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)

Koffi Fernand KOUAMÉ[1,4*], Monique BERNIER[2], Droh Lanciné GONÉ[3], Mahaman Bachir SALEY[1,4], René LEFÈBVRE[2], Nagnin SORO[4] et Aimé KOUDOU[4]

1) Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Université de Cocody, 22 B.P. 801, Abidjan 22, Côte d'Ivoire.
Téléphone/télécopieur : (225) 22-445-270 ; courriels : kouamef@yahoo.fr ; basaley@yahoo.fr
2) Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement, 490, rue de la Couronne, Québec (Québec), Canada G1K 9A9.
Téléphone : (418) 654 2585; télécopieur : (418) 654 3500 ; courriels : monique_bernier@ete.inrs.ca ; rene_lefebvre@ete.inrs.ca
3) Laboratoire Géosciences et Environnement, Université d'Abobo-Adjamé, 02 B.P. 802, Abidjan 02, Côte d'Ivoire.
Courriel : dialou25_9@yahoo.fr
4) Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), Université de Cocody, 22 B.P. 801, Abidjan 22, Côte d'Ivoire.
Téléphone/télécopieur : (225) 22-443-500 ; courriels : soro_nagnin@yahoo.fr ; kdaime@yahoo.fr

Soumis le 13 mars 2007 ; révisé le 5 juin 2007 ; accepté le 5 septembre 2007- © *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 217-235

Résumé

Le modèle hydrologique distribué HYDROTEL est appliqué au bassin versant du fleuve N'zo (7 350 km^2) 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 (15 postes pluviométriques et 4 stations hydrométriques) enregistrées de 1981 à 2000. Le calage des paramètres du modèle est effectué à l'aide des données de débits (observés et simulés) des années hydrologiques 1987 et 1995. 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 0,91, preuve de la bonne performance et de l'applicabilité du modèle HYDROTEL en milieu tropical. Les écoulements sont en baisse continue, comme la pluviométrie, jusqu'en 1993 et font ressortir l'impact de l'instabilité du climat sur la disponibilité des ressources en eau. 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, les variabilités climatiques et le régime hydrologique du N'zo.

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

Combining geospatial data in a distributed hydrological model for simulating streamflows in a humid tropical region of Côte d'Ivoire (West Africa)

The distributed hydrological model HYDROTEL is applied to the N'zo watershed (7 350 sq km), located in the humid tropical region of Côte d'Ivoire to simulate streamflows and determine the water balance (exchanges between surface and underground reservoirs). The geospatial database is composed of raster data (digital elevation model, land use, soils types), vector data (river network, watershed boundary, hydrometeorological stations location) and attributes tables associated with the geographical data. The data integration in a geographical information system allowed physiographical discretization and the determination of relatively homogeneous hydrological units on which spatial heterogeneities of watershed surface states (types of soil and land use) are taken into account. Then, hydrological modelling is performed by using the in situ hydrometeorological data (15 rainfall stations and 4 streamflow stations) collected from 1981 to 2000. Calibration of the model parameters is based on observed and simulated streamflows for 1987 and 1995. Spatial and temporal validations of the calibration show a concordance between streamflows observed and simulated. The Nash criterion varies from 0.72 to 0.91, proof of the good performance and the applicability of the HYDROTEL model in a tropical environment. The streamflows are continually falling as the rainfall until 1993 and show the impact of the climate instability on water availability. The integration of environmental modifications (land cover changes) in the HYDROTEL model will permit the analysis of the interrelations between surface state modifications, climatic variability and the hydrological responses of the N'zo.

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

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 (Singh, 1997). 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 (Dupont *et al*., 1998). 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 des dernières décennies, de nombreux modèles hydrologiques (Singh and Woolhiser, 2002) 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 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 efficiente des informations dérivées. Par ailleurs, les progrès scientifiques réalisés dans le domaine de l'informatique ont grandement contribué à l'essor de la modélisation mathématique des hydrosystèmes (Singh and Woolhiser, 2002).

La télédétection est utilisée pour la cartographie des différentes propriétés des surfaces continentales et, de ce fait, permet d'améliorer la représentation spatiale des variables et des flux hydrologiques dans un hydrosystème (Schmugge, 2002 ; Pietroniro and Leconte, 2005). Les caractéristiques d'émission ou de réflectance des surfaces terrestres à différentes longueurs d'onde peuvent être corrélées aux variables d'intérêt, telles que la couverture végétale, la température de surface, l'humidité du sol et la couverture neigeuse (Bonn et Rochon, 1992). L'exploitation des images de télédétection (optique et radar) en fonction de leurs dimensions spatiale, spectrale et temporelle permet d'identifier diverses variables physiographiques et hydrométéorologiques pouvant influencer le cycle de l'eau dans l'hydrosystème.

Les SIG, eux, 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, la fracturation, l'hydrographie, 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. Certains modèles distribués sont très complexes, comme les modèles à base physique SHE (Abott *et al.*, 1986), MIKE-SHE qui en découle (Refsgaard and Storm, 1995), THALES (Grayson *et al.*, 1992) ou PMRS (Leavesley and Stannard, 1995) qui cherchent à représenter le plus finement possible le comportement du bassin réel, en tant que système continuellement en évolution par rapport aux variables de temps et d'espace. 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.

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 (Grayson *et al.*, 1992). Cependant, des modifications et des adaptations des algorithmes interviennent parfois pour rendre flexible ces types de modèles. Anderssen *et al.* (2001) ont proposé une version modifiée de MIKE-SHE (Refsgaard and Storm, 1995), particulièrement adaptée à l'étude des eaux de surface, alors que le volet concernant les eaux souterraines (modèle conceptuel à réservoir) est considéré comme moins important dans la modélisation hydrologique du fleuve Sénégal (375 000 km^2). La représentation des processus hydrologiques en zone tropicale est non seulement fonction des échelles de temps et d'espace (Lebel and Vischel, 2005), mais aussi des données d'entrée qui sont disponibles. Les modèles hydrologiques distribués comme ANSWERS (Connolly *et al.*, 1997), TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979), CEQUEAU (Morin *et al.*,1981) et HYDROTEL (Fortin *et al.*, 1986, 2001a) 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 N'zo, à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Cet hydrosystème a un climat de type tropical humide (1 600 mm/an de pluie) avec une influence des chaînes montagneuses des Dan et des Toura. À l'instar des régions d'Afrique de l'Ouest et Centrale (Janicot et Fontaine, 1993 ; Paturel *et al.*, 1998 ; Le Barbé *et al.*, 2002), la Côte d'Ivoire a été affectée par la sécheresse persistante et sévère de 1970 à 1990 (Servat *et al.*, 1998 ; Ardoin, 2004). Cette sécheresse sans équivalent dans le monde, qui s'est prolongée jusqu'en 2002 au Sahel (Lebel and Vischel, 2005), a eu un impact sur les ressources en eau (Savané *et al.*, 2001 ; Kouamé et Biémi, 2001 ; Goula *et al.*, 2005) et influencé les modifications environnementales (Brou, 2005 ; Bigot *et al.*, 2005) 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. 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 N'zo. Le modèle hydrologique HYDROTEL, qui a montré son potentiel en simulation et en prévision hydrologiques sur des bassins versants au Canada (Fortin *et al.*, 2001b) et en France, n'est pas encore testé en Afrique soudano-guinéenne humide. HYDROTEL est disponible au Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT, Université de Cocody). Son interface conviviale et les données d'entrées facilement disponibles ainsi que les formulations simples des équations (algorithmes à base physique, conceptuels ou empiriques) décrivant les processus hydrologiques justifient son choix. Ainsi donc, le modèle HYDROTEL pourrait être adapté pour la modélisation du bassin versant du N'zo afin : 1) de tester son applicabilité en milieu tropical humide ; 2) de simuler les écoulements des eaux ; 3) d'établir le bilan des échanges entre les réservoirs de surface et souterrains ; 4) de caractériser l'impact de la variabilité hydroclimatique sur l'hydrologie du fleuve N'zo de 1981 à 2000.

2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

Le fleuve N'zo prend sa source au niveau des chaînes montagneuses des Dan et des Toura de l'ouest de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). Il s'écoule dans la direction nord-sud, avant de se jeter dans le fleuve Sassandra, l'un des plus grands fleuves du pays. Le bassin versant du N'zo (7 350 km^2) est situé entre les longitudes 7° 18' et 8° 05' ouest et les latitudes 6° 17' et 7° 45' nord (figure 1a). Cet hydrosystème occupe une place très importante dans la vie socio-économique de l'Ouest ivoirien, car il participe à l'approvisionnement en eau des villes de Man et de Guiglo (principales villes du bassin), à l'irrigation et à la pêche. Un barrage est construit dans les environs de la ville de Buyo, depuis 1980, pour la production d'électricité.

L'orographie très contrasté du bassin (figure 1b) présente un Nord montagneux (19 %) avec des altitudes dépassant parfois les 1 000 m, opposé à de vastes plateaux au sud occupant les 4/5 du bassin (81 %). La couverture végétale est constituée, par endroits, d'îlots de forêts denses (forêts tropicales humides guinéennes), constituants des aires protégées dont la périphérie ou le coeur est dégradé par le biais des activités anthropiques (développement de cultures de rentes et installation de campements agricoles illégaux). La forêt tropicale guinéenne et la mosaïque de forêts et cultures représentent 62 % de la superficie du bassin, le reste étant occupé par la forêt claire et les aires sous l'emprise humaine.

Le bassin versant du N'zo est sous l'influence du climat tropical humide (1 600 mm/an), caractérisé par une longue saison pluvieuse qui dure 8 mois et une saison sèche de 4 mois. La baisse généralisée de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest s'y fait également ressentir (Goula *et al.*, 2005). Les périodes à très forte pluviométrie, initialement de 4 mois, se sont réduites à 2 mois après 1966, année de rupture pluviométrique (Savané *et al.*, 2001), de sorte que la région se trouve confrontée au problème de la gestion de l'eau.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1. Présentation du modèle hydrologique distribué HYDROTEL

HYDROTEL est un modèle hydrologique distribué permettant de simuler les écoulements des eaux en mode continu, développé à l'INRS Eau, Terre et Environnement du Canada depuis 1985 (Fortin *et al.*, 1986, 2001a). Ce modèle permet l'intégration de divers types de données provenant de la télédétection et des SIG : 1) données géographiques matricielles (modèle numérique d'altitude – MNA, occupation des terres, catégories de sols), vectorielles (réseau hydrographique, limite de bassin versant, localisation des stations hydrométéorologiques) ; 2) données attributaires associées aux données géographiques ; 3) données de modélisation (conditions aux limites, paramètres de calage, unités de calculs, etc.).

HYDROTEL est formé de deux modules dont le premier, dénommé PHYSITEL (Fortin *et al.*, 1990) est utilisé dans la création de la base de données géospatiales (physiographiques) servant à la modélisation hydrologique. À l'aide de ce module, la discrétisation spatiale des données physiographiques aboutit à la caractérisation de la structure interne d'écoulement dans l'hydrosystème. Sur les unités hydrologiques de simulation, PHYSITEL permet d'intégrer les variabilités spatiales des états de surface (couvert végétal, catégories de sols) de sorte que la simulation des processus hydrologiques nécessitant des informations sur l'occupation des terres et les catégories de sols, est répétée pour chaque combinaison de sol et d'occupation des terres (Fortin et Royer, 2004).

La modélisation hydrologique à l'aide du modèle HYDROTEL prend en compte six processus qui interviennent depuis la chute de la pluie jusqu'à l'écoulement dans les rivières (tableau 1). L'évolution du couvert nival est modélisée à l'étape 2. Pour l'appliquer au bassin versant du N'zo, 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.

Les différents processus hydrologiques sont décrits par des algorithmes à base physique, conceptuels ou empiriques décrits dans les travaux de Fortin *et al.* (2001a). Pour chaque processus, HYDROTEL offre le choix entre un ou plusieurs algorithmes en fonction des données d'entrée disponibles. Ceci constitue un atout majeur pour l'applicabilité du modèle HYDROTEL à une gamme étendue de bassins versants.

Tableau 1 : Sous-modèles de simulation des processus hydrologiques du modèle HYDROTEL. *Sub-models for hydrological processes simulation in the model HYDROTEL*

Sous-modèles	Options
1. Interpolation des données météorologiques	1.1. Polygones de Thiessen 1.2. Moyenne pondérée des 3 stations les plus proches
2. Évolution du couvert nival	2.2. Approche mixte (degrés-jours, énergie)
3. Évapotranspiration potentielle	3.1. Thorntwhaite 3.2. Hydro-Québec 3.3. Linacre 3.4. Penman 3.5. Priestley-Taylor
4. Bilan vertical	4.1. CEQUEAU 4.2. BV3C
5. Écoulement sur la partie terrestre	5.1. Équation des ondes cinématiques
6. Écoulement dans le réseau hydrographique	6.1. Équation des ondes cinématiques 6.2. Équation des ondes diffusantes

3.2. 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 TM de Landsat (images 198-55/56) et ont été acquises le 7 janvier 1986, 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 Man et de Guiglo à 1 : 200 000, les MNA produits à l'aide des données de la Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) d'une résolution de 90 m (Farr and Kobrick, 2000) et la carte pédologique à 1 : 500 000 établie par Perraud (1971) sont utilisés. Parmi ces données, le MNA, qui est la représentation du relief, constitue la donnée principale permettant l'identification du sens d'écoulement des eaux. Pour les échanges verticaux, les données sur les catégories de sols servent à la description de la texture des sols ainsi qu'à la caractérisation des propriétés hydrauliques associées (Rawls and Brakensiek, 1989).

Pour prendre en compte les variabilités spatiale et temporelle du climat, les données hydrométéorologiques, au pas de temps journalier, recueillies *in situ* de 1981 à 2000 (20 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 15 stations pluviométriques (figure 2a), dont 4 sont situées à l'intérieur du bassin versant et le reste dans ses environs. Toutes les stations situées à l'ouest se trouvent à l'extérieur du bassin, la répartition n'étant pas uniforme. Sur l'ensemble du bassin versant, il y a une station pour environ 500 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), quatre stations sont réparties dans deux sous-bassins (figure 2b) : deux sur le Kô (principal affluent) à Man (203 km^2) et à Logoualé (1 511 km^2) et les deux sur le cours principal du N'zo, à Zoba (1 087 km^2) et à Kahin (4 283 km^2). L'exutoire principal à Guiglo (7 350 km^2) n'est plus jaugé depuis la construction du barrage de Buyo.

Les états de surface et le climat étant variables, une modélisation spatialisée permettra de prendre en compte les variabilités spatiale et temporelle des processus hydrologiques au sein du bassin, d'où le choix du modèle distribué HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001a).

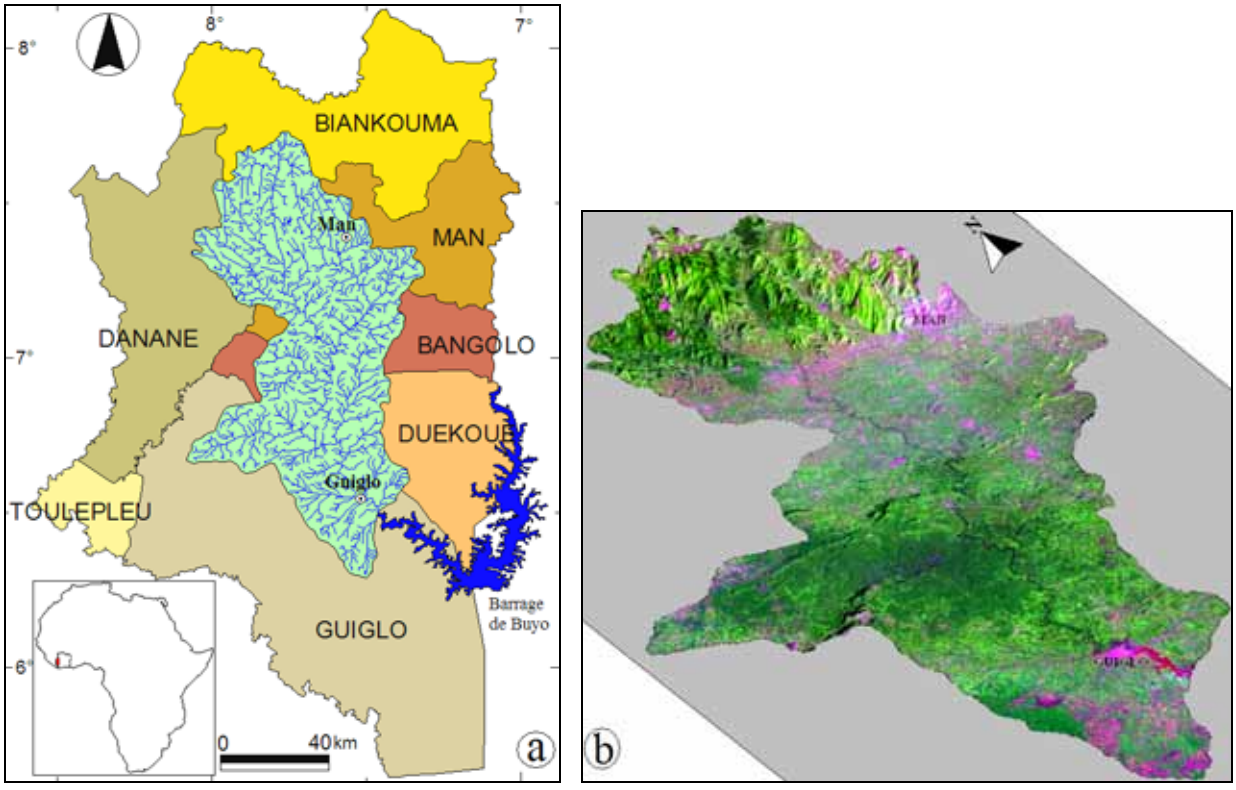


Figure 1 : Présentation du bassin versant du N'zo : a) Situation géographique ; b) Aperçu 3D de la morphologie du bassin (MNA drapé par une composition colorée en RVB des bandes TM 5, 4, 3). *Presentation of the N'zo watershed : a) Geographical location ; b) 3D preview of the basin morphology (DEM draped by a RGB colour composite of bands TM 5, 4, 3)*

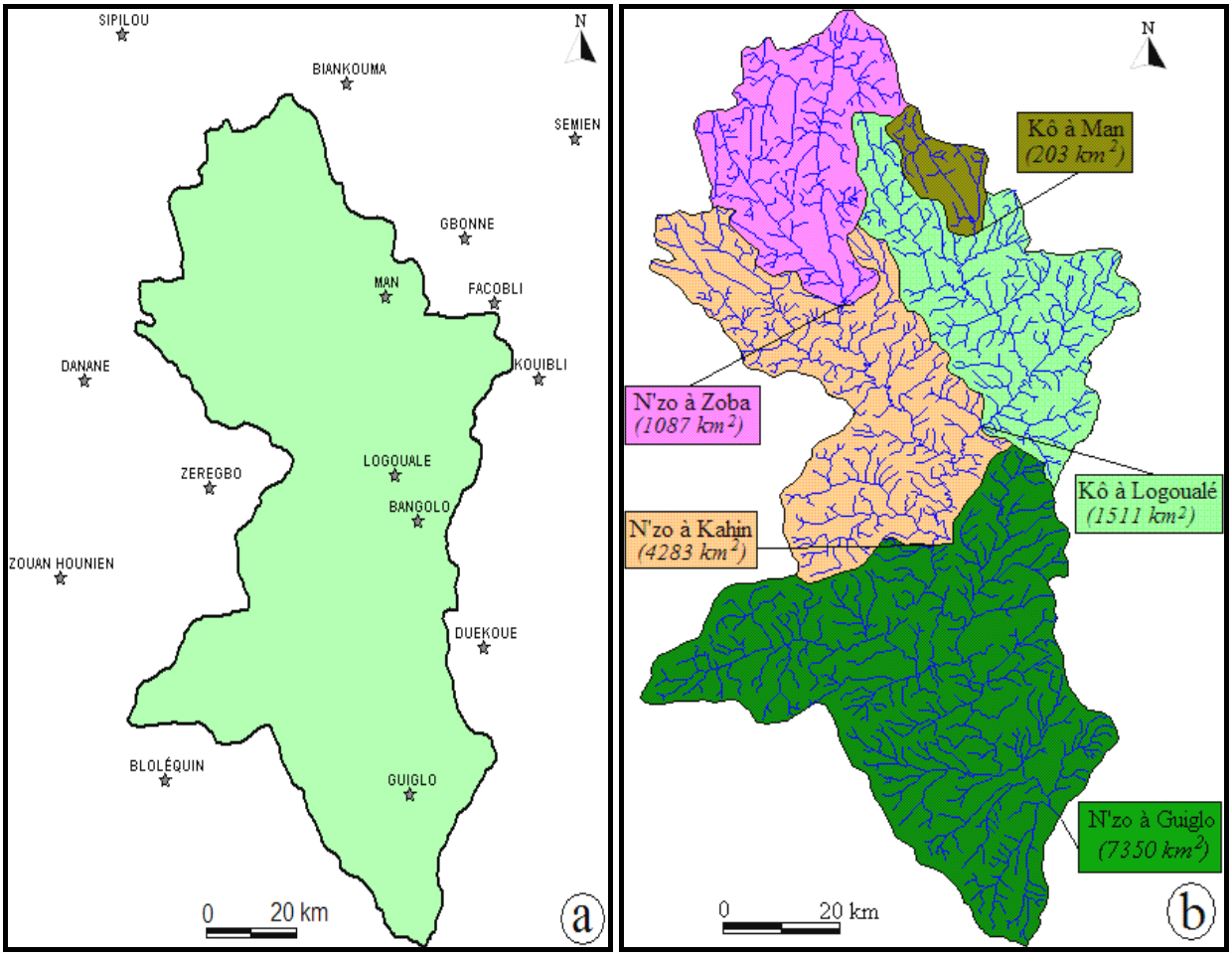


Figure 2 : Données hydrométéorologiques du bassin du N'zo : a) Stations météorologiques ; b) Stations hydrométriques et sous-bassins associés (surface amont). *Hydrometeorological data of the N'zo watershed : a) Meteorological stations ; b) Streamflow stations and associated sub-watershed (upstream area)*

3.3. Application du modèle HYDROTEL au bassin versant du N'zo

3.3.1. Discrétisation spatiale du bassin en des unités hydrologiques de simulation

La topographie a un rôle moteur dans les processus d'écoulement, de sorte que la plupart des modèles spatialisés, dont SHE, MIKE-SHE, TOPMODEL et HYDROTEL, sont basés sur l'utilisation des MNA. À partir des courbes de niveau, équidistantes de 40 m, relevées sur les cartes topographiques à 1 : 200 000 de Man et de Guiglo, un premier MNA du bassin versant du N'zo a été construit au pas de 50 m. Le deuxième provient des données SRTM de résolution de 90 m. Ce dernier présente la même configuration que le premier dans le nord où le relief montagneux est bien décrit sur les deux supports. Cependant, dans le secteur des plateaux, au sud (81 % du territoire), les données SRTM sont les seules qui permettent de représenter de façon fine et détaillée les variations topographiques du bassin versant du N'zo. Le MNA provenant des données SRTM a donc été retenu pour sa finesse et pourra être utilisé pour le calcul des sens d'écoulement des mailles et l'identification des unités de simulation.

Le maillage carré initial du MNA (90 m) est utilisé dans la modélisation physiographique pour dériver les attributs topographiques, tels les pentes et les orientations. Dans les zones à pentes faibles et très faibles, comme c'est le cas pour environ les 4/5 du territoire (zone de plateau au sud), Turcotte *et al.*, (2001) préconisent le couplage du réseau hydrographique au MNA (approche par adéquation du MNA avec un réseau hydrographique imposé) pour identifier la structure interne d'écoulement. À partir des cartes topographiques à 1 : 200 000 de Man et de Guiglo, le réseau hydrographique a été numérisé (figure 3a), pour être ensuite intégré dans la modélisation physiographique. Cela a

permis de représenter la sinuosité des cours d'eau et de mieux définir leur parcours afin de construire un réseau de drainage plus proche de la réalité (figures 3b etc) et de modéliser les structures d'écoulement sur l'ensemble du bassin.

Pour simuler le déplacement de l'eau sur le bassin, on a procédé à un regroupement de mailles pour constituer des unités, dont l'exutoire est un point de confluence du réseau hydrographique (sous-bassins liés au réseau hydrographique). Ces unités hydrologiques sont plus grandes que les mailles de discrétisation physiographique définies à partir du MNA et sont homogènes vis-à-vis du devenir des écoulements dans la rivière. Les altitudes et les pentes moyennes attribuées à ces sous-bassins représentent approximativement celles de chacune des mailles constitutives, d'où leur nom d'unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH).

Dans le bassin versant du N'zo, 1 700 UHRH ont été identifiées (figure 4). Sur chacune des UHRH, les catégories de sols et d'occupation des terres sont variables pour des raisons à la fois physiques, biologiques et anthropiques, et peuvent entraîner localement l'apparition ou la disparition de certains processus hydrologiques. Il faut alors intégrer les données des couches d'informations sur les états de surface pour mieux représenter les processus hydrologiques mis en jeu.

3.3.2. Intégration de l'hétérogénéité des états de surface dans chaque UHRH

Les UHRH admettent sur chaque unité plus d'une catégorie de sols et d'occupation des terres. Ceci conduit à la perte d'homogénéité pour prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des états de surface dans la modélisation des processus hydrologiques.

L'occupation des terres a été obtenue à partir de la classification dirigée par la méthode de maximum de vraisemblance des compositions colorées RVB des bandes TM3, 4 et 5 et des trois premières composantes provenant de l'analyse en composantes principales. Sept classes ont été identifiées sur la base de leurs caractéristiques d'albédo, d'indice foliaire, de hauteur de la canopée et de profondeur racinaire (figure 5a) : forêt dense, forêt faiblement dégradée, forêt fortement dégradée, forêt claire, cultures, sols nus/urbains et eau. Ces classes ont des comportements hydrologiques différents. Pour valider les résultats provenant de la classification, la carte du bilan forestier (CCT, 1994), complétée par des relevés sur le terrain a été utilisée. La précision globale de la classification (84 %) est jugée satisfaisante. Cependant, les classes de forêt claire (29 %) et de forêt fortement dégradée (5 %) présentent une confusion à cause de leurs réponses spectrales proches au cours de la saison sèche, où il y a une défeuillaison de la plupart des arbres.

Sur les UHRH, les catégories d'occupation des terres sont évaluées en fonction de leur pourcentage. La répartition des différentes classes au niveau de chaque UHRH (figure 5b) est évaluée et, ensuite, elle est prise en compte dans la simulation des processus hydrologiques, notamment l'évaporation, la transpiration et les écoulements de surface et souterrain.

Au niveau de chaque UHRH, les flux horizontaux et verticaux sont liés à la nature perméable ou imperméable des sols. Dans le bassin versant du N'zo, les sols sont de type ferrallitique moyennement ou fortement désaturé (Aubert et Segalen, 1966 ; Perraud, 1971), chimiquement pauvres, mais avec des profils profonds et perméables, constitués schématiquement de quatre horizons. Une classification texturale (composition en sable, limon et argile) des sols décrits par Perraud (1971) est réalisée à l'aide du triangle de texture de l'USDA (United States Department of Agriculture). Ensuite, la carte de texture des sols est établie avec une résolution spatiale de 90 m pour la rendre cohérente à la maille de discrétisation physiographique.

Afin de simplifier, c'est la catégorie de sols dominants dans chaque UHRH qui est retenue (figure 6). La variation de la texture en fonction de la profondeur n'est pas prise en compte. En l'absence de mesures *in situ*, les propriétés hydrauliques mesurables (conductivité hydraulique, humidité, capacité au champ et au point de flétrissement, etc.) ont été déterminées à partir des travaux de Rawls et Brakensiek (1989).

3.3.3. Modélisation hydrologique du bassin versant du N'zo

La modélisation hydrologique avec HYDROTEL (version adaptée au milieu tropical humide) comporte cinq étapes qui interviennent depuis la chute de la pluie jusqu'à l'écoulement sur les surfaces terrestres et dans les cours d'eau du bassin (figure 7). Les calculs des processus hydrologiques et des flux sont faits au niveau des UHRH, les entrées de chaque UHRH provenant de l'UHRH amont et des apports latéraux des UHRH connexes (Fortin et Royer, 2004). Pour chacun des processus hydrologiques, HYDROTEL offre le choix entre plusieurs algorithmes en fonction des données d'entrée disponibles pour une option spécifique (tableau 1).

Les données provenant des 15 stations météorologiques du bassin ont été utilisées pour l'interpolation spatiale de la pluviométrie. Pour les pluies de grande extension spatiale, la répartition est homogène et la dispersion spatiale est plus petite que celle des pluies isolées qui se concentrent parfois sur quelques heures. La faible densité du réseau pluviométrique (une station pour environ 500 km^2) fait que la spatialisation des événements pluvieux à partir de la méthode de la moyenne pondérée des trois stations les plus proches constitue une bonne approximation de la réalité, du moins du point de vue, de l'entrée du modèle HYDROTEL. Cette méthode, qui donne une répartition moyenne et plus réaliste des pluies est préférée par rapport à la méthode des polygones de Thiessen.

Au niveau de chaque UHRH, les flux évaporatoires de chaque catégorie de couvert végétal, des sols nus et de l'eau sont liés aux paramètres météorologiques et aux données biophysiques (indices foliaires et profondeurs racinaires). Sur les

cinq algorithmes proposés pour l'estimation de l'évapotranspiration (Thornthwaite, Hydro-Québec, Linacre, Penman et Priestley-Taylor), l'équation de Penman est celle qui demande le plus d'informations météorologiques (pluie, températures, vitesse du vent, insolation relative, pression de vapeur d'eau, etc.). Les équations d'Hydro-Québec et de Thornthwaite sont celles qui en demandent le moins. C'est l'algorithme de Thornthwaite, basé sur l'utilisation des données de températures qui a été sélectionné. Cet algorithme est le plus utilisé en Afrique tropicale pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle et le calcul du bilan hydrologique (Réménieras, 1980) parce que, de façon générale, seules les précipitations et les températures sont mesurées aux stations météorologiques.

Le bilan d'eau vertical permet de séparer, sur chaque UHRH, le lame d'eau qui ruisselle à la surface du bassin de celle qui s'y infiltre (figure 7). Cette opération est effectuée à l'aide du sous-modèle BV3C, qui subdivise le sol en trois couches, dont la profondeur (Z1, Z2 et Z3) et les conditions initiales d'humidité sont déterminées. Au début de chaque pas de temps, l'infiltration (P) en provenance de la pluie est contrôlée par la lame de pluie, 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_j 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_j et de l'évaporation des sols nus pour la couche de surface (Fortin et Royer, 2004).

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 terres. Enfin, les écoulements de surface, de sous-surface, 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.

Une fois que tous les sous-modèles ont été spécifiés, la modélisation des écoulements peut être réalisée. La première étape est le calage du modèle, phase indispensable qui consiste à estimer les paramètres du modèle (Y_{sim}) s'ajustant au mieux à l'échantillon de calage (Y_{obs}). Le calage des paramètres du modèle (épaisseurs des couches, humidités relatives, coefficient de récession, coefficient de rugosité de Manning, indice foliaire, profondeur racinaire, etc.) est effectué à l'aide des débits journaliers observés et simulés à la station de jaugeage de Kahin, pour les années hydrologiques 1987 à 1995. Comme Andersen *et al.* (2001) 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 (Kô à Logoualé et N'zo à Zoba) dans la phase de calage du modèle. Selon ces auteurs, cela permet d'améliorer les résultats de calage.

Une série de vérifications de la performance du modèle a également été entreprise. Pour cela, la validation temporelle du modèle est réalisée pour les années 1983, 1985 et 1999. À la station de jaugeage du Kô à Man (203 km^2), une validation spatio-temporelle est effectuée. Ensuite une vérification du comportement du modèle à long terme est réalisée de 1981 à 1995 (15 ans). Enfin, une prédiction hydrologique est réalisée à l'exutoire du bassin à Guiglo (station non jaugée depuis 1980).

Le critère de Nash (Nash and Sutcliffe, 1970) a été utilisé pour mesurer le degré d'ajustement entre les valeurs observées et simulées pendant le calage et la validation du modèle (équation 1) :

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{obs}} \left(Y_{i_{sim}} - Y_{i_{obs}} \right)^2}{\sum_{i=1}^{n_{obs}} \left(Y_{i_{sim}} - \overline{Y}_{i_{obs}} \right)^2} \qquad (1)$$

où E est le coefficient de Nash ; Yi_{sim} est le débit simulé ; Yi_{obs} est le débit observé ; Yi_{obs} est la moyenne des débits observés ; n_{obs} est le nombre d'observation.

Le critère de Nash prend des valeurs entre -∞ et +1. Lorsqu'il est proche de 1, alors l'accord est meilleur entre la modélisation et l'observation.

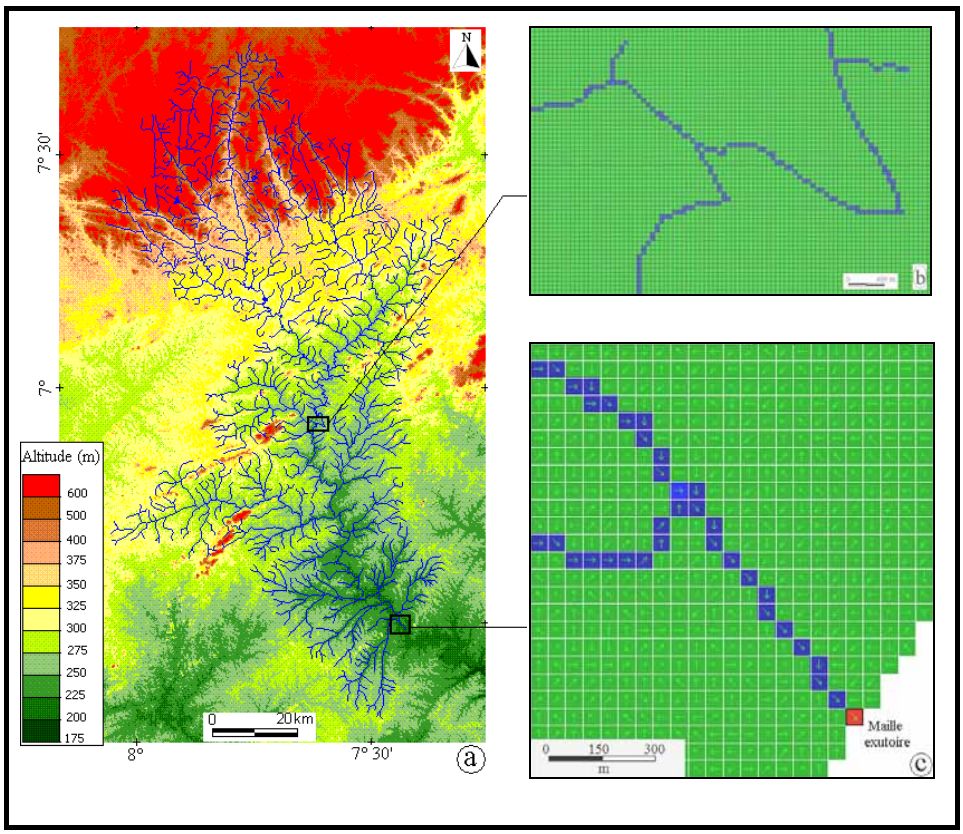


Figure 3 : Discrétisation spatiale du bassin versant du N'zo : a) MNA et le réseau hydrographique imposé ; b) Structure d'écoulement en région plane ; c) Direction d'écoulement à proximité de l'exutoire (en rouge). *Spatial discretization of the N'zo watershed : a) DEM and hydrographic network overlapped ; b) ; Streamflow features in a flat area ; c) Flow orientation near the outlet (in red) of the watershed*

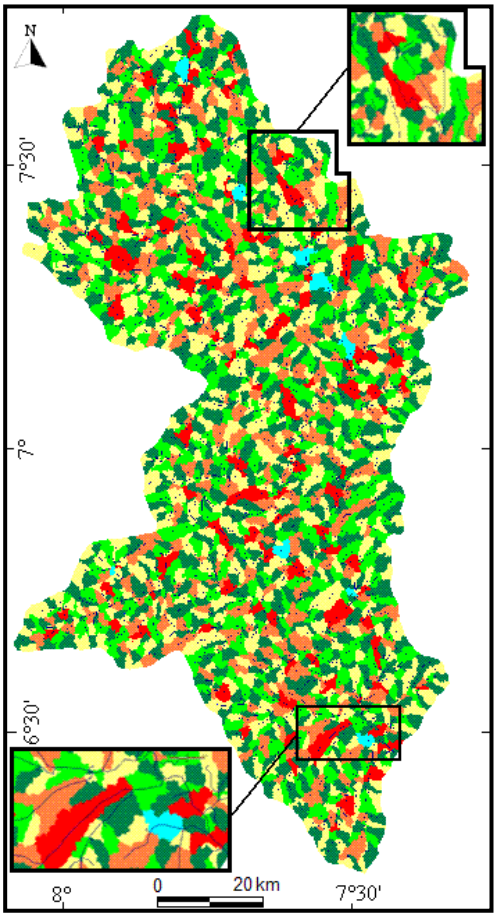
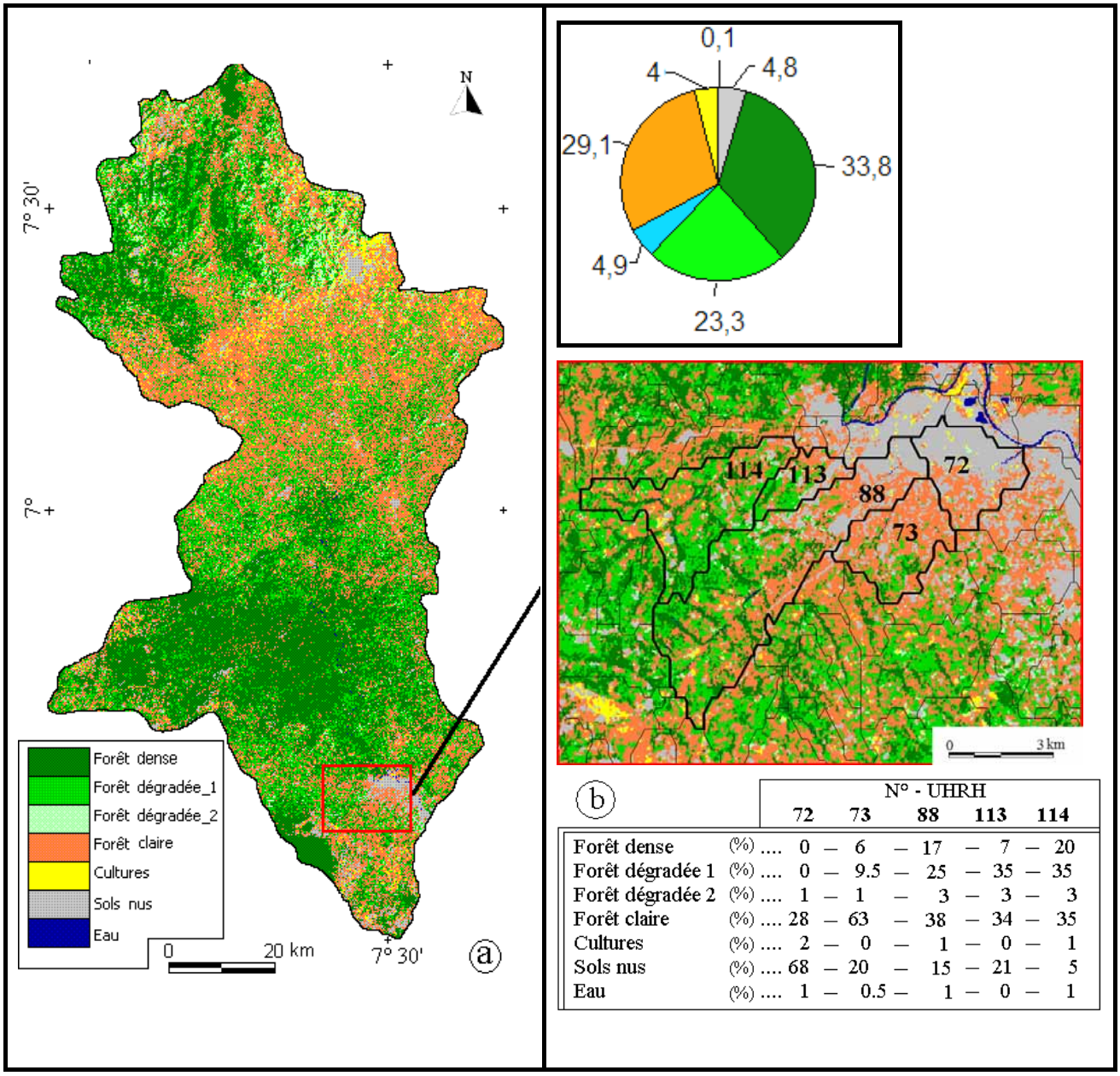


Figure 4 : Unités hydrologiques relativement uniformes (UHRH). *Hydrological units reltively homogeneous (HURH)*



b

		N° - UHRH				
		72	73	88	113	114
Forêt dense	(%)	0	6	17	7	20
Forêt dégradée 1	(%)	0	9.5	25	35	35
Forêt dégradée 2	(%)	1	1	3	3	3
Forêt claire	(%)	28	63	38	34	35
Cultures	(%)	2	0	1	0	1
Sols nus	(%)	68	20	15	21	5
Eau	(%)	1	0.5	1	0	1

Figure 5 : Carte d'occupation des terres provenant de la classification des images TM de Landsat : a) Occupation des terres du bassin du N'zo ; b) Occupation des terres au niveau de quelques UHRH. *Land cover map from Landsat TM image classification : a) Land cover of the N'zo watershed ; b) Land cover for some HURH*

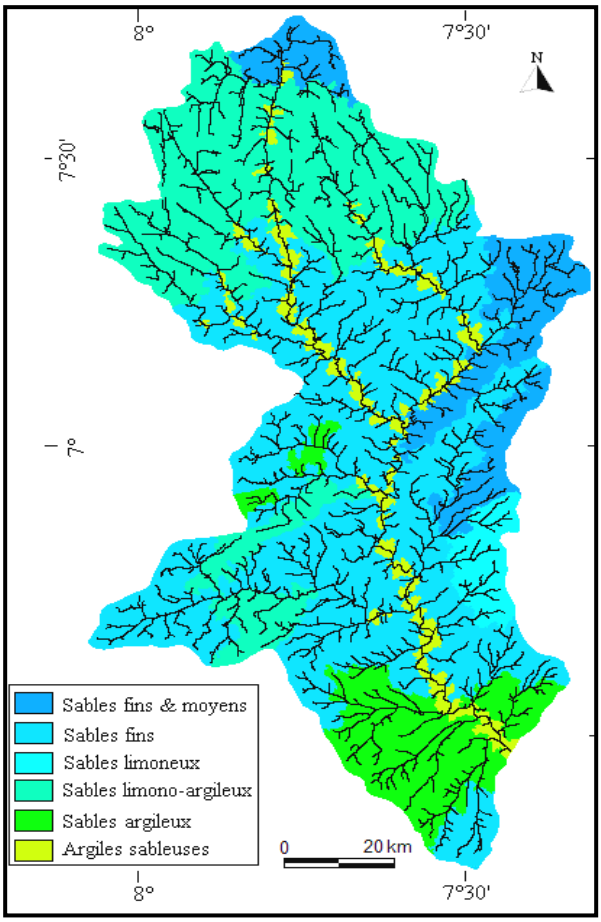
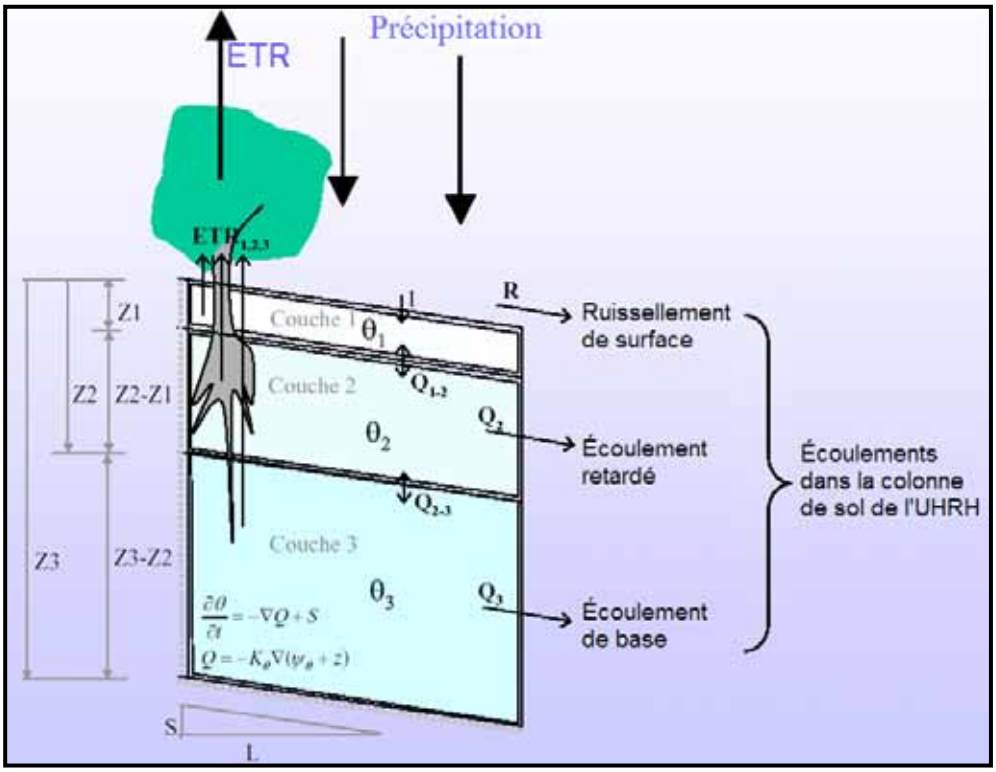


Figure 6 : Carte des textures des sols (texture dominante par UHRH). *Soil texture map (dominant texture by HURH)*



Tiré de Fortin et Royer (2004)

Figure 7 : Processus hydrologiques simulés dans HYDROTEL : version adaptée au milieu tropical humide. *Hydrological processes simulated in HYDROTEL : tropical wet region version*

4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

4.1. Base de données géospatiales et spatialisation des processus hydrologiques

Les données de télédétection et des SIG ont permis d'alimenter la base de données géospatiales du bassin versant du N'zo. Le MNA provenant des données SRTM restitue mieux les détails topographiques (altitudes variant de 200 à 1 000 m) caractérisés par un Nord montagneux opposé aux plateaux du sud. Corrélativement au relief, les pentes sont très abruptes (> 30 %) dans le nord et faibles à modérées dans la zone des plateaux. Cette spécificité du relief entraîne une variabilité de la réponse hydrologique selon que l'on se trouve au nord ou au sud du bassin. C'est pourquoi, la prise en compte du MNA a été importante dans la représentation de la structure interne du bassin versant du N'zo. Les unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH) identifiées sont des sous-bassins liés au réseau hydrographique et sont homogènes vis-à-vis du devenir des écoulements dans la rivière.

L'intérêt évident des UHRH dans l'application du modèle HYDROTEL est double. Premièrement, ces unités ont permis de simplifier la représentation des caractéristiques physiographiques du bassin. Deuxièmement, ces unités permettent de prendre en compte la variabilité spatiale des états de surface (occupation des terres et catégories de sols) afin de représenter les processus hydrologiques à l'échelle des UHRH.

Dans la base de données géospatiales du bassin versant du N'zo, la catégorie de sols dominante au niveau des UHRH constitue le principal facteur qui guide les transferts de flux verticaux et la reconstitution des réservoirs. Quant à l'occupation des terres, elle est répartie entre la forêt (33 %) dense, la forêt claire (29 %), la forêt dégradée (28 %) ainsi que l'eau, les cultures et les sols nus ou les milieux urbains (10 %). La prise en compte de cette variabilité des couverts végétaux au niveau des UHRH a permis d'affiner la représentation du bassin versant.

Toutefois, la base de données constituée dans le cadre de cette étude ne permet pas de prendre en compte la variabilité temporelle de l'occupation des terres qui pourrait permettre de suivre les changements phytogéographiques opérés et leur impact sur les ressources en eau.

4.2. Écoulement des eaux

Les résultats du calage du modèle pour les années 1987 (figure 8a) et 1995 (figure 8b) montrent que les débits journaliers simulés concordent assez bien avec les débits journaliers observés à la station de jaugeage de Kahin. Les lames d'eau observées et simulées sont respectivement de 245 mm et 260 mm (Nash = 0,91). Le critère de Nash indique que le calage est satisfaisant. Ce dernier a été amélioré par les calages effectués sur les stations situées en amont. Ainsi, les paramètres de modélisation utilisés peuvent être retenus pour expliquer le fonctionnement global de l'hydrosytème du N'zo.

Sur la figure 9, les validations spatio-temporelles montrent un bon synchronisme entre les courbes des données observées et simulées. Les processus hydrologiques sont bien reproduits, à quelques exceptions près. Cela exprime la bonne performance et l'applicabilité du modèle HYDROTEL, comme en témoigne le critère de Nash qui varie de 0,72 à 0,91.

Dans l'estimation des débits, des écarts s'observent dans la période allant de mars à fin juin, qui marque le début de la saison pluvieuse. Il y a une surestimation des débits, qui peut être rattachée à l'occurrence de pluies à faible extension spatiale. Ces pluies sont généralement mal mesurées à cause du réseau météorologique assez lâche et non uniforme. 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.

La validation temporelle effectuée à Kahin en 1983 (figure 9a) et en 1985 (figure 9b) montre une bonne estimation des débits, excepté ceux du début de la saison pluvieuse (Nash = 0,84 en 1983 et Nash = 0,89 en 1985). Le coefficient de Nash pourrait être amélioré, si la modélisation porte seulement sur la période pluvieuse.

L'un des atouts de la modélisation mathématique des bassins versants est sans nul doute la possibilité de comprendre le fonctionnement des hydrosystèmes (Fortin *et al.*, 1986 et 1990 ; Turcotte *et al.*, 2001), mais aussi de pouvoir expliquer les faiblesses de certaines simulations.

Sur la figure 9c, on présente la validation spatio-temporelle réalisée sur le sous-bassin du Kô à Man (bassin de 203 km^2). La concordance entre les données simulées et observées est la moins bonne (Nash = 0,72). L'allure des courbes n'est pas synchrone en certains endroits. La crue qui est observée durant le mois de juillet n'a pu être représentée. Par ailleurs, on observe une surestimation sur une partie du cycle hydrologique en août. Ces écarts semblent être dus à un problème d'extrapolation des paramètres de calage. Ils peuvent révéler aussi l'incapacité du réseau de mesure des précipitations à suivre leur répartition spatio-temporelle sur ce sous-bassin. La position en amont du sous-bassin du Kô, avec une seule station pluviométrique à l'intérieur du bassin, l'aspect montagneux (effet gradient lié à l'altitude), l'existence de pentes abruptes et d'un socle fracturé, sont autant de facteurs influençant la simulation hydrologique. L'allure de l'hydrogramme est caractérisée par une fluctuation saisonnière très nette, marquée par des pics (crues), suivie d'une vidange rapide des réservoirs. Les tarissements sont rapides et les quantités d'eau reçue par le biais de la recharge sont rapidement déversées dans les cours d'eau. Ce régime est caractéristique des aquifères très

perméables. En effet, le socle cristallin de la région de Man est très fracturé et la perméabilité induite par les fractures facilite la circulation de l'eau dans les différents aquifères. Les travaux de Kouamé et Biémi (2001) montrent que les réservoirs souterrains sont alimentés par le surplus provenant du bilan hydrologique et les écoulements souterrains se font au droit des méga-fractures interconnectées, parfois à des zones d'accumulation.

Sur la figure 9d, on présente une bonne reproduction des hydrogrammes pour l'année 1999 où les lames d'eau observées et simulées sont respectivement de 504 mm et 522 mm (Nash = 0,88). La simulation des écoulements à la station de Kahin, sur la période de 1981 à 1994 (15 ans), permet de reproduire de façon satisfaisante l'écoulement de l'eau (Nash = 0,78) et de suivre le fonctionnement du bassin à long terme (figure 10a). Il apparaît donc que le modèle HYDROTEL produit des simulations satisfaisantes, malgré les écarts observés en début de saison pluvieuse. La figure 10b est un exemple qui présente la prédiction hydrologique à l'exutoire principal, non jaugé. En effet, l'un des atouts de la modélisation distribuée est la possibilité de prédiction ou de prévision hydrologique.

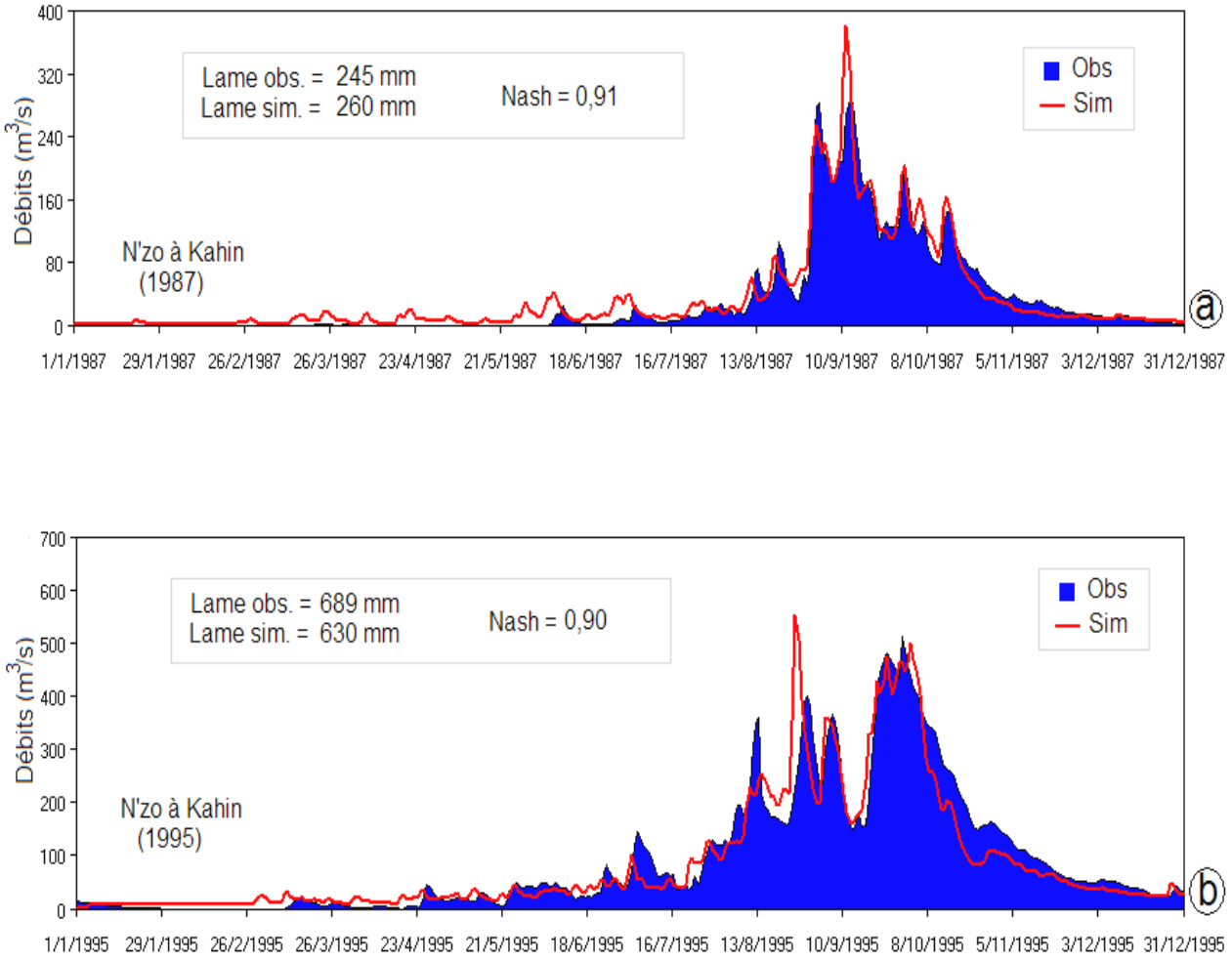


Figure 8 : Débits simulés et observés pour le calage à la station de Kahin : a) janvier-décembre 1987 ; b) janvier-décembre 1995. *Estimated and measured streamflows for calibration at Kahin station : a) January-December 1987 ; b) January-December 1995.*

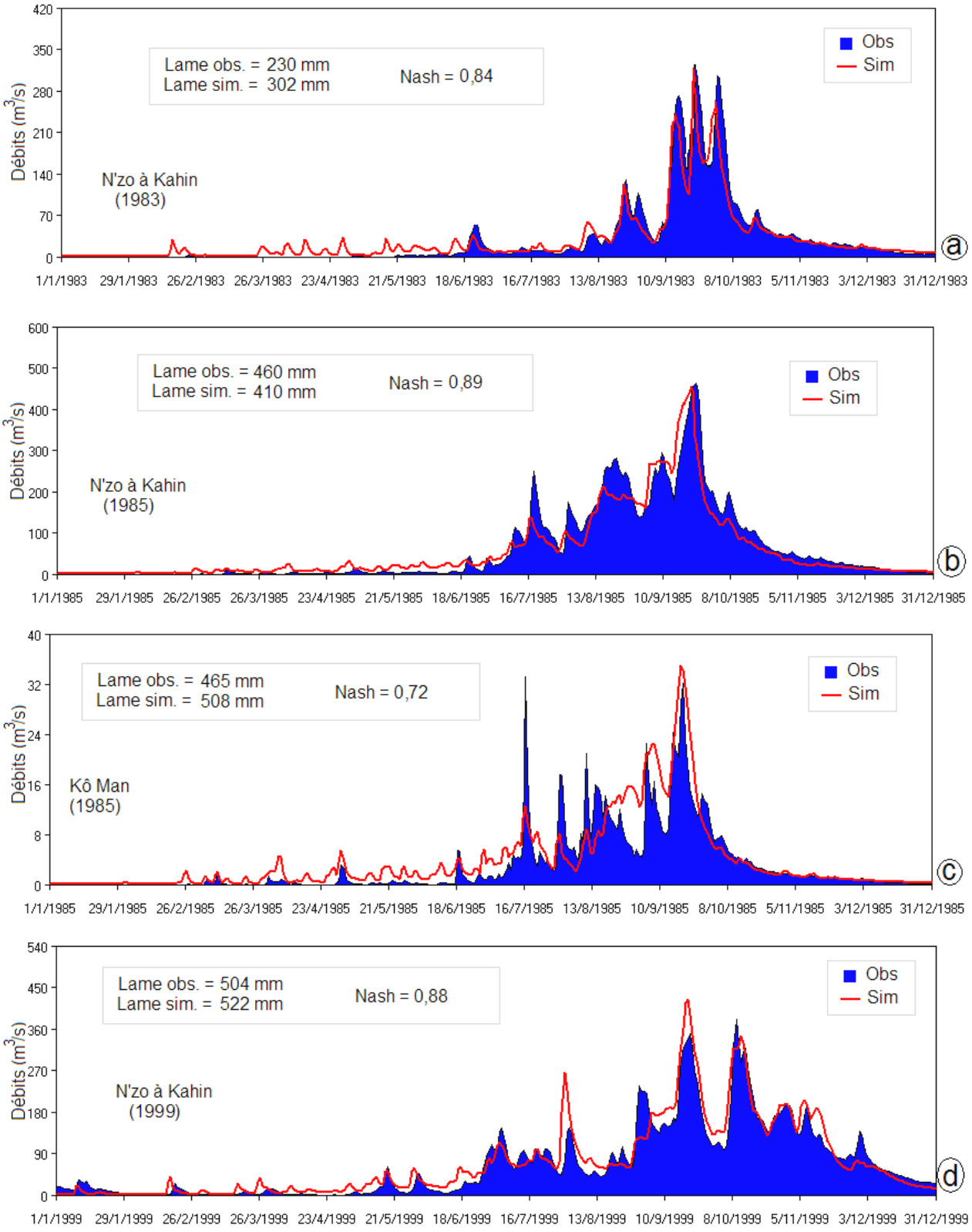


Figure 9 : Débits simulés et observés pour la validation : a) Validation temporelle en 1983 ; b) Validation temporelle en 1985 ; c) Validation spatio-temporelle en 1985 (Kô à Man) ; d) Validation temporelle en 1999. *Estimated and measured streamflows for validation : a) Temporal validation in 1983 ; b) Temporal validation in 1985 ; c) Spatial and temporal validation in 1985 (Kô at Man) ; d) temporal validation in 1999*

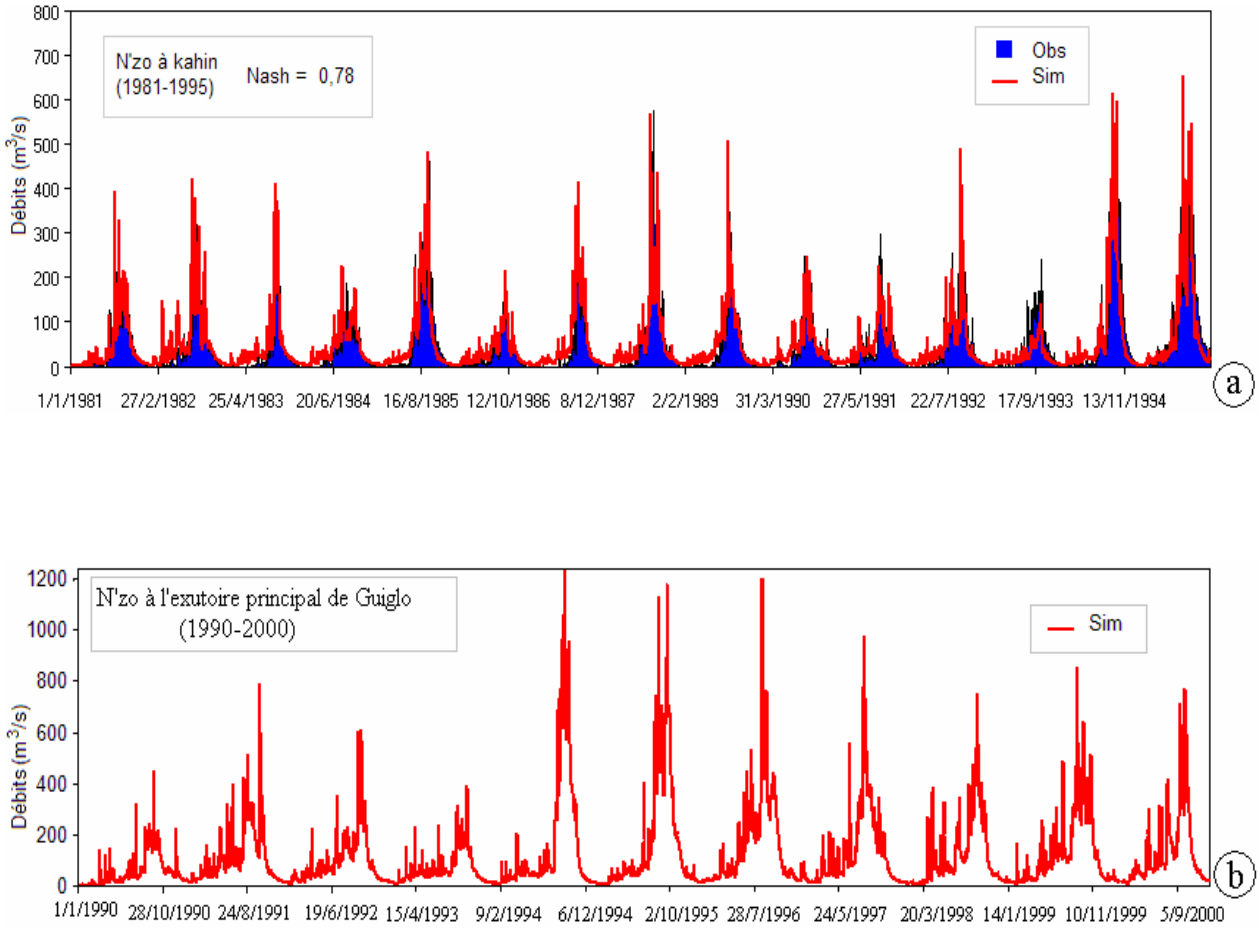


Figure 10 : Débits simulés et observés à long terme : a) Validation spatio-temporelle de 1981-1990 (N'zo à Kahin) ; b) Débits prédits à l'exutoire principal de Guiglo (7 350 km^2). *Estimated and measured streamflows for long term : a) Spatial and temporal validation from 1981 to 1990; b) Predicted streamflows at the main outlet of Guiglo (7 350 km^2)*

4.3. Bilan hydrologique et recharge des réservoirs souterrains

Sur le tableau 2, on présente le bilan hydrologique annuel, calculé avec le modèle HYDROTEL de 1986 à 1995. La pluviométrie annuelle varie de 1 156 à 1 957 mm. Celle-ci se répartit entre l'évaporation, l'écoulement dans les rivières et la recharge des réservoirs souterrains. L'estimation de l'évapotranspiration est très importante à double titre : ses effets instantanés et ses effets cumulatifs dans le temps sur l'humidité du sol. Ainsi, la spatialisation des termes du bilan sur le bassin versant revêt une importance particulière et constitue un résultat prometteur pour la gestion des ressources en eau du bassin versant du N'zo. Dans HYDROTEL, le sous-modèle BV3C a permis de faire la répartition de l'eau entre le ruissellement et la recharge des réservoirs. Sur le bassin versant, les débits présentent des valeurs inférieures à la moyenne (380 mm) jusqu'en 1993. Au cours de la période sèche (1986-1993), les écoulements représentent environ 15 à 20 % des précipitations, le reste étant fortement évaporé. La recharge des aquifères du socle cristallin et cristallophyllien varie de 51 à 89 mm.

La remontée des écoulements est amorcée à partir de 1994, alors qu'une hausse de la pluviométrie est observée dans l'ouest de la Côte d'Ivoire (Kouamé et Biémi, 2001 ; Goula *et al.*, 2005). Le niveau des écoulements atteint 30 % des précipitations et la recharge des aquifères dépasse 100 mm.

Tableau 2 : Bilan hydrologique dans le bassin versant du N'zo (1986-1995). *Hydrological balance in the N'zo watershed (1986-1995)*

Années	**Sèches**								**Humides**	
	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Pluie (mm)	1 355	1 518	1 662	1 551	1 539	1 461	1 530	1 156	1 823	1 957
Écoulement (mm)	203	245	454	309	252	298	371	271	626	689
Déficit d'écoulement (mm)	1 152	1 273	1 208	1 242	1 287	1 163	1 159	885	1 197	1 268
ETR (mm)	1 071	1 222	1 123	1 167	1 198	1 082	1 072	814	1 089	1 154
Infiltration (mm)	81	51	85	75	89	81	87	71	108	114

ETR = Évapotranspiration réelle

4.4. Impact de la variabilité climatique sur les écoulements

La variabilité des écoulements dans le bassin du N'zo, relevée au cours des simulations effectuées avec HYDROTEL, est liée à la baisse quantitative de la pluviométrie signalée dans les travaux antérieurs (Savané *et al.*, 2001 ; Kouamé et Biémi, 2001 ; Goula *et al.*, 2005). D'après ces auteurs, les épisodes de sécheresse qui ont prévalu de 1970 à 1990 ont eu des impacts sur les ressources en eau de surface (tarissement long, tronçonnement des cours d'eau) et souterraine (baisse du niveau des nappes) et perturbé le fonctionnement des hydrosystèmes. Les travaux d'Olivry (1998) montrent que, dans certaines régions d'Afrique de l'Ouest et Centrale, les déficits pluviométriques se sont répercutés, et parfois amplifiés, dans l'écoulement des eaux, créant un hyper tarissement et perturbant le régime des fleuves. Ce déficit pluviométrique a eu des effets durables sur les cours d'eau et aurait ainsi perturbé les paramètres hydrologiques des grands cours d'eau en Afrique. Ainsi, d'après cet auteur, l'hyper tarissement peut être consécutif à une baisse drastique du niveau piézométrique dans les aquifères, car selon la loi de Darcy, le coefficient de tarissement est directement proportionnel à la conductivité hydraulique (perméabilité) et inversement proportionnel aux dimensions de l'aquifère.

Par ailleurs, cette variabilité climatique et hydrologique a une incidence sur les ressources naturelles (Paturel *et al.*, 1998 ; Servat *et al.*, 1998). En effet, la Côte d'Ivoire est un pays où l'agriculture constitue la principale source de revenu. Ainsi, la maîtrise de l'eau constitue encore la variable la plus déterminante pour la vie des sociétés. Les modifications environnementales ont parfois été rapides et intenses dans certaines régions, surtout dans la Côte d'Ivoire forestière (Brou, 2005). Cela a pu également avoir un impact sur les régimes hydrologiques. C'est pourquoi l'optimisation de la gestion des ressources en eau passe nécessairement par une prise en compte de leur sensibilité aux variabilités climatiques et aux modifications environnementales.

5. 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 (Singh, 1997). L'exploitation en synergie des données de télédétection et des SIG, avec le modèle hydrologique distribué

HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001a), a permis de constituer une base de données géospatiales et d'entreprendre la modélisation des écoulements dans le bassin versant du N'zo.

Le découpage spatial de l'hydrosystème du N'zo en unités de simulation a constitué la première phase de ce travail. Les UHRH obtenues sont des sous-bassins liés au réseau hydrographique. Ces sous-bassins homogènes sont construits de sorte à pouvoir intégrer les différentes catégories de sols et d'occupation des terres de l'hydrosytème du N'zo, car ils sont plus grands que la maille de discrétisation physiographique (90 m). En effet, la cohérence des échelles est une condition pour la construction d'un modèle rigoureux (Refsgaard and Strom, 1995). D'après ces auteurs, une utilisation rigoureuse de toutes les données disponibles sur un bassin versant et une stratégie tout aussi rigoureuse de mise en place de la modélisation permettent, notamment, de réduire significativement le problème d'équifinalité.

Les résultats des simulations (calage et vérification) à la station de Kahin, qui est la plus en aval, montrent un bon synchronisme entre les débits simulés et observés, comme en témoignent les valeurs élevées du critère de Nash (0,78 à 0,91). Cependant, à la station de Kô à Man (station la plus en amont), l'allure des courbes n'est pas synchrone à certains endroits. On observe une sous-estimation et parfois 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. 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. Une amélioration du modèle HYDROTEL serait l'ajout de nouveaux algorithmes pour l'estimation des précipitations, notamment les méthodes géostatistiques. D'autre part, pour simuler les transferts verticaux, le modèle BV3C considère les profils de sol des UHRH comme étant uniformes aussi bien sur le plan horizontal que sur le plan vertical. La prise en compte de la variabilité du sol en fonction de la profondeur pourrait certainement affiner les sorties du bilan hydrologique.

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 (Olivry, 1998 ; Ardoin, 2004). Les déficits pluviométriques se sont répercutés, et parfois amplifiés, dans l'écoulement des eaux et auraient perturbé les paramètres hydrologiques des cours d'eau dans le bassin du N'zo. Afin de gérer les ressources en eau dans une perspective de développement durable, il convient d'intégrer, dans les outils numériques d'aide à la décision, la modélisation hydrologique qui facilite la prise en compte de la sensibilité aux changements des paramètres environnementaux. L'imagerie satellitaire constituera certainement la principale source de données pour la cartographie et le suivi de la dynamique des modifications du paysage phytogéographique.

6. CONCLUSION

L'intégration des données physiographiques et des variables météorologiques dans le modèle hydrologique distribué HYDROTEL a permis de modéliser le fonctionnement du bassin versant du N'zo. À partir des images satellitaires TM de Landsat et des données provenant des SIG, la base de données géospatiales a été constituée pour pouvoir représenter les caractéristiques physiographiques du bassin du N'zo. Le découpage spatial du bassin a abouti à des unités de simulation hydrologiques (UHRH) sur lesquelles les variabilités spatiales des catégories de sol et de couverts végétaux du bassin peuvent être prises en compte pour la modélisation hydrologique.

Le calage des paramètres du modèle et les validations spatio-temporelles effectués sur le bassin versant du N'zo montrent un synchronisme entre les courbes de débits observés et simulés. Hormis la surestimation des débits simulés en début de saison pluvieuse (mars à juin), il y a une reproduction satisfaisante de l'allure des courbes de débits. Le critère de Nash varie de 0,72 à 0,91 et exprime la bonne performance d'HYDROTEL et son applicabilité en milieu tropical humide. Une analyse de sensibilité des paramètres et des diverses données d'entrée du modèle s'avère nécessaire pour confirmer l'adéquation du modèle au milieu tropical.

Les résultats obtenus par les simulations confirment la variabilité hydroclimatique mise en évidence dans les travaux antérieurs à partir de méthodes de détection des ruptures dans les séries hydrométéorologiques. Il ressort que la modélisation hydrologique distribuée est importante en Afrique subsaharienne où l'évolution de la pluviométrie au cours du XX^{e} siècle ainsi que les changements rapides du paysage phytogéographique constituent des conditions non stationnaires particulièrement intéressantes pour tester la pertinence des modélisations.

L'une des perspectives de ce travail est l'analyse de la dynamique de l'occupation des terres à partir d'images satellitaires multidates afin de relever les interrelations entre l'impact des modifications des états de surface et du climat sur le régime hydrologique du fleuve N'zo et les ressources en eau du bassin.

Remerciements

Les auteurs tiennent à dédier cet article à la mémoire de Ferdinand Bonn, professeur et chercheur émérite qui, par son talent, sa nature simple et humaine a contribué à l'essor des sciences de l'observation de la terre au Québec et dans le

monde. Ce maître incontesté de la plume a participé à la publication de nombreux ouvrages pour la promotion et la vulgarisation de la télédétection, qui les ont inspirés dans leur formation universitaire et dans leurs travaux de recherche. Le plus grand hommage à Ferdinand Bonn serait de poursuivre son oeuvre pour que la télédétection joue un rôle d'intégration et d'innovation dans la recherche et le développement dans le monde entier.

Références

Abott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986) An introduction to the European Hydrologic System - Système Hydrologique Européen, SHE, 2: Structure of a physically-based, distributed modeling system. Journal of Hydrology, vol. 87, p. 61-77.

Andersen, J., Refsgaard, J.C. and Jensen, K.H. (2001) Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin: model construction and validation. Journal of Hydrology, vol. 247, p. 200-214.

Ardoin, B.S. (2004) 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.

Aubert, G. et Segalen, P. (1966) Projet de classification des sols ferrallitiques. Cahiers ORSTOM, Série Pédologie, vol. 4, n° 4, p. 97-112.

Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979) A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin, vol. 24, n° 1, p. 43-69.

Bigot, S., Brou, Y.T., Oszwald, J. et Diédhiou, A. (2005) Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. Sécheresse, vol. 16, n° 1, p. 5-13.

Bonn, F. et Rochon, G. (1992) Précis de télédétection. Volume 1 - Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte Foy, Québec, 485 p.

Brou, Y.T. (2005) Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, 212 p.

CCT (Centre de cartographie et de télédétection) (1994) Carte du bilan forestier de la région de Man. Projet sectoriel forestier, Abidjan (Côte d'Ivoire), 1 : 200 000.

Connolly, R.D., Silburn, D.M. and Ciesiolka, C.A.A. (1997) 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.

Dupont, J., Smitz, J., Rousseau, A.N., Mailhot, A. et Gangbazo, G. (1998) 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.

Farr, T.G. and Kobrick, M. (2000) Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. Eos Transactions, American Geophysical Union, vol. 81, n°48, p. 583-585.

Fortin, J.-P. et Royer, A. (2004) Le modèle hydrologique HYDROTEL : bases théoriques. Manuel d'utilisation, rapport INRS-ETE, Sainte-Foy, 104 p.

Fortin, J.-P., Turcotte, R., Massicote, S., Moussa, R., Fitzback, J. and Villeneuve, J-P. (2001a) Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I: Description of model. Journal of Hydrologic Engineering, vol. 6, n° 2, p. 91-99.

Fortin, J.-P., Turcotte, R., Massicote, S., Moussa, R., Fitzback, J. and Villeneuve, J-P. (2001b) Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. II: Application to Chaudière watershed. Journal of Hydrologic Engineering, vol. 6, n° 2, p. 100-108.

Fortin, J.-P., Villeneuve, J.-P. and Bocquillon, C. (1990) Hydrotel, Physitel and Imatel : an integrated application of remote sensing and GIS to hydrological modelling on microcomputer. P. 793-804, *in* Koelen M. (réd.) Proceedings of the International Symposium of Remote Sensing and Water Resources, Enschede, 20-24 août 1990, International Society of Photogrammetry and Remote sensing, Enschede, 342 p.

Fortin, J.-P., Villeneuve, J.-P., Guilbot, A. and Seguin, B. (1986) 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.

Goula, B.T.A., Savané, I., Konan, B., Fadika, V. et Kouadio, G.B. (2005) 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.

Grayson, R.B., Moore, I.D. and McMahon, T.A. (1992) Physically based hydrologic modeling, 1. A terrain based model for investigative purposes. Water Resources Research, vol. 28, p. 2639-2658.

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.

Kouamé, K.F. et Biémi, J. (2001) 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.

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.

Leavesley, G.H. and Stannard, L.G. (1995) The Precipitation-Runoff Modeling System-PRMS. In Computer models of watershed hydrology. P. 281-310, *in* Singh V.P. (réd.) Water Resources Publications, Colorado, 1144 p.

Lebel, T. and Vischel, T. (2005) Climate and water cycle in the tropical zone : a problem of scale. Comptes Rendus Geoscience, n° 337, p. 29-37.

Morin, G., Fortin, J.-P., Lardeau, J.-P., Sochanska W. et Paquette, S. (1981) Le Modèle CEQUEAU : manuel d'utilisation. INRS-Eau, Sainte-Foy, Rapport n° 93, 78 p.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. 1 - A discussion of principles. Journal of Hydrology, vol. 10, p. 282-290.

Olivry, J.C. (1998) 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.

Paturel, J.E., Servat, E. et Delattre, M.O. (1998) 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.

Perraud, A. (1971) Les sols de Côte d'Ivoire. P. 268-391, *in* Avenard J.M. (réd.) Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM n° 50, Paris, 401 p.

Pietroniro, A. and Leconte, R. (2005) A review of Canadian remote sensing and hydrology, 1999-2003. Hydrological Processes, vol. 19, p. 285-301.

Rawls, W.J. and Brakensiek, D.L. (1989) Estimation of soil water retention and hydraulic properties. P. 275-300, *in* Morel-Seytoux, H.J. (réd.) Unsaturated flow in hydrologic modeling : theory and practice. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 531 p.

Refsgaard, J.C. and Storm, B. (1995) MIKE SHE. P. 809-846, *in* Singh, V.P. (réd.) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, Colorado, 1144 p.

Réménieras, G. (1980) L'hydrologie de l'ingénieur. 2e édition, Collection Direction des Études et de la Recherche d'électricité, Eyrolles, Paris, 456 p.

Savané, I., Coulibaly, K.M. et Gioan, P. (2001) Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. Sécheresse, vol. 12, n°4, p. 231-237.

Schmugge, T.J, Kustas, W.P., Ritchie, J.C., Jackson, T.J. and Rango, A. (2002) Remote sensing in hydrology. Advances in Water Resources, vol. 25, p. 1367-1385.

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. (1998) 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.

Singh, V.P. (1997) Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on streamflow hydrograph. Hydrological Processes, vol. 11, p. 1649-1669.

Singh, V.P. and Woolhiser, D.A. (2002) Mathematical modeling of watershed hydrology. Journal of Hydrologic Engineering, vol. 7, n° 4, p. 270-292.

Turcotte, R, Fortin, J.-P., Rousseau A.N, Massicote, S and Villeneuve, J.-P. (2001) Determination of the drainage structures of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. Journal of Hydrology, vol. 240, p. 225-242.