et Séminaires (1986) 90-104.
- [17] - A. CASENAVE et C. VALENTIN, Les états de surface de la zone sahélienne, influence sur l'infiltration. ORSTOM Ed. Coll. Didactiques, (1989) 226.
- [18] - C. PUECH, Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants. Application à des bassins en zone méditerranéenne et en zone tropicale sèche, Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, (1993) 214.
- [19] - C. PUECH, Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes. HDR, Mécanique des milieux, Géophysique et environnement, INP Grenoble (2000) 83.
- [20] - R. TURCOTTE, J. P. FORTIN, A. N. ROUSSEAU, S. MASSICOTTE et J. P. VILLENEUVE, Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *J. Hydrol*, Vol. 240, (2001) 225-242.

- [21] - J. ALBERGEL, P. RIBSTEIN, C. VALENTIN, L'infiltration : quels facteurs explicatifs ? Analyse des résultats acquis sur 48 parcelles soumises à des simulations de pluies au Burkina Faso. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM, Colloques et Séminaires, (1986) 25-48.
- [22] - A. PERRAUD, Les sols. In : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, N° 50 (1971) 269-374.
- [23] - W. RAWLS et D. BRAKENSIEK, Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: Morel-Seytoux (eds), *Unsaturated Flow in Hydrologic Modelling: Theory and Practice*, Kluwer Academic Publisher (1989) 275-300.
- [24] - K. INDARTO, Découpages spatiaux et conséquences sur le bilan hydrologique. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier (2002) 67-90.
- [25] - J. P. FORTIN et A. ROYER, Le modèle hydrologique HYDROTEL : bases théoriques. Manuel d'utilisation, Rapport INRS ETE (2004) 104.
- [26] - B. AMBROISE, Genèse des débits dans les petits bassins ruraux en milieu tempéré : Processus et facteurs. *Rev. Sc. Eau*, 4 (1998) 471-495.
- [27] - W. T. DICKINSON and R. P. RUDRA, The Guelph Model for Evaluating Effects of Agricultural Management Systems on Erosion and Sedimentation, user's manual version 3.01. School of Engineering., University of Guelph, Technical Report, (1990) 126-86.
- [28] - J. BIEMI Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Faculté des Sciences et Techniques, Université Nationale de Côte d'Ivoire, (1992) 493.
- [29] - W. J. RAWLS, D. L. BRAKENSIEK, and K. E. SAXTON, Estimation of soil water properties, *Trans. ASAE* 108 (1982) 1316-1320.
- [30] - D.A. WOOLHISER, R.E. SMITH and D.C. GOODRICH, KINEROS, a kinematic runoff and erosion model: Documentation and user manuel, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77 (1990) 130.
- [31] - N. BRISSON "Modèle de simulation de la culture du soja et de son fonctionnement hydrique : estimation agrométéorologique des potentialités de production." Thèse de Doctorat de l'Institut national agronomique. Paris-Grignon, (1989) 180.
- [32] - K. J. BEVEN, Chapter 18: "TOPMODEL" Computer models of watershed hydrology, Singh V. P., ed., *Water resources publication*, Littleton, Colo, (1995).
- [33] - R. D. CONNOLLY, D. M. SILBURN and C. A. A. CIESIOLKA, Distributed parameter hydrology model (ANSWERS) applied to a range of catchment scales using simulator data, Application to a spatially complex catchment. *Journal of Hydrology*, vol. 193 (1997) 183-203.
- [34] - D. MAIDMENT, GIS and Hydrologic Modelling, In *Environmental Modelling with GIS*, Oxford University Press (1993) 147-167.
- [35] - P. PEREZ, D. URVOIX et M. ARMAND, in : CEMAGREF, ENGREF. Télédétection et gestion des ressources en eau, *Communications*. Montpellier: CEMAGREF, Atelier international (29-11-1995/01-12-1995) 18.
- [36] - B. AMBROISE, Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré, processus et modèles. Séminaire du Conseil Scientifique du Département « Science du sol » de l'INRA, 26-27/03/91.
- [37] - W. A. FLÜGEL, Application of GIS to derive Hydrological Response Units for hydrological modelling in the Brol catchment, Germany: Application of Geographic Information Systems in hydrology and water resources management, IAHS Publication, N° 235, (1996) 431-420.