

Un modèle hydrologique distribué pour la simulation des écoulements des eaux du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire, Afrique de l'Ouest

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

¹ LSTEE, UFR STRM, Université Félix Houphouët Boigny, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

² CURAT, UFR STRM, Université Félix Houphouët Boigny, 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, Canada G1K 9A9

* Correspondance, courriel : kkassialexis@yahoo.fr

Résumé

Le modèle hydrologique distribué HYDROTEL est appliqué au bassin versant du fleuve Bandama (97 000 km²) situé en milieu tropical humide de Côte d'Ivoire afin de simuler les écoulements des eaux et d'établir le bilan des échanges entre les réservoirs de surface et souterrains. La base de données géospatiales est constituée de données matricielles (modèle numérique d'altitude, occupation des terres, catégories de sols), vectorielles (réseau hydrographique, limite de bassin versant, localisation des stations hydrométéorologiques) et des tables attributaires associées aux données géographiques. L'intégration de ces données dans un système d'information géographique a permis de faire la discrétisation physiographique et de déterminer les unités hydrologiques relativement homogènes, sur lesquelles l'hétérogénéité spatiale des états de surface (catégories de sols et d'occupation des terres) du bassin est prise en compte. Ensuite, la modélisation hydrologique est réalisée à l'aide des données hydrométéorologiques *in situ* (32 postes pluviométriques et 6 stations hydrométriques) enregistrées de 1996 à 2000. Le calage des paramètres du modèle est effectué à l'aide des données de débits (observés et simulés) des années hydrologiques 1998 et 1999. La validation spatio-temporelle réalisée montre une assez bonne concordance entre les valeurs de débits observés et calculés. Le critère de Nash varie de 0,72 à 0,95, preuve de la bonne performance et de l'applicabilité du modèle HYDROTEL en milieu tropical. L'intégration des modifications environnementales (changement de l'occupation des terres) dans le modèle HYDROTEL pourra permettre d'argumenter les interrelations entre les modifications des états de surface et le régime hydrologique du Bandama.

Mots-clés : HYDROTEL, télédétection, SIG, milieu tropical, modèle distribué, Côte d'Ivoire.

Abstract

A distributed hydrological model for simulating streamflows in the Bandama watershed in Ivory Coast (West Africa)

The distributed hydrological model HYDROTEL is applied to the Bandama watershed (97 000 sq km), located in the tropical wet region of Ivory Coast in order to simulate streamflows and determining water balance (exchanges between surface and underground reservoirs).

The geospatial database is composed by raster data (digital elevation model, land use, soils types), vector data (river network, watershed boundary, hydrometeorological stations location) and attributes tables associated to geographical data. The data integration in a geographical information system allowed physiographical discretization and the determination of hydrological units relatively homogeneous on which spatial heterogeneities of watershed surface states (types of soil and land use) are taking into account. Then, hydrological modelling is performed by using the *in situ* hydrometeorological data (32 rainfall stations and 6 streamflow stations) collected from 1996 to 2000. Calibration of the model parameters is based on observed and simulated streamflows for 1998 and 1999. Spatial and temporal validations of the calibration show a concordance between streamflows observed and simulated. The criterion of Nash ranges from 0.72 to 0.95; which proves the good performance and the applicability of HYDROTEL in tropical environment. The integration of environmental modifications (land cover changing) in HYDROTEL will permit to analyse the interrelations between surface states modifications, climatic variability and the hydrological responses of the Bandama.

Keywords : *HYDROTEL, remote sensing, GIS, tropical region, distributed model, Ivory Coast.*

1. Introduction

Au cours de ces dernières décennies, de nombreux modèles hydrologiques [1] ont été développés pour apporter des solutions à des problèmes de génie civil, de gestion quantitative et qualitative des ressources en eau, de conservation des sols, etc. Parmi ceux-ci, certains considèrent le bassin versant comme un tout indifférencié (modèles globaux), tandis que d'autres permettent une discrétisation en des mailles ou des unités plus petites (modèles distribués). Ces derniers présentent l'avantage de pouvoir prendre en compte l'organisation spatiale des caractéristiques du milieu (topographie, catégorie d'occupation des terres, textures des sols, etc.). 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. Le modèle hydrologique HYDROTEL, qui a montré son potentiel en simulation et en prévision hydrologiques sur des bassins versants au Canada [2] et en France, n'est pas encore suffisamment testé en Afrique soudano-guinéenne humide. En Côte d'Ivoire, aucune étude du fonctionnement hydrologique des hydrosystèmes, basée sur le couplage des modèles mathématiques et des données géospatiales issues de la télédétection satellitaire, des MNA et des SIG, n'a encore été entreprise sur un bassin d'une telle superficie et avec autant d'aménagements hydrauliques et hydro-agricoles. Ce qui constitue l'innovation apportée par cette étude. Ainsi donc, le modèle HYDROTEL pourrait être adapté pour la modélisation du bassin versant du Bandama afin : 1) de tester sa robustesse en milieu tropicale humide ; 2) de simuler les écoulements des eaux du fleuve Bandama.

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 $5^{\circ}14'N$ et $10^{\circ}21'N$ et les longitudes $4^{\circ}00'W$ et $7^{\circ}00'W$. Il a une superficie de $97\,000\text{ km}^2$ 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 $1\,050\text{ km}$, 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 [3, 4]. 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*).

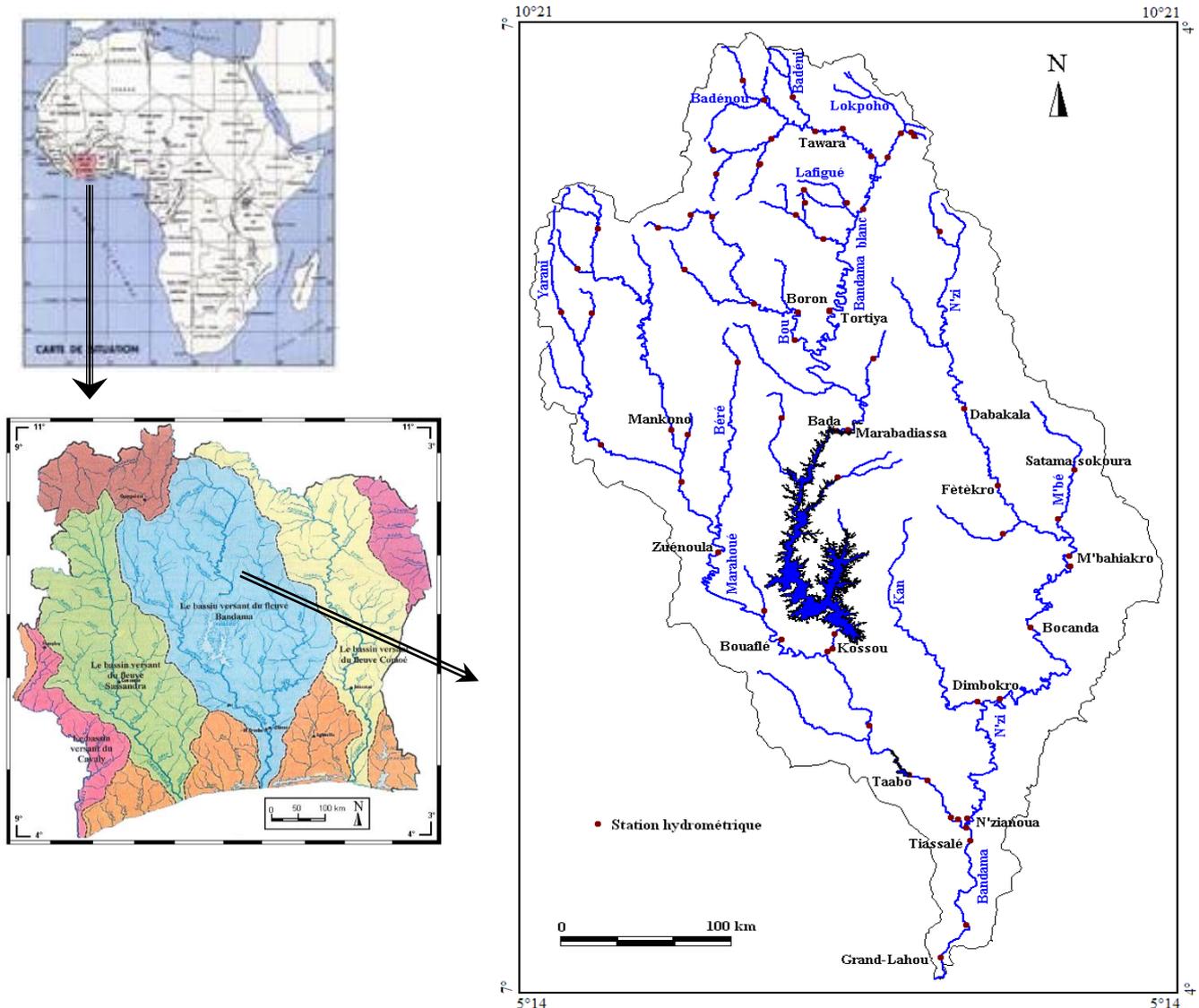


Figure 1 : Carte de présentation de la zone d'étude (bassin versant du Bandama)

3. Matériel et méthodes

3-1. Données utilisées

La base de données géospatiales constituée dans le cadre de cette étude, comporte des données physiographiques provenant d'images satellitaires et de cartes thématiques ainsi que de données hydrométéorologiques (pluie, température et débit). Les données physiographiques sont utilisées dans la caractérisation spatiale des structures d'écoulement par le module PHYSITEL.

Les images satellitaires proviennent du capteur MODIS de TERRA. MODIS est un capteur comprenant 36 bandes entre les longueurs d'onde 0,4 et 14,5 μm . Il donne une connaissance accrue de la dynamique globale et des processus se produisant à la surface de la terre et dans l'atmosphère. Il rapporte simultanément des observations atmosphériques (propriétés d'aérosol et de nuage, vapeur d'eau et profils de température) par les bandes (17-36), océaniques (température de surface de la mer et chlorophylle) par les bandes (8-16), et terrestres (changement de l'occupation du sol, température de surface de la terre et propriétés de la végétation) par les bandes (1-7). Il s'agit des images MOD13A3 h17v07 et MOD13A3 h17v08 acquises en Février 2000, en pleine saison sèche. Elles sont utilisées pour la cartographie de l'occupation des terres afin de décrire les types de couverture végétale du bassin. Concernant les cartes thématiques, les cartes topographiques de la Côte d'Ivoire à 1 : 200 000, les MNA produits à l'aide des données de la Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) de résolution 90 m (Farr et Kobrick, 2000) et la carte pédologique à 1 : 500 000 établie par Perraud (1971) sont utilisées. 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 (5 ans) sont utilisées. Les données météorologiques (pluies, températures), mises à notre disposition par la SODEXAM (organisme en charge de la météorologie en Côte d'Ivoire) proviennent de 32 stations pluviométriques, toutes situées à l'intérieur du bassin versant. Sur l'ensemble du bassin versant, il y a une station pour environ 3 000 km^2 . Ceci montre la faible densité du réseau pluviométrique et la difficulté de prendre en compte la variabilité spatiale des pluies lorsque celles-ci sont isolées et faibles. Concernant les données hydrométriques (débits journaliers), huit stations sont réparties dans trois sous-bassins : trois sur le N'zi à M'bahiakro, à Dimbokro et à N'zianoa, trois sur le cours principal du Bandama, à Tortiya, Marabadiassa et à Tiassalé et deux sur la Marahoué à Bouaflé et Zuénoula. L'exutoire principal à Grand-Lahou n'est plus jaugé pour un problème d'ensablement à l'embouchure du fleuve (*Figure 2*).

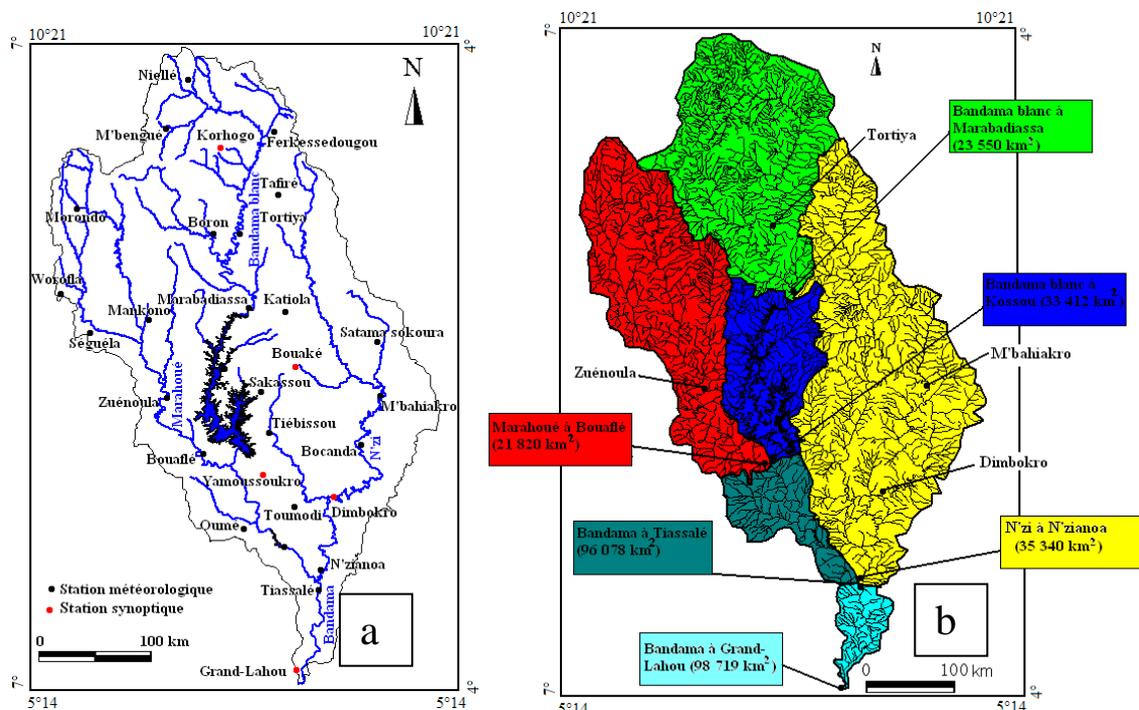


Figure 2 : Stations hydrométéorologiques du bassin versant du Bandama : a- stations météorologiques ; b- stations hydrométriques

3-2. Structure du modèle HYDROTEL

3-2-1. Description du SIG 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 [2]. Il permet l'intégration de divers types de données provenant de la télédétection et des SIG. Les données utilisées par PHYSITEL sont de type matriciel (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).

3-2-2. Principales équations du modèle HYDROTEL

HYDROTEL prend en compte six processus qui interviennent depuis la chute de la pluie jusqu'à l'écoulement dans les rivières. L'évolution du couvert nival est modélisée à l'étape 2. Pour l'appliquer au bassin versant du Bandama, en milieu tropical humide, cette étape n'est pas prise en compte de sorte que cinq processus sont considérés : 1) interpolation des données météorologiques ; 2) calcul des flux évaporatoires ; 3) bilan vertical de l'eau ; 4) écoulement sur la partie terrestre ; 5) écoulement dans les rivières (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Processus hydrologiques et algorithmes disponibles [2]

Sous modèles	Options
1. Interpolation des données météorologiques : P (m);T (°C)	Moyenne pondérée des 3 stations les plus proches
2. Evapotranspiration potentielle	Hydro-Québec
3. Bilan vertical	BV3C
4. Ecoulement sur la partie terrestre	Equation des ondes cinématiques
5. Ecoulement dans le réseau hydrographique	Equation des ondes cinématiques Equation des ondes diffusantes

Le sous modèle BV3C est le sous modèle qui gouverne le ruissellement et permet d'établir le bilan d'eau vertical. Il est bien adapté à la modélisation du "fonctionnement" des hydrosystèmes. BV3C est conceptualisé en 3 réservoirs (surface, subsurface et souterrain) en accord avec le profil à 3 horizons des sols de la zone d'étude. Ces horizons sont caractérisés par des profondeurs (Z1, Z2 et Z3) et des conditions initiales d'humidité (θ_1 , θ_2 et θ_3). Ces paramètres influencent les écoulements de surface et souterrains. Au début de chaque pas de temps, l'infiltration en provenance de la pluie est contrôlée par la lame de pluie (P), lorsque la couche superficielle n'est pas saturée, et par la conductivité hydraulique à saturation, lorsque celle-ci est saturée. L'excès d'eau à la surface devient du ruissellement de surface (R). Finalement, le contenu en eau θ_i de chaque couche j varie tant en fonction des flux verticaux $Q_{1,2}$ et $Q_{2,3}$ entre les couches que des écoulements hors de la colonne de sol Q_2 et Q_3 , de la transpiration de chaque couche Tr_i et de l'évaporation des sols nus pour la couche de surface [6] (**Figure 3**).

$$\theta_{1f} = \theta_{1i} + \frac{\Delta t}{Z_1} (P - q_{1,2} - E - Tr_1) \quad (1)$$

$$\theta_{2f} = \theta_{2i} + \frac{\Delta t}{Z_2 - Z_1} (q_{1,2} - q_{2,3} - Tr_2 - Q_2) \quad (2)$$

$$\theta_{3f} = \theta_{3i} + \frac{\Delta t}{Z_3 - Z_2} (q_{2,3} - Tr_3 - Q_3) \quad (3)$$

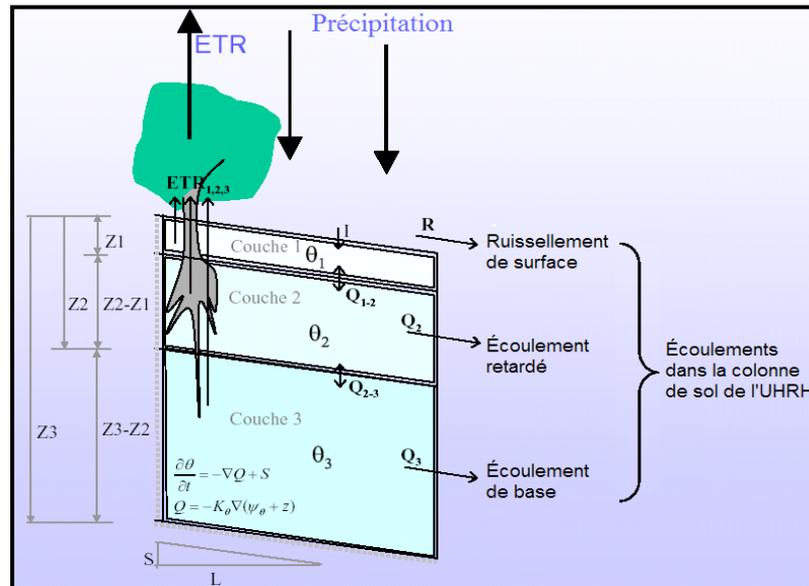


Figure 3 : Bilan vertical en trois couches dans le sous-modèle BV3C [6]

Les écoulements de surface sont influencés par un facteur de résistance créé par la microtopographie et défini par le coefficient de Manning pour chaque catégorie d'occupation des sols. Enfin, les écoulements de surface, de subsurface, souterrain et dans le réseau hydrographique sont simulés à l'aide de l'algorithme de l'onde cinématique, une approximation unidimensionnelle du système complet des équations de Saint-Venant. Dans le bassin méditerranéen de l'Orb, [7] a identifié comme paramètres principaux influençant les sorties du modèle HYDROTEL, ceux qui sont liés au sous modèle BV3C (profondeurs et humidités des couches, coefficient de récession, etc.) et ceux de l'hydrogramme géomorphologique (lame d'eau de référence, coefficient de rugosité de Manning). Ces paramètres ont été utilisés dans la procédure de calage du modèle.

3-3. Approche méthodologique

3-3-1. Calage du modèle

3-3-1-1. Présentation des paramètres

Le réglage des paramètres est réalisé manuellement par "essai-erreur" et étape par étape ; un des paramètres étant fixé et les autres variables. L'analyse des graphiques et des critères mathématiques d'ajustement conduit au choix des meilleures combinaisons donnant une simulation optimum. Les nombreux paramètres disponibles dans le modèle HYDROTEL rendent les opérations de calage très difficiles. Le jeu de paramètres qui a été testé pour le calage du modèle est consigné dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Principales valeurs des paramètres calés sur les différents sous-bassins du Bandama

Paramètres calés	Sous-bassin du Bandama blanc		Sous-bassin du N'zi			Sous-bassin de la Marahoué		Bassin du Bandama
	Tortiya	Marabadiassa	M'bahi akro	Dimbokro	N'zianoa	Zuénoula	Bouaflé	Tiassalé
Paramètres du Bilan Vertical à 3 Couches (BV3C)								
Humidité relative initiale								
Couche 1(%)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Couche 2(%)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Couche 3(%)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Profondeur de couche								
Couche 1 (m)	0,25	0,25	1,5	1,5	1,5	1	1	2,5
Couche 2 (m)	0,75	0,75	2,666	2,666	2,666	1,35	1,35	3,58
Couche 3 (m)	1,783	1,783	2,76	2,76	2,76	2,15	2,15	3,585
Coefficient de récession (m/h)	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$
Hydrogramme GéoMorphologie (HGM)								
Lame d'eau de référence (m)	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Coefficient de Manning								
Milieux forestiers	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Eau	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Autres milieux	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

Ainsi, les ajustements des valeurs de paramètres qui donnent des simulations ayant de faibles écarts (10 %) entre les débits simulé et observé sont retenus.

3-3-1-2. Influence des paramètres sur l'hydrogramme géomorphologique

L'hydrogramme géomorphologique gouverne la distribution de l'écoulement dans les tronçons du réseau hydrographique. Il détermine la réponse de chaque UHRH vis-à-vis de la pluie tombée. Son allure et sa forme dépendent des valeurs de coefficients de rugosité de Manning des types de couverture du sol et de la lame d'eau de référence. Lorsque la rugosité est élevée, il y a une plus grande résistance au ruissellement.

Ainsi, les zones forestières possèdent les plus forts coefficients, alors que les milieux aquatiques possèdent les plus faibles coefficients. Tout comme les coefficients de rugosité, la valeur de la lame de référence influence l'amplitude du pic de l'hydrogramme de crue. Les faibles valeurs de lame d'eau donnent des hydrogrammes géomorphologiques dont le pic simulé apparaît après le pic observé. L'écoulement de surface est par conséquent retardé. En revanche, plus la lame est importante, plus le pic de l'hydrogramme simulé est important et il apparaît rapidement. L'écoulement est par conséquent accéléré. Le sous modèle BV3C permet de simuler les transferts verticaux, en régulant les écoulements entre les trois couches du sol. La couche 1 (superficielle) contrôle le ruissellement de surface. Quant à la couche 2 (semi-profonde), elle contrôle les écoulements retardés dans la couche 1. Elle est non saturée (humidité relative égale à 20 %). Enfin, la couche 3 (profonde) contrôle le débit de base et est saturée (humidité relative égale à 40 %). Les différents paramètres associés aux différentes couches (coefficients de récession, teneurs en eau et épaisseurs des couches) permettent la séparation de l'écoulement dans la zone non saturée entre l'écoulement retardé et le débit de base alimentant la nappe [6]. C'est le coefficient de récession qui contrôle le processus de décrue. Le débit de base est influencé par l'épaisseur de la couche 3 et le coefficient de récession qui est calé globalement par rapport au débit à l'exutoire du bassin. Différents tests sont effectués avec la valeur du coefficient de récession égale à $2,5 \cdot 10^{-7}$ et les profondeurs des couches 1, 2 et 3, variables. Les simulations sont réalisées sur la même période et les autres paramètres restent identiques. Lorsque la couche 3 a une faible épaisseur, le pic de l'hydrogramme est surestimé. Par contre, lorsque l'épaisseur est grande, la contribution de la nappe au débit à l'exutoire devient très importante de sorte que le débit de base est très élevé. Le pic de l'hydrogramme est réduit.

3-3-1-3. Procédure de calage

Une fois que tous les sous-modèles ont été spécifiés, la modélisation des écoulements peut être réalisée. Le calage des paramètres du modèle (humidité relative, profondeur de couche, coefficients de rugosité de Manning, types couverture du sol et de la lame d'eau de référence) est effectué à l'aide des débits journaliers observés et simulés aux stations de jaugeage de M'bahiakro, Dimbokro et N'zianoa, dans le sous-bassin du N'zi pour l'année hydrologique 1999. Comme [8] l'ont fait dans le calage du modèle MIKE-SHE sur le bassin du fleuve Sénégal, nous avons également pris en compte les stations situées en amont (Bandaman blanc à Tortiya et à Marabadiassa et Marahoué à Zuénoula et Bouaflé) dans la phase de calage du modèle. Selon ces auteurs, cela permet d'améliorer les résultats de calage.

3-3-2. Tests de performance

Une série de vérifications de la performance du modèle a également été entreprise. Pour cela, la validation temporelle du modèle est réalisée pour l'année 1998 aux mêmes stations de jaugeage de M'bahiakro, Dimbokro et N'zianoa. Puis, une validation spatiale est effectuée pour l'année 1999 aux stations de jaugeage de Tortiya et Marabadiassa sur le Bandama blanc, Bouaflé et Zuénoula sur la Marahoué et Tiassalé en aval du bassin du Bandama. Le critère de Nash [9] a été utilisé pour mesurer le degré d'ajustement entre les valeurs observées et simulées pendant le calage et la validation du modèle (*Equation 4*):

$$N = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s_i} - Q_{o_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{s_i} - \bar{Q}_{o_i})^2} \quad (4)$$

Où : N est le coefficient de Nash; Q_{s_i} est le débit simulé; Q_{o_i} est le débit observé; \bar{Q}_{o_i} est la moyenne des débits observés; n est le nombre d'observations.

Le critère de Nash prend des valeurs entre $-\infty$ et $+1$. Lorsqu'il est proche de 1, alors l'accord est meilleur entre la modélisation et l'observation. Le deuxième critère est la Racine Carrée de l'Ecart Quadratique Moyen (RCEQM). Il donne une évaluation globale des processus simulés. Plus la RCEQM tend vers zéro, meilleure est la simulation. Cet indice se calcule selon ***l'Equation 5*** :

$$RCEQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Qs_i - Qo_i)^2}{n}} \quad (5)$$

Où : Qs_i est le débit simulé; Qo_i est le débit mesuré; n est le nombre de simulations.

Le troisième critère d'évaluation, l'Écart de Volume (EV) est retenu pour sa sensibilité à la description des processus verticaux dans le modèle (bilan vertical). Il est défini par ***l'Equation 6*** :

$$EV = \frac{(V_{tm} - V_{ts})}{V_{tm}} \times 100\% \quad (6)$$

Où : V_{tm} est le volume total mesuré pour la chronique de simulation et V_{ts} le volume total simulé pour la chronique de simulation.

3-3-3. Equifinalité

On parle d'équifinalité lorsque plusieurs valeurs des paramètres d'un modèle permettent d'obtenir des résultats de simulations qui coïncident avec des mesures *in situ* alors que ces différentes valeurs numériques n'ont pas nécessairement de validité ou de correspondance physique [10, 11]. Les paramètres calés tels que les coefficients de rugosité, l'humidité et les épaisseurs de couche, ainsi que les lames d'eau, sont des paramètres à mesurer *à priori* sur le terrain. Les incertitudes et les erreurs liées à l'acquisition de ce type de données *in situ*, rendent délicate la représentation des hydrosystèmes. L'estimation de ces paramètres implique des problèmes d'équifinalité [12]. Cette notion suppose que l'hydrosystème peut atteindre le même état final à partir de conditions initiales différentes.

4. Résultats

4-1. Calage du modèle (sous-bassin du N'zi : année 1999)

Le sous-bassin du N'zi a été choisi pour le calage du modèle car, il a le régime le moins perturbé par les aménagements hydro-agricoles du bassin d'une part et, d'autre part, il a déjà été modélisé par le modèle global GR2M [13] et par le modèle distribué HYDROTEL [14]. Il dispose donc d'une base de données suffisante pour guider le calage du modèle. Quant à l'année 1999, elle a été retenue comme celle donnant les meilleurs résultats des essais de la chronique 1996-2000 (***Tableau 3***).

Tableau 3 : Débits simulés et observés pour le calage du modèle (sous-bassin du N'zi, 1999)

Station	Hydrogramme	Nash	RCEQM	EV (%)
M'bahiakro	<p>Station de M'bahiakro (1999)</p> <p>Nash = 0,92 RCEQM = 0,75 Lame Obs. = 87,14 mm Lame Sim. = 91,43 mm</p>	0,92	0,75	- 4,92
Dimbokro	<p>Station de Dimbokro (1999)</p> <p>Nash = 0,93 RCEQM = 1,16 Lame Obs. = 61,87 mm Lame Sim. = 65,14 mm</p>	0,93	1,16	-5,28
N'zianoa	<p>Station de N'zianoa (1999)</p> <p>Nash = 0,95 RCEQM = 1,12 Lame Obs. = 58,95 mm Lame Sim. = 61,14 mm</p>	0,95	1,12	-3,71

L'analyse numérique et graphique des résultats du calage pour l'année 1999 montre que les débits journaliers simulés concordent assez bien avec les débits journaliers observés aux stations de calage. La synchronisation entre débits observés et simulés est respectée. Cependant, une très légère surestimation des débits simulés en période d'étiage et de décrue est observée. Le critère de Nash, la RCEQM et l'EV indiquent que le calage est satisfaisant avec des valeurs respectives de 0,92 à 0,95, de 0,75 à 1,16 et de -5,28 % à -3,71 %. Ainsi, les paramètres de modélisation utilisés peuvent être retenus pour expliquer le fonctionnement global de l'hydrosystème du Bandama.

4-2. Validation du modèle

4-2-1. Validation temporelle (sous-bassin du N'zi : année 1998)

La validation temporelle s'est faite dans le même sous-bassin du N'zi sur l'année 1998 avec les mêmes jeux de paramètres utilisés pour le calage du modèle en 1999. Cette année a été choisie, car, elle donne les meilleurs résultats des simulations de la période 1996-2000 (**Tableau 4**). L'analyse graphique des stations de M'bahiakro, de Dimbokro et de N'zianoa montre que l'allure des courbes de débits simulés et observés sont synchrones, malgré une légère surestimation des débits simulés en période de crue. La saison sèche est très bien simulée, de même que les phases de concentration et de décrue. Par contre, le tarissement n'est pas toujours aussi bien reproduit (station de M'bahiakro). Dans l'ensemble, on note une bonne simulation des écoulements dans le sous-bassin du N'zi avec un critère de Nash variant entre 0,75 et 0,79, une RCEQM comprise entre 1,40 et 1,56 et un EV allant de -1,14 % à -20,7 %. Les processus hydrologiques sont bien reproduits, à quelques exceptions près. Cela exprime la bonne performance et l'applicabilité du modèle HYDROTEL, comme en témoignent le critère de Nash et la RCEQM. Par ailleurs, une amélioration de la validation d'amont en aval est observée; ce qui se traduit par une meilleure simulation à l'exutoire du sous-bassin du N'zi.

Tableau 4 : Débits simulés et observés pour la validation temporelle (sous-bassin du N'zi, 1998)

Station	Hydrogramme	Nash	RCEQM	EV (%)
M'bahiakro		0,77	1,44	- 17,5
Dimbokro		0,75	1,56	-20,7
N'zianoa		0,79	1,40	-1,14

4-2-2. Validation spatiale (1999)

La validation spatiale dans pour l'année 1999, concerne les stations de Tortiya et de Marabadiassa dans le sous-bassin du Bandama blanc [15] d'une part, et d'autre part celles de Zuénoula et de Bouaflé dans le sous-bassin de la Marahoué [16] et Tiassalé en aval du bassin du Bandama. Ces différentes stations hydrométriques qui n'ont pas servi aux calages, permettent de vérifier la représentativité spatiale des paramètres calés sur l'ensemble du bassin du Bandama pour l'année de calage (**Tableau 5**). La validation spatiale, montre une assez bonne synchronisation entre les courbes des données observées et simulées. Les processus hydrologiques sont bien reproduits, à quelques exceptions près. Cela exprime une assez bonne performance et l'applicabilité du modèle HYDROTEL sur le bassin du Bandama, comme en témoignent le critère de Nash, la RCEQM et l'EV qui varient respectivement de 0,72 à 0,90, de 0,81 à 2,18 et de -10,13 à -2,26.

Tableau 5 : Débits simulés et observés pour la validation spatiale (1999)

Station	Hydrogramme	Nash	RCEQM	EV (%)
Tortiya		0,86	2,14	-2,26
Marabadiassa		0,89	2,18	-4,1
Zuénoula		0,72	0,81	-5,44
Bouaflé		0,73	0,94	-10,13
Tiassalé		0,90	2,16	-5,04

5. Discussion

L'analyse des résultats de simulations (calage et validation) donne matière à réflexion sur quelques 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 aux différentes stations hydrométriques du Bandama. Selon une étude réalisée par l'INRS-ETE (Institut National de Recherche Scientifique - Eau Terre et Environnement) au Canada en 1971, 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 (représentativité spatiale des stations ou manque d'informations), l'imprécision sur les données observées, du calage du modèle, et de la représentativité des années de calage. Selon [17], 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 et surtout du cumul 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). Le modèle hydrologique HYDROTEL a déjà été utilisé en milieu tropical humide, plus précisément en Côte d'Ivoire pour simuler les écoulements dans les bassins versants du N'zo (7 350 km²) et du N'zi (35 500 km²). Son utilisation sur le bassin versant du Bandama (97 000 km²) a permis de tester son application sur un bassin de plus grande taille à vocation hydro-agricole, dans le but de comprendre le fonctionnement hydrologique de l'hydrosystème.

Globalement, les résultats des simulations (calage et validation) du bassin versant du Bandama ont des coefficients de Nash qui varient de 0,72 à 0,95 tandis que ceux obtenus sur le bassin du N'zi par [14] oscillent entre 0,56 et 0,91 et ceux du N'zo [18, 19] avec le même modèle ont des coefficients de Nash compris entre 0,78 et 0,91. La densité des postes pluviométriques pourrait expliquer ce déséquilibre à savoir 1 poste pour 490 km² dans le N'zo, 1 poste pour 3061 km² dans le N'zi et 1 poste pour 3031 km² dans le Bandama. 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 plus précisément lorsque les données pour la validation interne sont rares [20]. La connaissance de la distribution spatio-temporelle de la pluie est essentielle pour la modélisation du processus hydrologique. En référence aux problèmes de l'échelle et de l'échantillonnage [21], on peut dire que dans la pratique de modélisation les données pour décrire la variabilité spatio-temporelle de la pluie sont souvent limitées. A l'échelle temporelle, elle est limitée par la longueur de la chronique et la discrétisation de la pluie à l'échelle du temps choisi. A l'échelle spatiale, elle est limitée par la distribution des postes pluviométriques pour représenter la distribution de la pluie. Cette répartition assez large et non uniforme du réseau météorologique pourrait être à l'origine d'une mauvaise interpolation de la précipitation et des mauvaises estimations des débits simulés. D'autres facteurs, notamment le débit mesuré (courbes de tarages, etc.) et surtout la démarche de discrétisation spatiale adoptée, ainsi que les simplifications apportées sur le modèle peuvent également influencer les résultats. Il faudrait ajouter à cela, la présence massive d'ouvrages de stockages (barrages) qui perturbent le régime hydrologique occasionnant des simulations passables. La surestimation des débits simulés tant en période d'étiage qu'en période de crue pourrait être liée aux différentes incertitudes citées précédemment. Cependant, l'analyse des travaux de [18, 19] qui ont appliqués ce même modèle sur le bassin versant du N'zo (milieu tropical humide), nous permet d'affirmer que cette surestimation n'est pas principalement due à la structure spatialisée du modèle. Une analyse de la zone d'étude permet de constater que le bassin du Bandama est soumis à plusieurs ouvrages de stockages, contrairement à celui du N'zo. Ces barrages jouent sur les périodes d'étiages mais également sur les crues, avec un rôle « tampon » (*Figure 4*).

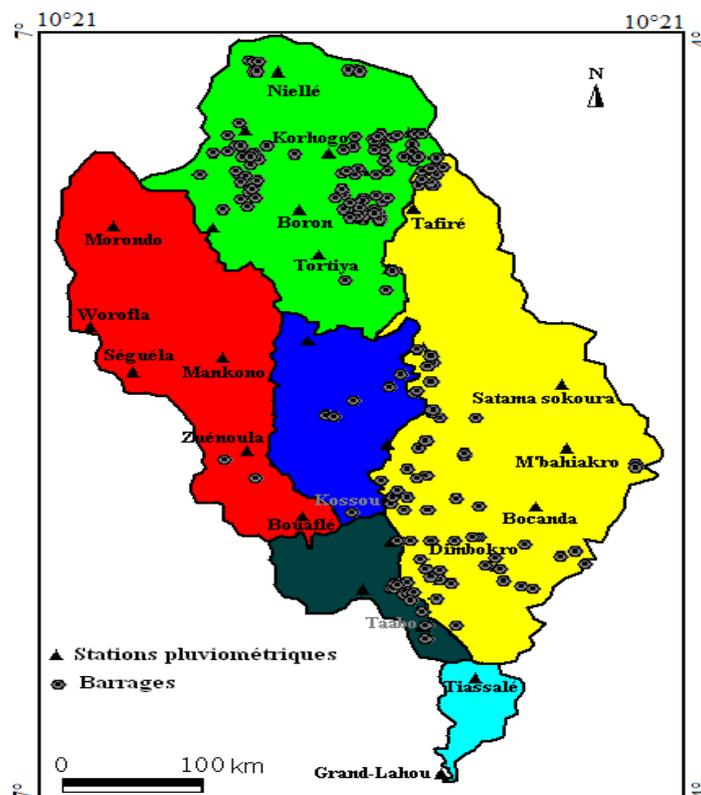


Figure 4 : Stations pluviométriques et barrages au niveau des sous-bassins emboîtés du Bandama

Ainsi les surestimations des débits sont principalement dues aux ouvrages de stockages (barrages) dont les effets sont plus perceptibles durant la saison sèche. Ces aménagements qui sont gérés par des structures privées ou étatiques, permettent aux populations de disposer de l'eau en continu pour l'irrigation de cultures, l'approvisionnement en eau potable et autres activités. Ces barrages à vocation agricoles ou à usages domestiques qui n'ont pas été intégrés dans le modèle ont des répercussions sur la simulation des écoulements des eaux superficielles. Ainsi, le modèle HYDROTEL met en évidence ce qui se passerait si ces ouvrages n'existaient pas, et constitue un outil d'aide aux aménagements hydrauliques en vue d'une gestion efficiente des ressources en eau à l'échelle du bassin versant. 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. Le **Tableau 6** donne trois exemples de combinaisons testées sur la période janvier à décembre 1999 dans le sous-bassin du N'zi à N'zianoa (35340 km²), l'un des sous-bassins de la partie supérieure de l'hydrosystème du Bandama. Les lames d'eau de référence et les coefficients de rugosité ainsi que les profondeurs des couches sont différentes, alors que les coefficients de Nash calculés sont identiques (Nash = 0,95) et les RCEQM sont très proches. Parmi les combinaisons testées, la combinaison 2 donne les plus faibles valeurs d'écart de volume (EV = +1,08 %) avec un critère de Nash = 0,95. Elle simule convenablement le bilan des échanges eau de surface/eau souterraine. Ainsi, le seul critère de Nash ne permet pas d'indiquer la combinaison la plus performante. Les écarts de volume et les RCEQM sont des critères à prendre à compte également dans le calage des modèles hydrologiques (**Tableau 7**).

Tableau 6 : Exemples de combinaisons de paramètres donnant des résultats de simulations identiques dans le modèle HYDROTEL

Paramètres	Combinaison 1	Combinaison 2	Combinaison 3
Hydrogramme géomorphologique			
Lame de Référence	0,0004	0,0008	0,008
Coefficient de Manning			
– Milieu forestier	0,3	0,2	0,3
– Milieu aquatique	0,015	0,01	0,015
– Autres milieux	0,25	0,15	0,15
Paramètres du BV 3C			
Profondeur des couches			
– Couche 1 (m)	0,15	0,5	0,15
– Couche 2 (m)	0,50	2,66	0,50
– Couche 3 (m)	1,50	2,76	2,00
Humidité relative			
– Couche 1 (%)	5	10	20
– Couche 2 (%)	10	20	40
– Couche 3 (%)	20	40	80
Coefficient de récession	10 ⁻⁷	2,5.10 ⁻⁷	5.10 ⁻⁷

Tableau 7 : Résultats des trois combinaisons de valeurs des paramètres dans le bassin du N'zi à N'zianoa (1999)

Types de critères	Combinaison 1	Combinaison 2	Combinaison 3
Nash-Sutcliffe (%)	0,95	0,95	0,95
RCEQM	1,10	1,12	1,12
EV (%)	+12,60	+1,08	+5,55

Les courbes des débits simulés à partir des différentes combinaisons de paramètres sont comparées aux débits observés. L'allure des courbes est concordante (Nash = 0,95). Il y a une très bonne concordance des courbes de débits pour la combinaison 2 qui donne les meilleures estimations de volumes d'eau. Cependant, les pics des crues du mois d'août ne sont pas bien reproduits par les combinaisons 1 et 3. De façon générale, il n'y a pas un seul et unique jeu de paramètres optimal permettant de caler un modèle, mais une famille de solutions qui donne des résultats de qualité similaire. Il faut alors analyser l'équifinalité des jeux de paramètres qui produisent des simulations acceptables de la réponse de l'hydrosystème pour augmenter la fiabilité du modèle en prévision hydrologique [22]. Les nombreux paramètres disponibles dans HYDROTEL rendent difficile l'obtention de la combinaison optimale des valeurs de paramètres. Pendant le calage, le modèle a suffisamment de degrés de liberté pour produire des débits simulés acceptables en comparaison avec les données disponibles. Ce problème reflète aussi un résultat des erreurs de mesure et des incertitudes d'interpolation spatiale et temporelle sur les données elles-mêmes (Figure 5).

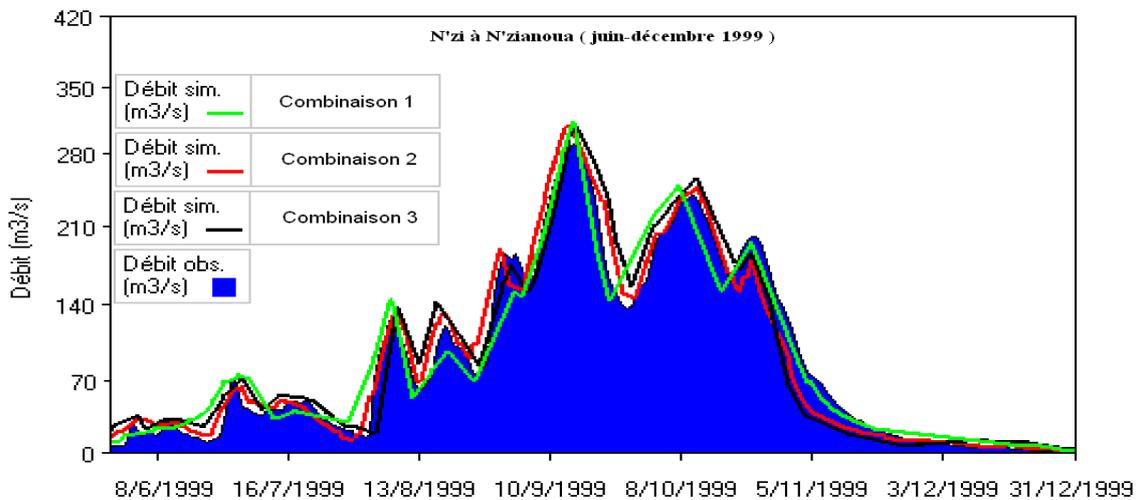


Figure 5 : Exemple d'ajustement montrant des résultats de simulations identiques illustrant l'équifinalité du modèle

6. Conclusion

La modélisation des différents processus du bilan hydrologique a pu être effectuée grâce à la diversité des algorithmes qu'offre le modèle HYDROTEL. Le calage des paramètres du modèle et les validations spatio-temporelles effectués sur le bassin versant du Bandama, à travers les six (06) sous-bassins emboîtés, montrent un synchronisme entre les courbes de débits observés et simulés. Hormis la surestimation des débits simulés en début de saison pluvieuse, il y a une reproduction assez satisfaisante de l'allure des courbes de débits.

Le critère de Nash, la RCEQM et l'EV varient respectivement de 0,72 à 0,95, de 0,75 à 2,18 et de -20,7 à -1,14; et expriment une assez bonne performance du modèle HYDROTEL et son applicabilité en milieu tropical humide. Cependant, les données spatiales (UHRH, occupation du sol, types de sol) et les simplifications apportées au modèle (notamment sur le volet sol) influencent fortement les résultats des simulations. Par ailleurs, Hydrotel ne peut être très bien calibré à partir des seuls débits à l'exutoire. L'une des pistes de recherche en modélisation consiste en une validation multi-variable exploitant non seulement les débits à l'exutoire, mais aussi d'autres variables de contrôle telles que l'humidité du sol, le niveau piézométrique, etc. Une analyse de sensibilité du modèle à ces paramètres et aux diverses données d'entrée s'avère nécessaire pour confirmer l'adéquation du modèle au milieu tropical.

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. Nous remercions particulièrement l'INRS-ETE du Québec (Canada) à travers le Professeur Monique Bernier, pour l'acquisition du modèle HYDROTEL utilisé dans ce travail.

Références

- [1] - V. P. SINGH et D.A. WOOLHISER, Mathematical modeling of watershed hydrology. Journal of Hydrologic Engineering, vol. 7, N° 4, (2002)270-292.
- [2] - 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 the Chaudière watershed. Journal of Hydrologic Engineering, American Society of Civil Engineering, Vol. 6, N° 2, (2001) 100-108.
- [3] - H. CAMUS, Hydrologie du Bandama, Tome 1, « Le Bandama blanc ». Adiopodoumé : ORSTOM, (1972 a) 96.
- [4] - H. CAMUS. Hydrologie du Bandama, Tome 2, « Les affluents du Bandama blanc ». Adiopodoumé : ORSTOM, (1972 b) 96 p.
- [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] - J. P. FORTIN et A. ROYER, Le modèle hydrologique HYDROTEL : bases théoriques. Manuel d'utilisation, Rapport INRS ETE, (2004) 104.
- [7] - K. INDARTO, Découpages spatiaux et conséquences sur le bilan hydrologique. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, (2002) 67-90.
- [8] - J. ANDERSEN, J. C. REFSGAARD et K. H. JENSEN, Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin : model construction and validation. Journal of Hydrology, vol. 247, (2001) 200-214
- [9] - J. E. NASH et J. E. SUTCLIFFE, River flow forecasting through conceptual models. 1 - A discussion of principles. Journal of Hydrology, vol. 10, (1970) 282-290.
- [10] - P. MATGEN, J. B. HENRY, F. PAPPENBERGER, P. DE FRAIPON, L. HOFFMAN, et L. PFISTER, Uncertainty in calibrating flood propagation models with flood boundaries derived from Synthetic Aperture RADAR imagery. pp. 352-358. In Actes of 20th Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 12-23 Juillet 2004, Istanbul, Turkey, (2004) 2012

- [11] - F. PAPPENBERGER, I. IORGULESCU et K. J. BEVEN, Sensitivity analysis based on regional splits and regression trees (SARS-RT). *Environ. Modelling & Software*, vol. 21, n° 7, (2006) 976-990.
- [12] - K. J. BEVEN et A. B. BINLEY, The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol. Proc.*, vol. 6, n° 3, (1992) 279-298.
- [13] - A. M. KOUASSI, Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. Thèse Unique, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, (2007) 210.
- [14] - 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 agrico-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, (2008) 113-116.
- [15] - M. AMESSAN, F. K. KOUAME, T. LASM, B. V. H. N'GUESSAN, K. AKA et J. BIEMI, Modélisation et Simulation des écoulements de surface dans le bassin versant du Bandama blanc : utilisation d'un modèle distribué (HYDROTEL). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, Vol. 11 N° 2014, (2014) 457-470.
- [16] - G. C. R. ADON, Évaluation des potentialités en eau de l'hydrosystème de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire) : Apports des données géospatiales, du modèle hydrologique HYDROTEL et de l'analyse multicritère. Thèse unique, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, (2015) 151.
- [17] - C. S. MELCHING, Reliability Estimation In: V. P. Shing, (ed.), *Computers models of watersheds hydrology*, Waters Resources Publication, Baton R, USA, (1995) 69 - 118.
- [18] - 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. 12^e congrès de l'AQT, Chicoutimi, (2005) 27.
- [19] - K. F. KOUAME, Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne humide et semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des Systèmes d'Informations Géographiques et du modèle hydrologique HYDROTEL, Thèse d'Etat ès sciences naturelles, Université de Cocody, (2011) 379.
- [20] - R. GRAYSON, I. MOORE et 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.
- [21] - R. GRAYSON et G. BLÖSCHL, *Spatial modelling of catchments dynamics*. Cambridge University Press, (2000) 51-81
- [22] - K. J. BEVEN, Chapter 18 : "TOPMODEL" Computer models of watershed hydrology, Singh V. P., ed. *Water resources publication*, Littleton, Colo, (1995)