

Modélisation et simulation des écoulements de surface dans le bassin versant du Bandama blanc : utilisation d'un modèle distribué (HYDROTEL)

[Modeling and simulation of surface runoff in the watershed of the White Bandama: using a distributed model (HYDROTEL)]

Matta Amessan, Fernad Kouamé, Théophile Lasm, Bi V. H. N'guessan, Kouamé Aka, and Jean Biémi

UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM),
Université Felix Houphouet Boigny, Côte d'Ivoire

Copyright © 2014 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The objective of this study is to better understand the functioning of a river system in the context of sustainable management of water resources. To better understand this functioning, hydrogeological modelling of the watershed of White Bandama is necessary. The methodological approach is derived from a process comprising two steps. The results are derived from a process comprising two steps. The first step consists in the mapping of the physical descriptors of the watershed that affect hydrological processes, such as topography, drainage patterns, land cover and soil type. Using PHYSITEL and a Digital Elevation Model (DEM), slope and orientation maps of the facets are derived and then coupled to the water system for the characterization of the internal hydrographic structure of the watershed. Supervised classification of Landsat TM dating from 1987 to 1993 led to the mapping of land use. The second step consists in combination of established thematic maps. The combination of these thematic maps is used to determine with HYDROTEL the dominant type of soil and land use by Relatively Homogeneous Hydrological Units (RHHU) representing small sub-watersheds.

KEYWORDS: Hydrotel, White Bandama River, Remote sensing, Physitel.

RESUME: L'objectif de cette étude est de mieux comprendre le fonctionnement d'un hydrosystème dans le contexte d'une gestion durable des ressources en eau. Pour mieux comprendre le fonctionnement d'un hydrosystème et dans le contexte d'une gestion durable des ressources en eau la modélisation hydrogéologique du bassin versant du Bandama Blanc s'avère nécessaire. L'approche méthodologique dérive d'une démarche comportant 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 modèle 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. La classification supervisée des images satellitaires Landsat TM datant de 1987 à 1993 ans permet de produire des cartes d'occupation du sol. La deuxième 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 Unités Hydrologiques Relativement Homogènes (UHRH) représentant de petits sous bassins versants, utilisés comme unités de simulations des processus hydrologiques sous HYDROTEL.

MOTS-CLEFS: Hydrotel, Bandama Blanc, télédétection, Physitel.

1 INTRODUCTION

L'évaluation et la gestion efficace des ressources en eau d'un territoire requièrent une connaissance approfondie des processus hydrologiques mis en jeu ainsi que de leurs échelles de temps et d'espace particulières [29]. L'utilisation des outils numériques d'aide à la décision est devenue incontournable car ils permettent d'intégrer des données multi-sources et de faire des analyses pouvant tenir compte de contraintes très diversifiées pour une optimisation de la gestion des eaux [7]. Parmi ces outils, les modèles hydrologiques occupent une place de choix dans la compréhension des processus et des interactions dynamiques entre les paramètres environnementaux et physiographiques qui interviennent dans un hydrosystème.

Au cours de ces dernières décennies, l'usage des modèles mathématiques est devenu courant dans le développement et la gestion des ressources en eau. Ces modèles informatisés étaient essentiellement globaux, en ce sens que les bassins pour lesquels les débits étaient simulés étaient considérés comme un tout non subdivisé. Ces derniers présentent l'avantage de pouvoir prendre en compte la répartition des caractéristiques du milieu (topographie, catégorie d'occupation des terres, textures des sols, etc.). En effet, les processus hydrologiques sont fonction des états de surface ainsi que du climat et ils évoluent aussi bien dans l'espace que dans le temps. Pour décrire le milieu, l'intégration des données géospatiales provenant de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) a contribué au développement de certains modèles hydrologiques et à l'adaptation de modèles préexistants par l'exploitation efficace des informations dérivées.

Les SIG permettent le traitement, l'analyse des données et la production de cartes thématiques permettant de décrire les caractéristiques physiographiques, comme la topographie, les sols, la lithologie etc. Ces informations géospatiales permettent de faire une représentation réaliste des hydrosystèmes. L'intérêt évident des techniques spatiales (télédétection et SIG) pour l'amélioration de la capacité des modèles hydrologiques distribués justifie leur utilisation en synergie dans ce travail. Cependant, le choix du modèle dépend des données d'entrée disponibles, des composantes représentées et de l'échelle spatio-temporelle de modélisation. De plus, les processus hydrologiques sont modélisés par des équations qui assurent la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Ces modèles qui font appel à un nombre important de variables, sont généralement applicables à des bassins bien instrumentés ayant des données d'entrée à grande échelle.

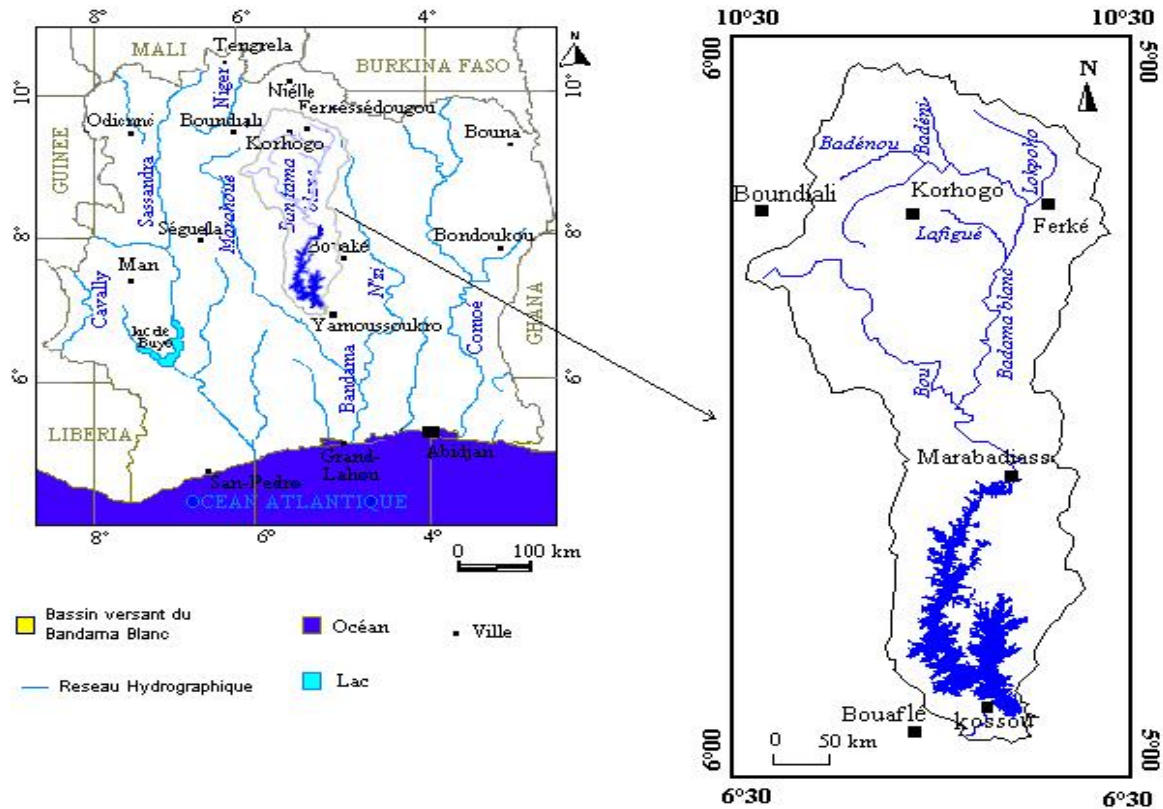
Les modèles hydrologiques distribués comme ANSWERS [6], TOPMODEL [3], CEQUEAU [22] et HYDROTEL [8], [10] offrent un bon compromis pour l'exploitation des données disponibles et présentent la particularité de pouvoir s'appliquer à une gamme variée de bassins. Dans cet article, on présente la modélisation hydrologique du bassin versant du Bandama Blanc à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Cet hydrosystème a un climat de type tropical humide.

À l'instar des régions d'Afrique de l'Ouest et Centrale [16], [25], [19], la Côte d'Ivoire a été affectée par la sécheresse persistante et sévère de 1970 à 1990 [28], [2]. Cette sécheresse sans équivalent dans le monde, qui s'est prolongée jusqu'en 2002 au Sahel [20], a eu un impact sur les ressources en eau [27], [17], [11] et influencé les modifications environnementales [5], [4] dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Dans ce contexte de variabilité climatique et de mutation environnementale, une évaluation du potentiel hydrique s'avère nécessaire dans l'optique d'une Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE). L'intégration des techniques spatiales (télédétection et SIG) permet une représentation et une description des processus hydrologiques. Aussi, la prise en compte des variables hydrométéorologiques permettent la simulation des écoulements des eaux dans l'hydrosystème du Bandama Blanc. Le modèle hydrologique HYDROTEL, qui a montré son potentiel en simulation et en prévision hydrologiques sur des bassins versants au Canada [10] en France, et dans les bassins du N'zo [18], [1] pourrait être adapté pour la modélisation du bassin versant du Bandama Blanc afin :

- 1) de tester son applicabilité en milieu tropical humide ;
- 2) d'établir une base de données physiographique du bassin ;
- 3) de simuler les écoulements superficiels des eaux.

2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin du Bandama blanc (figure 1), objet de cette étude, s'étend du Nord au Centre de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 6°30' et 10°30' Nord et les longitudes 5°00' et 6°00' Ouest. Il a une forme rectangulaire et une superficie de 34059 Km². Ce bassin est un affluent du Bandama qui a une longueur de 1050 km. Le Bandama est le seul parmi tous les grands fleuves de la Côte d'Ivoire dont le bassin versant est entièrement en territoire ivoirien. Le Bassin du Bandama Blanc 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).



3 DONNÉES ET MATÉRIELS

3.1 DONNÉES

3.1.1 DONNÉES GÉOSPATIALES

- **Modèle Numérique d'Altitude (MNA)**

Le Modèle Numérique d'Altitude (MNA) du bassin versant du Bandama blanc est fourni par le site américain « <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3/Africa> ». Ces données ont été recueillies par la navette spatiale américaine Endeavour, au cours d'une mission d'une dizaine de jours (11/02/2000 – 22/02/2000), en format Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Le traitement des données par interférométrie radar a permis de générer les MNA de résolution spatiale de 90 m, avec une précision altimétrique de 16 m/10 m (absolu/relatif). La couverture du bassin versant a nécessité douze (12) fichiers SRTM allant du 5° au 6° longitude Ouest, et du 6°30 au 10°30 latitude Nord.

- **Images satellitaires**

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

Tableau II: 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.

- **Données de texture du sol**

Pour l'établissement de la carte texturale du sol du bassin versant du Bandama Blanc nous avons utilisé les cartes pédologiques aux 1/500 000 du Nord-Est, du Nord-Ouest, du Sud-Est et du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire réalisées par [24].

- **Réseau hydrographique**

Pour la numérisation du réseau hydrographique de la zone d'étude nous avons utilisé des cartes topographiques du Sud-Est, Sud-Ouest, Nord-Est, et du 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.

3.1.2 DONNÉES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES

Pour prendre en compte les variabilités spatiale et temporelle du climat, les données hydrométéorologiques, au pas de temps journalier, recueillies *in situ* de 1996 à 2000 sont utilisées :

- Les données météorologiques (pluies, températures), sont mises à notre disposition par La SODEXAM. Ces données pluviométriques concernent les précipitations mesurées aux différentes stations de jaugeage (figure 2) ;
- Les données Hydrométriques utilisées dans le cadre de ce travail, concernant les débits Journaliers mesurés aux différentes stations de jaugeage (figure 2) au cours de la période 1996-2000. Les données peuvent être utilisées pour mener une bonne étude puisqu'elles sont continues et couvrent l'ensemble du bassin, d'amont en aval.

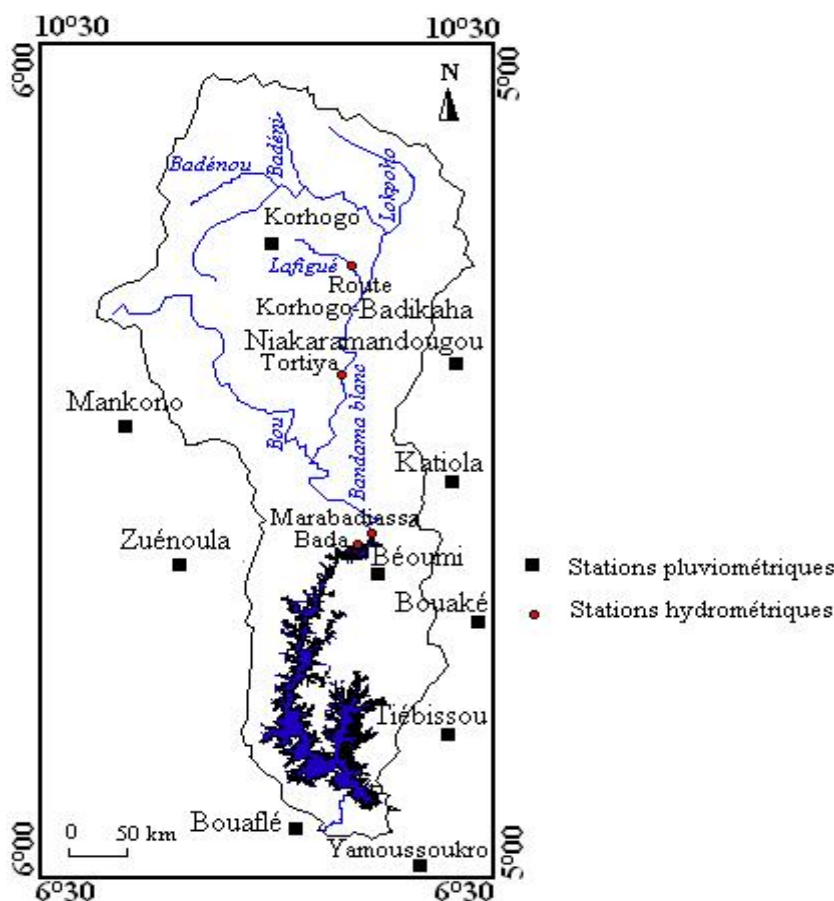


Fig 2. Carte de répartition des stations pluviométriques et hydrométriques du bassin versant du Bandama Blanc

3.2 MATÉRIELS INFORMATIQUES ET LOGICIELS

Les matériels informatiques concernent principalement :

- Le logiciel **MapInfo professionnel 7.5** a servi à la cartographie des types de sol, la numérisation et la correction du réseau hydrographique.
- Le logiciel **ENVI 4.3** a été utilisé pour effectuer la mosaïque des fichiers MNA et le traitement de l'image Landsat TM.
- Le logiciel **PCI Works V7.0** a servi à convertir des fichiers (MNA, Carte d'occupation du sol) en format compatible à PHYSITEL.
- Le logiciel **PHYSITEL (Version 3.0)** a servi à déterminer la structure d'écoulement du bassin versant, à structurer les données d'occupation du sol et des types de sol, et à construire les fichiers relatifs à la base de données descriptives du bassin pour HYDROTEL.
- Le logiciel **HYDROTEL** permet de simuler les écoulements des eaux en mode continu.

3.3 CALAGE ET VALIDATION D'UN MODELE HYDROLOGIQUE

Le calage consiste à ajuster les valeurs numériques attribuées aux paramètres du modèle pour reproduire au mieux la réponse observée. C'est le processus de choix de jeux de valeurs des paramètres. Cette opération peut se faire par une procédure essai et erreur, ou automatiquement par une procédure d'optimisation en cherchant la valeur optimale d'un critère donné (communément appelé fonction objective) qui améliore la cohérence entre la réponse observée et simulée du bassin. Une fois un modèle hydrologique distribué implanté sur un bassin versant donné, se pose ensuite la question de savoir quelle est la capacité du modèle à simuler le présent ou le futur ? C'est l'étape de la validation qui doit répondre à cette question. Cette étape consiste à vérifier la reproductibilité des résultats par le modèle et la représentativité des paramètres calés. Son principe est de tester le modèle sur une série de données non utilisées dans la phase de calage.

4 RÉSULTATS

4.1 CALAGE

L'analyse numérique du degré d'ajustement entre les valeurs observées et simulées pendant le calage et la validation du modèle s'est effectuée à travers le critère de Nash, la RCEQM et l'Ecart en Volume.

4.1.1 RÉSULTATS DU CALAGE (ANNÉE 1996)

- **Station de Korhogo/Badikaha**

Les résultats du calage à la station de Korhogo/Badikaha (figure 3a) montrent que les débits journaliers simulés concordent assez bien avec les débits journaliers observés. Le critère de Nash qui est de 0,92 indique que le calage est satisfaisant. Les périodes de crue (août-octobre) et de décrue (novembre) sont bien simulées à l'exception de la crue observée à la mi Novembre et qui n'a pu être représentée. A la période d'étiage (juin juillet) on note une surestimation des débits simulés qui s'explique à travers le critère de l'EV qui est de -4,7%. Enfin, le critère de la RCEQM (0,25) donne une évaluation globale des processus modélisés.

- **Station de Tortiya**

Les résultats du calage à la station de Tortiya (figure 3b) montrent que les débits journaliers simulés concordent assez bien avec les débits journaliers observés. Le critère de Nash (0,78) indique que le calage est satisfaisant. Ce dernier a été amélioré par les calages effectués sur la station effectuée en amont (Korhogo/Badikaha). Ainsi, les paramètres de modélisation utilisés (BV3C, Interpolation des données météorologiques...) peuvent être retenus pour expliquer le fonctionnement global de l'Hydrosystème du Bandama blanc. Toutefois on note une surestimation des débits en période d'étiage (avril à Mars) se traduisant par la supériorité des lames d'eau simulées (337,93 mm) sur les lames d'eau observées (285,52mm). Enfin les critères de la RCEQM et de l'EV sont respectivement de 2,54 et de -4,9%.

- **Station de Marabadiassa**

Au niveau de la station de Marabadiassa (figure 3c), on a une bonne concordance des courbes simulées et observées, avec une légère surestimation des pics. Le critère de Nash est de 0,81 preuve d'un calage satisfaisant. La grande différence entre les lames d'eau observées et simulées est due à la surestimation des débits en période d'étiage et de décrue. Le critère de Nash a été amélioré par les calages effectués sur les stations situées en amont. Le critère de l'EV donne -8,35% preuve d'une légère surestimation des débits en période d'étiage enfin le critère de la RCEQM est de 4,1.

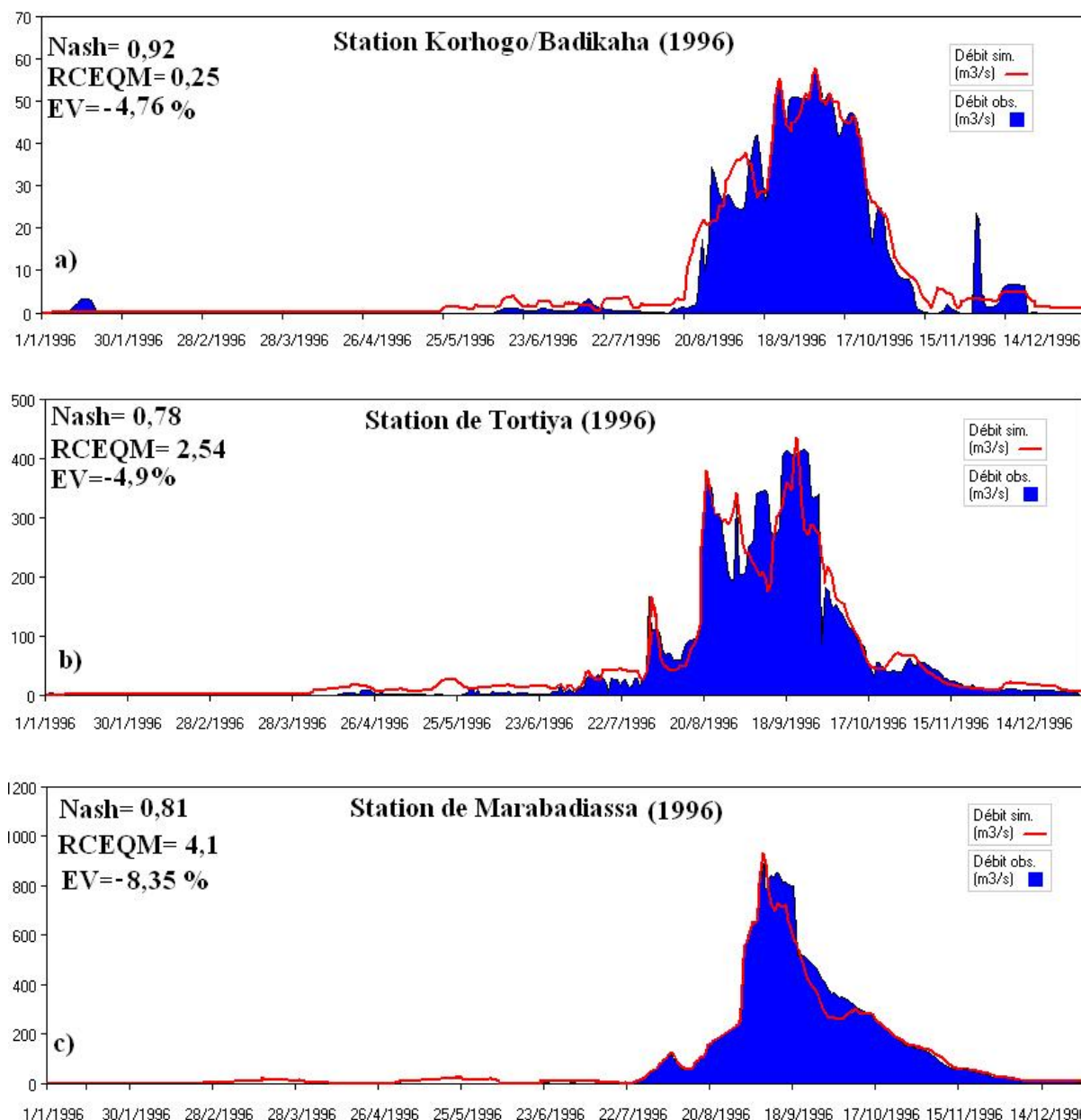


Fig 3. Débits simulés et observés pour le calage du modèle (1996) ; a) station de Korhogo/Badikaha, b) station de Tortiya c) station de Marabadiassa

L'analyse numérique et graphique des résultats du calage du modèle HYDROTEL pour l'année 1996 montre que les débits journaliers simulés concordent assez bien avec les débits journaliers observés aux stations de calage. Le synchronisme entre débits observés et simulés est respecté. Cependant, on note une surestimation ou une sous estimation des débits simulés en période d'étiage et de décrue, qui s'explique par la supériorité des lames d'eau simulées par rapport aux lames d'eau observées. Le critère de Nash indique que le calage est satisfaisant avec des valeurs qui oscillent entre 0,78 et 0,90. Ainsi, les paramètres de modélisation utilisés peuvent être retenus pour expliquer le fonctionnement global de l'hydrosystème du Banadama Blanc.

4.2 RESULTATS DE LA VALIDATION TEMPORELLE (ANNEES 1997 ET 1999)

La validation temporelle est faite sur deux périodes (années 1997 et 1999) selon les mêmes jeux de paramètres utilisés pour la calibration du modèle en 1996.

• Validation temporelle pour l'année 1997

L'analyse graphique de la station de Korhogo/Badikaha (figure 4a) nous montre que les allures des courbes simulée et observée sont assez synchrones avec un critère de Nash égal à 0,88. On note cependant une surestimation des débits sur une partie du cycle (juin à juillet). La crue qui est observée dans le mois de décembre n'est pas représentée. Ces écarts semblent être dus à un problème d'extrapolation des paramètres de calages (BV3C, Interpolation des données météorologiques...). Ils peuvent aussi révéler l'incapacité du réseau de mesure de précipitation à suivre leur répartition temporelle sur ce sous bassin. Les critères de la RCEQM et de l'EV sont respectivement de 0,36 et de -6,77% preuve d'une assez bonne simulation.

La station de Tortiya (figure 4b) présente une simulation moyennement satisfaisante avec un Nash de 0,80. L'analyse du graphique de cette station fait apparaître une période d'étiage (mai à Juin) caractérisée par une surestimation des débits simulés. Cette surestimation est due à l'évolution dans le temps des caractéristiques internes du bassin, notamment l'humidité dans les différentes couches du sol et la saturation après un épisode pluvieux comme ce fut le cas dans le bassin du N'zo. Les critères de la RCEQM et de l'EV sont respectivement de 3,98 et de -5,44%.

La station de Marabadiassa (figure 4c) montre un léger décalage entre les débits observés et simulés: les pics simulés apparaissent après les pics observés. La période d'étiage (mai à juin) est caractérisée par une surestimation des débits.

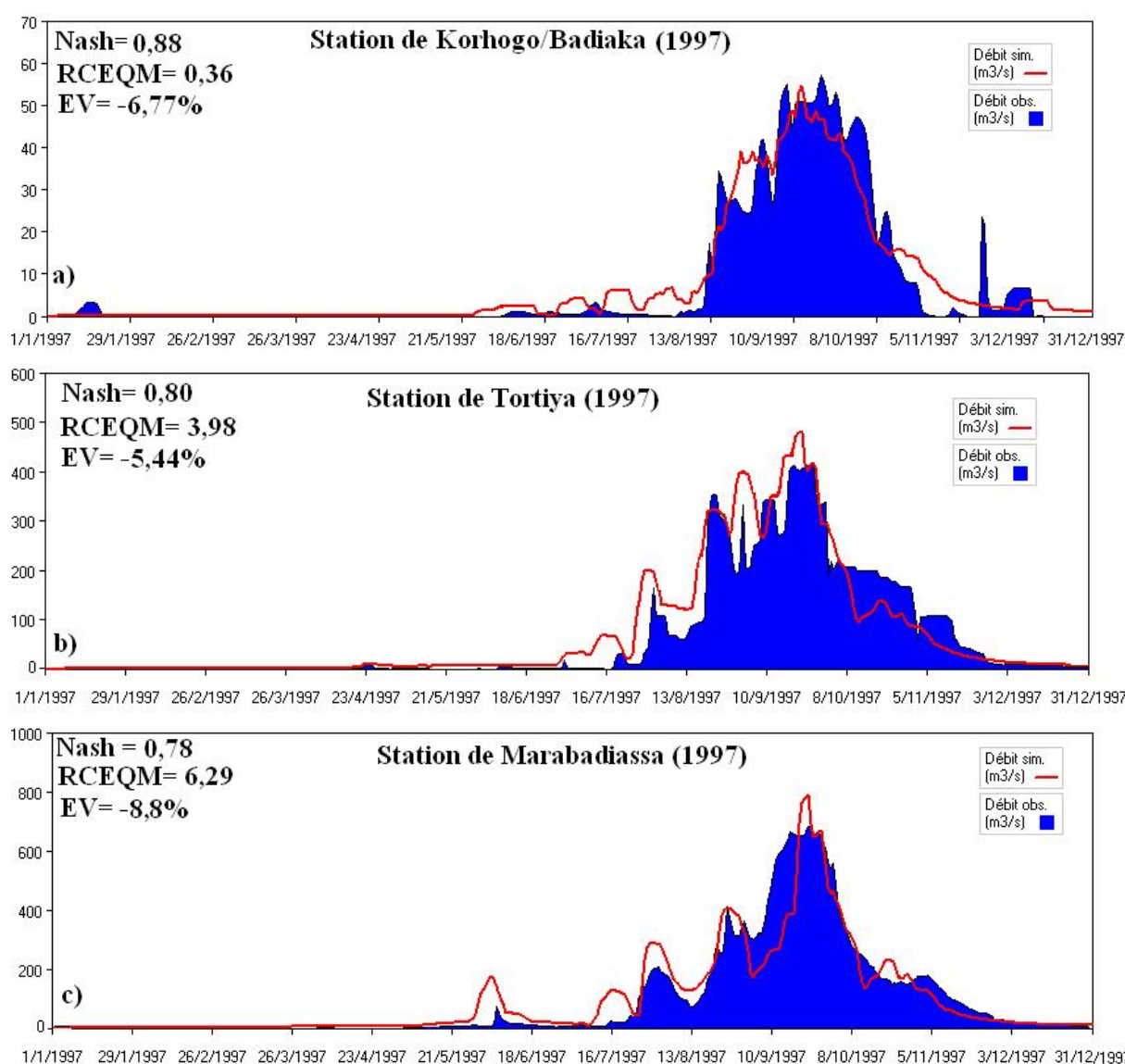


Fig. 4 Débits simulés et observés pour la validation (1997) ; a) station de Korhogo/Badikaha, b) station de Marabadiassa, c) station de Tortiya

• Validation temporelle pour l'année 1999

La validation temporelle du modèle pour l'année 1999, donne un meilleur résultat de simulation pour la station de Korhogo/Badikaha (figure 5a) avec un critère de Nash de 0,80.

On observe une bonne reproduction des hydrogrammes. La simulation des écoulements à la station de Korhogo/Badikaha permet de reproduire de façon satisfaisante l'écoulement de l'eau et de suivre le fonctionnement du bassin à long terme. Il apparaît donc que le modèle HYDROTEL produit des simulations satisfaisantes malgré les écarts observés au début de la saison pluvieuse (Juin).

La station de Tortiya (figure 5b) a un Nash égale à 0,76. On note un bon synchronisme entre les débits simulés et observés, toute fois, en période d'étiage (mars et mai) il y'a une surestimation des débits simulés. Le problème de cette station réside en période de décrue (novembre) où l'on note une mauvaise simulation de l'écoulement.

A la station de Marabadiassa (figure 5c) on note un assez bon synchronisme entre les débits simulés et observés avec un critère de Nash égale à 0,76. En période d'étiage (février à avril), on note une surestimation des débits simulés.

Les tableaux VI et VII présentent respectivement les valeurs des différents paramètres calés au niveau des stations hydrométriques du Bandama Blanc et les critères de Nash, les EV et les RCEQM des différentes années de simulation. Ces paramètres du modèle utilisé lors du calage peuvent être retenus pour expliquer le fonctionnement global de l'hydrosystème du Bandama Blanc. Ainsi, l'un des atouts de la modélisation mathématique des bassins versants est sans nul doute la possibilité de comprendre le fonctionnement des hydrosystèmes ([8],[9]).

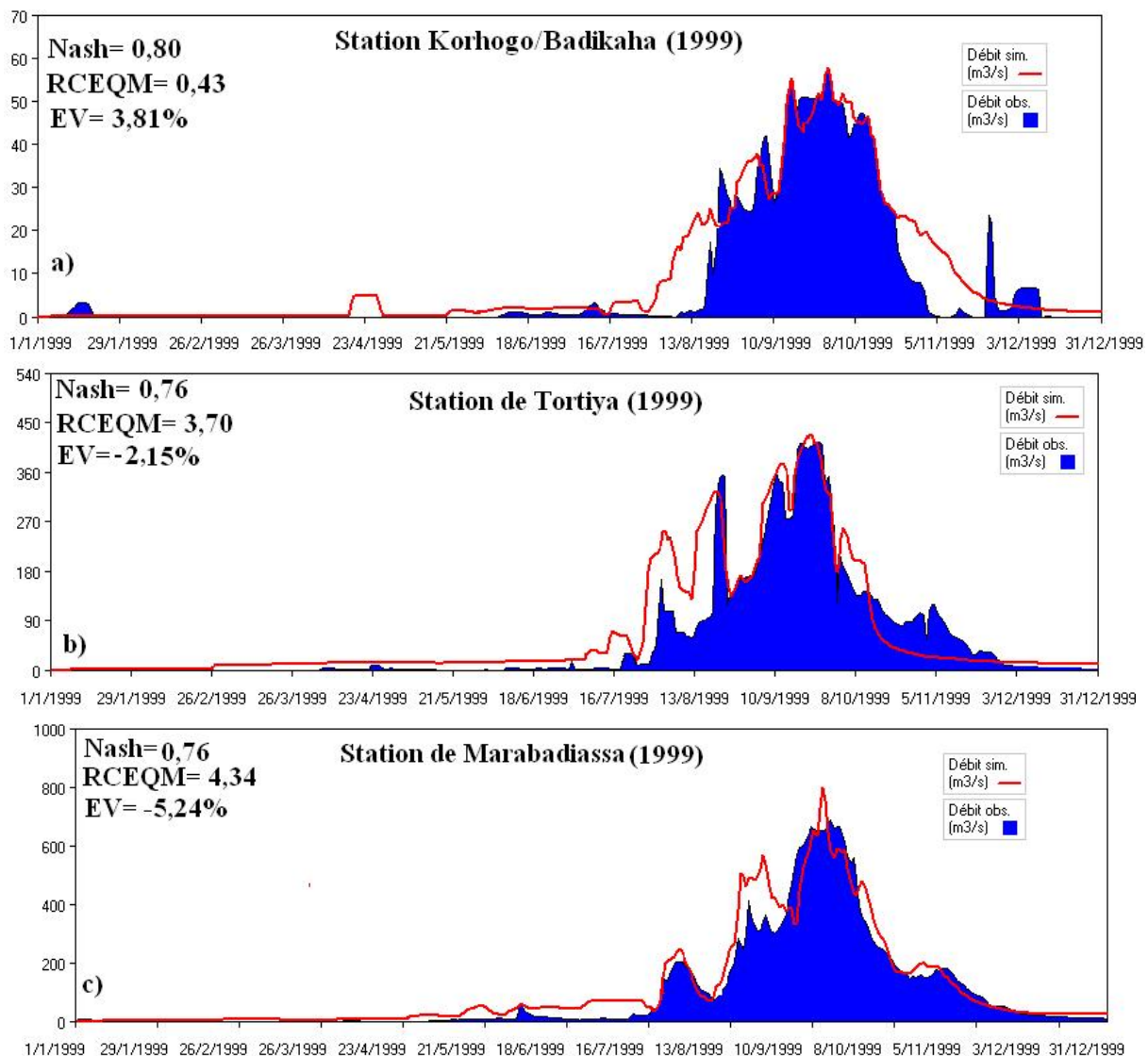


Fig. 5. Débits simulés et observés pour la validation (1999) ; a) station de Korhogo/Badikaha, b) station de Tortiya, c) station de Marabadiassa

Tableau 1. Valeurs principales des paramètres calés des sous-bassins du Bandama Blanc

Paramètres à caler	Korhogo/ Badikaha	Tortiya	Marabadiassa
Paramètres du Bilan Vertical à 3 Couches (BV3C)			
Humidité relative initiale			
- Couche 1 (%)	0,1	0,1	0,1
- Couche 2 (%)	0,2	0,2	0,2
- Couche 3 (%)	0,4	0,4	0,4
Profondeur de couche			
- Couche 1 (m)	0,75	1,25	1,25
- Couche 2 (m)	1,25	2,75	3
- Couche 3 (m)	1,75	5	4
Coefficient de récession (m/h)	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$
Hydrogramme GéoMorphologique (HGM)			
- lame référence (m)	0,000002	0,000002	0,000002
Coefficient de Manning			
- Milieux forestiers	0,2	0,2	0,2
- Eau	0,01	0,01	0,01
- Autres milieux	0,15	0,15	0,15

Tableau 2. Résultats du calage et de la validation du modèle

	Korhogo/ Badikaha	Tortiya	Marabadiassa
Critère de Nash (1996)	0,92	0,78	0,81
Critère de Nash (1997)	0,88	0,80	0,78
Critère de Nash (1999)	0,80	0,76	0,76
Critère de RCEQM (1996)	0,25	2,54	4,1
Critère de RCEQM (1997)	0,36	3,98	3,70
Critère de RCEQM (1999)	0,43	3,70	4,34
Critère d'EV (%) (1996)	-4,76	-32,49	-18,35
Critère d'EV (%) (1997)	-16,77	-35,44	-12,88
Critère d'EV (%) (1999)	3,81	-29,15	-5,24

4.3 INTERPRETATIONS DES RESULTATS DE LA SIMULATION DES ECOULEMENTS

L'analyse des résultats de simulations (calage et validation) nous donne matière à réflexion sur différents points, à savoir : les causes d'une mauvaise estimation (surestimation et/ou sous estimation) des pics et d'une surestimation des débits en périodes d'étiages qui s'observent sur les différentes stations hydrométriques du Bandama Blanc ; mais aussi des problèmes de simulation dans le temps pour les stations de Marabadiassa, de Tortiya et Korhogo/Badikaha (1997 et 1999).

Selon une étude réalisée par [15], sur les sources d'incertitudes concernant l'application de modèles hydrologiques, celle-ci indique qu'elles peuvent provenir de :

- la conception du modèle ;
- l'imprécision des données d'entrées du modèle ;
- l'imprécision sur les données observées, du calage du modèle, et de la représentativité des années de calage [21].

La donnée de précipitation est la source dominante de l'incertitude liée aux données qui influence la fiabilité de simulation dans le modèle. Idéalement, pour avoir la meilleure estimation du débit, la connaissance de l'intensité de la pluie à chaque point du bassin et à chaque pas de temps est nécessaire (mesure continue de la pluie en fonction du temps).

- **Mauvaise estimation (surestimation et/ou sous estimation) des pics**

La connaissance de la distribution temporelle de la pluie est essentielle pour la modélisation du processus hydrologique. En référence aux problèmes de l'échelle et de l'échantillonnage [12], on peut dire que dans la pratique de modélisation, les données pour décrire la variabilité temporelle de la pluie sont souvent limitées. À l'échelle temporelle, elle est limitée par la longueur de la chronique et la discrétisation de la pluie à l'échelle du temps choisi. Notons que le bassin versant du Bandama Blanc compte 10 postes pluviométriques pour un bassin versant de 34059 km² soit 3405,9 km²/poste pluviométrique. Cette

répartition assez large et non uniforme du réseau météorologique est à l'origine de la mauvaise interpolation de la précipitation et la cause principale des mauvaises estimations des débits.

Les sous-bassins emboîtés de Korhogo/Badikaha possède une station pluviométrique à l'intérieur de son sous-bassin (stations de Korhogo). Ce qui explique une assez bonne interpolation des précipitations. Le sous-bassin emboîté de Tortiya ne possèdent pas de stations pluviométriques à l'intérieur de son sous-bassin, ce qui entraîne une mauvaise estimation des précipitations de faible extension, cause d'une mauvaise simulation des pics. Le sous-bassin de Marabadiassa quant à lui possède une station pluviométrique à proximité de son sous-bassin (station de Katiola) ce qui explique une interpolation assez passable des précipitations, ajouté à cela, le manque de station pluviométriques pour une bonne interpolation des précipitations surtout en période d'étiage.

- **Surestimation des débits en période d'étiage**

La surestimation des débits simulés en période d'étiage pour toutes les stations hydrométriques, pourrait être liée aux différentes incertitudes citées précédemment. Cependant, l'analyse des travaux [18], [1] qui ont appliqué ce même modèle respectivement dans le bassin versant du N'zo et du N'zi (milieu tropical humide), nous permet d'affirmer que cette surestimation n'est pas principalement due à la structure du modèle. Une analyse de notre zone d'étude permet de constater que le bassin du Bandama Blanc ne dispose pas d'assez de stations pluviométriques, ce qui explique une grande perturbation de son régime hydrologique. Ces analyses sont corroborées par les résultats de simulation au niveau de la station de Marabadiassa qui a les critères de Nash les moins satisfaisants de l'étude. Ainsi les surestimations des débits sont principalement dues au manque de stations pluviométriques dont les effets sont plus perceptibles en période d'étiage et durant les années sèches.

Cette surestimation des débits pourrait être aussi rattachée en l'occurrence à des précipitations de faible extension spatiale en saison sèche. Ces pluies sont généralement mal mesurées à cause de la faible densité du réseau météorologique. Leur extrapolation spatiale n'est pas parfaitement bien prise en compte dans le modèle HYDROTEL. D'autre part, l'évolution dans le temps des caractéristiques internes du bassin, notamment l'humidité dans les différentes couches du sol et la saturation après un épisode pluvieux, pourrait aussi être à la base de cette surestimation.

4.4 DISCUSSION

La modélisation mathématique est un outil indispensable dans la compréhension des processus et des interactions dynamiques entre les paramètres environnementaux et physiographiques mis en jeu dans un hydrosystème [29]. L'exploitation en synergie des données de télédétection et des SIG, avec le modèle hydrologique distribué HYDROTEL [20], a permis de constituer une base de données géospatiales et d'entreprendre la modélisation des écoulements dans le bassin versant du Bandama Blanc. La structure interne d'écoulement a permis la discrétisation du bassin versant du Bandama Blanc en des unités hydrologiques relativement homogène (UHRH) qui sont de petits sous bassins homogènes vis-à-vis du devenir des ruissellements dans le cours. Les UHRH se caractérisent du point de vue topographique par le même sens d'écoulement. Ce découpage du bassin est essentiellement basé sur la topographie et ne tient pas compte des états de surfaces (végétation, types de sol...) qui peuvent influencer les processus hydrologiques. Les états de surface ont été utilisés pour l'estimation des débits dans plusieurs bassins dans les régions sahéliennes et soudano-sahéliennes [26]. Les états de surface de même que la topographie apparaissent donc comme un élément moteur et déterminant des écoulements. Pour la connaissance des états de surface de notre bassin, nous avons utilisé une image landsat TM datant de 1990 +/- 3 ans qui nous a permis de décrire le paysage naturel de notre bassin et une carte pédologique renseignant sur les types de sol rencontrés. La cartographie par télédétection des états de surface a été abordée par différents auteurs. La télédétection permet ici de produire un document cartographique homogène pour différents sites.

Les résultats des simulations (calage et vérification) à la station de Korhogo/Badikaha, qui est la plus en aval, montrent un bon synchronisme entre les débits simulés et observés. Cependant, à la station de Marabadiassa (station la plus en amont), l'allure des courbes n'est pas synchrone à certains endroits. On observe une surestimation sur une partie du cycle hydrologique. Ces écarts semblent être dus à un problème d'extrapolation des paramètres de calage, mais révèlent aussi l'incapacité du réseau de mesure des précipitations à suivre leur répartition spatio-temporelle sur ce sous-bassin. Par ailleurs, lorsque les pluies sont isolées et de faible extension, leur extrapolation conduit à des résultats comportant des écarts entre les simulations. La simulation de l'écoulement par le modèle HYDROTEL est moins performante en période d'étiage, cela est confirmé par les travaux [14] dans le bassin versant l'Orb (France) et [18] dans le N'zo (Côte d'Ivoire) et [1] dans le N'zi (Côte d'Ivoire).

Les résultats des simulations (calage et vérification) ont des coefficients de Nash qui varient entre 0,76 - 0,92 tandis que les simulations réalisées dans le N'zo ([18] et [1] avec le même modèle ont des coefficients de Nash compris entre 0,78 - 0,91 pour le N'zo et entre 0,56 - 0,91 pour le N'zi. La densité des postes pluviométriques pourrait expliquer ce déséquilibre à

savoir 490 km²/poste pour le N'zo, et 3060,8 km²/poste pour le N'zi 3060,8 km²/poste tandis que le Bandama Blanc compte 3405,59 km²/poste (Tableau VIII). L'applicabilité de ces types de modèles à des bassins de grande taille ne disposant pas de données à haute résolution spatiale est, par conséquent, difficile et pose le problème d'équifinalité dans l'estimation des paramètres, plus précisément lorsque les données pour la validation interne sont rares [13]. Outre le renforcement du réseau de mesures des variables météorologiques, les images radar peuvent constituer une bonne source de données pour la spatialisation des événements pluvieux. Les simulations à long terme ont permis de mettre en évidence la variabilité des écoulements, corroborant les travaux antérieurs en Afrique de l'Ouest et Centrale depuis 1970 [2], [23].

5 CONCLUSION

L'intégration des données géospatiales dans le modèle distribuée HYDROTEL a permis de modéliser le fonctionnement du bassin versant du Bandama blanc. À partir des images satellitaires TM de Landsat (date ?) et des données provenant des SIG (réseau hydrographique, carte de type de sol et limite du bassin), la base de données géospatiales a été constituée pour pouvoir représenter les caractéristiques physiographiques du bassin du Bandama Blanc. Le découpage spatial du bassin a abouti à des unités de simulation hydrologiques (508 UHRH). Ces UHRH sur lesquelles l'hétérogénéité spatiale des caractéristiques du bassin (topographie, occupation du sol, textures des sols) est prise en compte servent de base à la simulation des processus hydrologiques. Les données hydrométéorologiques (10 stations pluviométriques et 4 stations hydrométriques) recueillies in situ de 1996 à 2000, sont également prises en compte au niveau de chaque UHRH. La simulation des écoulements est réalisée de 1996 à 2000. Le calage et la validation des paramètres du modèle sur le bassin du Bandama Blanc, est fait à travers 4 sous-bassins emboîtés, qui découlent d'un regroupement des UHRH en fonction des stations hydrométriques. Les résultats obtenus par la simulation indiquent que les données provenant de la télédétection et de SIG peuvent être utilisées en vue d'une modélisation distribuée. Le critère de Nash varie de 0,76 à 0,92 pour les calages et les validations. En saison sèche, le fort taux de prélèvement des eaux pour les différentes activités socio-économiques en période d'étiage a donné une forte surestimation du modèle hydrologique. En revanche, le modèle reproduit assez bien les processus hydrologiques au cours de la saison pluvieuse.

On peut retenir que les données géospatiales provenant de la télédétection et des SIG ont montré leur aptitude à caractériser la structure physiographique du bassin du Bandama Blanc en vue d'une modélisation hydrologique distribuée, le modèle HYDROTEL a montré son applicabilité en milieu tropical, au niveau d'un bassin de grande taille à vocation agricole, disposant de données hydrométéorologiques limitées dans le temps et dans l'espace (3405,9 km²/poste pluviométrique) et la simulation des écoulements a mis en évidence la perturbation du régime hydrologique par les ouvrages de stockages d'eau (barrages), en période d'étiage pour la plupart des stations, et en période de crue pour des stations spécifiques.

Ainsi, cette étude effectuée au sein du bassin versant du Bandama Blanc peut servir d'outil d'aide à la décision pour les populations rurales pour l'élaboration d'une carte à vocation agricole du bassin versant sur la base des caractéristiques physiographiques et météorologique, l'identification des zones vulnérables à l'inondation et enfin l'implantation et le dimensionnement des ouvrages de stockages pour une gestion rationnelle et durable des ressources en eau.

Pour améliorer les résultats de cette étude, nous recommandons l'intégration des images satellitaires multi-dates pour évaluer la dynamique de l'occupation des terres, une étude plus approfondie des caractéristiques du sol pour déterminer les propriétés hydrodynamiques propres, le renforcement du réseau météorologique pour une meilleure interpolation de la précipitation et/ou l'utilisation de données radar et enfin le calage du modèle sur une période de deux années et sa validation sur une chronique de 10 années au minimum.

En perspective, nous souhaitons dans un premier temps modéliser le bilan hydrologique avec HYDROTEL en intégrant les aménagements potentiels existants dans le bassin versant du Bandama Blanc, ensuite étudier l'impact de la variabilité climatique et du changement de l'occupation du sol sur le fonctionnement hydrologique à l'aide du modèle et enfin faire une étude de la sensibilité du modèle HYDROTEL en milieu tropical.

REFERENCES

- [1] Adon G.C.R,"Modélisation hydrologique spatialisée du bassin versant du N'zi :Apports de données géospatiales et du modèle distribué (Hydrotel)". DEA d'Hydrogéologie Université de Cocody Abidjan, 77 p,2008.
- [2] Ardoin, B.S,"Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne". Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, Montpellier, 330 p,2004.
- [3] Beven K. J. and Kirkby M. J., "A Physically based, variable contributing area model of basin hydrology". Hydrol. Sci. pp. 43-69,1979.
- [4] Bigot S., Brou Y.T., Oszwald J. et Diédhiou A, Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. Sécheresse, vol. 16, n° 1, p. 5-13,2005.
- [5] Brou Y. T.,Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Techniques de Lille, 212p, 2005.
- [6] Connolly R.D., Silburn D.M. and Ciesiolka C.A.A., Distributed parameter hydrology model (ANSWERS) applied to a range of catchment scales using simulator data. III. Application to a spatially complex catchment. Journal of Hydrology, vol. 193,p. 183-203,1997.
- [7] Dupont J., Smitz J., Rousseau A.N., Mailhot A. et Gangbazo G.,Utilisation des outils numériques d'aide à la décision pour la gestion de l'eau. Revue des sciences de l'eau, numéro spécial, p. 5-18,1988.
- [8] Fortin J.-P., Villeneuve J.-P., Guilbot A. and Seguin B.,Development of a modular hydrological forecasting model based on remotely sensed data for interactive utilization on a microcomputer. International Association of Hydrological Sciences Publication, n° 160, p. 307-319,1986.
- [9] Fortin J.P., Villeneuve J.P., Bocquillon C.,Hydrotel, Physitel, and Imatel: and Integrated Application of Remote Sensing and GIS to Hydrological Modeling, on Microcomputer. Proc. International Symposium of Remote Sensing and Water Resources, Enschede, Hollande, 20-24 août: 793-804, 1990.
- [10] Fortin J.P., Turcotte R., Massicotte S., Moussa R., Fitzback J. and Villeneuve J.P., A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data: Application to Chaudière watershed. Journal of hydrologic Engineering, Vol 6 n° 2, pp100-108, 2001.
- [11] Goula B.T.A., Savané I., Konan B., Fadika V. et Kouadio G.B.,Étude comparative de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau des bassins du N'zo et du N'zi en Côte d'Ivoire. Sciences et Nature, vol. 2, n° 2, p. 107-120,2005,
- [12] Grayson R. and Blöschl G., Spatial modelling of catchments dynamics. Cambridge University Press, pp 51-81,2000.
- [13] Grayson R., Moore I., Mc Mahon T.,Physically based hydrological modelling. 1. A terrain based model for investigative purposes. Water Resources Research 28(10): 2639-2658,1992.
- [14] Indarto K.,Découpages spatiaux et conséquences sur le bilan hydrologique : application au bassin de l'Orb à travers une démarche de modélisation hydrologique distribuée. Thèse de Doctorat, ENGREF Montpellier, 220p,2002.
- [15] Institut National de Recherche Scientifiques (INRS) – Eau ,« Rationalisation du réseau hydrométrique du Québec » - Gouvernement du Canada, Ministère de l'Environnement, p.331,1971,
- [16] Janicot S. et Fontaine B. (1993) L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'Ouest. La Météorologie, série 8, n° 1, p. 28-41,1993.
- [17] Kouamé K.F. et Biémi J., Évaluation des ressources en eau des aquifères de socle fissuré par télédétection et SIG de la région semi montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. P. 807-812, in C. R. Duguay & M. Bernier (réd.) Compte rendu du 23e Symposium canadien de télédétection/10e Congrès de l'Association québécoise de télédétection, 21-24 août 2001, Sainte-Foy (Québec), Volume 2, Société canadienne de télédétection, Ottawa, 900p,2001.
- [18] Kouamé F., Bernier M., Goné D., Saley B., Lefèbvre R., Soro N. et Koudou A.,Intégration de données géospatiales dans un modèle hydrologique distribué pour la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide de Côte d'Ivoire (Afrique de l'ouest). Télédétection vol. 7, n° 1-4, pp.217-235,2007.
- [19] Le Barbé L., Lebel T. and Tapsoba D. (2002) Rainfall variability in West Africa during the years 1950–1990. Journal of Climate, vol. 15, p. 187-202.
- [20] Lebel T. and Vischel T.,Climate and water cycle in the tropical zone: a problem of scale. Comptes Rendus Geoscience, n° 337, p. 29-37,2005.
- [21] Melching C.S.,Reliability Estimation In : V. P. Shing, (ed.), Computers models of watersheds hydrology, Waters Resources Publication, Baton R, USA, pp. 69 – 118,1995.
- [22] Morin G., Fortin J.-P., Lardeau J.-P., Sochanska W. et Paquette S., Le Modèle CEQUEAU : manuel d'utilisation. INRS-Eau, Sainte-Foy, Rapport n° 93, 78 p,1981.
- [23] Olivry J.C.,Long term effects of rain shortage : the ill rivers of western and central Africa. International Association of Hydrological Sciences Publication, n° 252, p. 158-162,1998.
- [24] Perraud A. (1971) Les Sols. In : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM n° 50, pp. 265-374.

- [25] Paturel J.E., Servat E. et Delattre M.O., Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 43, n° 3, p. 937-945, 1998.
- [26] Puech C., 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, 214 p, 1993.
- [27] Savané I., Coulibaly K.M. et Gioan, P., Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Sécheresse*, vol. 12, n°4, p. 231-237, 2001.
- [28] Servat E., Paturel J.E., Kouamé B., Travaglio M., Ouédraogo M., Boyer J.F., Lubès-Niel H., Fritsch J.M., Masson J.M. et Marieu B., Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, n° 252, p. 323-337, 1998.
- [29] Singh V.P., Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on streamflow hydrograph. *Hydrological Processes*, vol. 11, p. 1649-1669, 1997.