

USE OF A DISTRIBUTED MODEL ON A SMALL SAVANNAH CATCHMENT

Pierre Chevallier, ORSTOM

Georges Girard, CIG, Ecole des Mines de Paris

Centre ORSTOM de Montpellier, 2051 Avenue du Val de Montferrand
B.P. 5045, 34032 Montpellier Cedex, France

ABSTRACT

The Hyperbav Program is located on a small catchment in the North West of Ivory Coast. On a 136 hectares area, fine observations have been made from 1984 to 1988 on all the parameters concerning the water balance (hydrology, climatology, soil science, hydrogeology, botany, agronomy).

It is interesting to try to incorporate those informations in a model representation of superficial and internal water exchange transfers. The "coupled model," developed jointly by ORSTOM and Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris seems to be a good tool.

Utilisation d'un modèle distribué sur un petit bassin versant de savane
(Booro-Borotou, Côte d'Ivoire)

Chevallier P., Laboratoire d'Hydrologie ORSTOM Montpellier
Girard G., CIG, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau
Laboratoire d'Hydrologie, Centre ORSTOM de Montpellier
2051 avenue du Val de Montferrand, B.P. 5045
34032 Montpellier Cedex, France

RESUME

Le Programme Hyperbav a pour cadre un petit bassin versant du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. Sur une superficie de 136 hectares des observations fines ont été conduites de 1984 à 1988 sur toutes les grandeurs intéressant le fonctionnement hydrique (hydrologie, climatologie, pédologie, hydrogéologie, botanique, agronomie).

Il est intéressant de tenter d'intégrer ces informations dans une représentation modéliste des échanges hydriques superficiels et internes. Le "modèle couplé" développé conjointement par l'ORSTOM et par l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris semble un bon outil.

INTRODUCTION

Lancé en 1983 à l'initiative d'une équipe de pédologues et d'hydrologues de l'ORSTOM et du Ministère de la Recherche Scientifique de Côte d'Ivoire, le programme Hyperbav (Hydro-Pédologie de Recherche sur Bassin Versant) se proposait d'aborder l'étude d'un petit bassin versant en région de savane humide en bénéficiant de l'expérience acquise depuis de longues années dans ce domaine par l'ORSTOM et en y intégrant des techniques et des méthodes d'approche récentes ou même originales. Il s'agissait d'étudier les mécanismes du cycle de l'eau à l'interface sol-plante-atmosphère et d'en dégager les principaux facteurs explicatifs.

A l'équipe initiale se sont associés une botaniste de l'ORSTOM, des zoologistes spécialistes des termites de l'Ecole Normale Supérieure de Paris et de l'Université d'Abidjan et des géologues de l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics de Yamoussoukro.

La phase d'étude sur le terrain s'est déroulée entre avril 1984 et mars 1988. Elle est suivie d'une phase d'exploitation des données acquises et d'une phase de synthèse qui devraient aboutir à un séminaire sur l'ensemble de ce programme en septembre 1989.

Au regard de la quantité et de la qualité des données acquises de façon continue pendant quatre années, l'application de modèles conceptuels déterministes pluies-débits au bassin versant de Booro-Borotou était un passage obligé dans l'interprétation. Les objectifs de cette modélisation sont multiples :

- La modélisation exige des données de bonne qualité et constitue un excellent outil de critique.
- Elle permet de vérifier les hypothèses qui sont formulées sur le fonctionnement du bassin versant.
- Elle constitue actuellement la seule approche sérieuse pour la génération de séries de données utilisables par les projeteurs.

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 39700

Cote : B

13 JUN 1994

81373

- Elle ouvre enfin la porte à des transferts géographiques d'applications (Albergel et al. 1987) et à l'étude de certains problèmes d'échelle.

LE BASSIN VERSANT DE BOORO-BOROTOU

Le bassin versant de Booro-Borotou (Chevallier, 1988) se trouve au Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire sur l'axe routier Man-Odienné à 25 km au Nord de la ville de Touba (figure 1). Son tributaire est un affluent de la Séné qui elle-même se jette dans la Féré Dougouba (ou Bagbé), l'une des trois rivières qui constituent plus à l'aval le fleuve Sassandra.

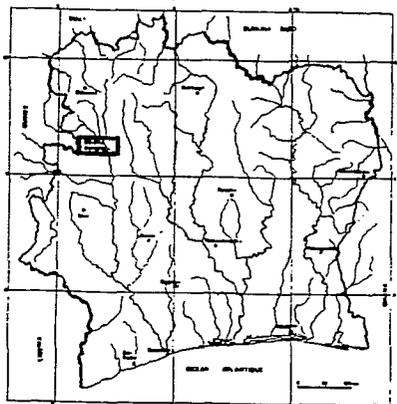


Figure 1 : Côte d'Ivoire. Situation de Booro-Borotou

Le bassin versant couvre une superficie de 136 hectares à une altitude comprise entre 426 et 473 m. Il a une forme assez compacte orientée grossièrement vers l'est-nord-est. L'indice global de pente est de 22,2 m au km. Il est drainé par un cours d'eau unique dans un talweg à peu près rectiligne bien marqué (figure 2). La station de contrôle des écoulements est installée sur un affleurement du substratum géologique et on admet que le bassin versant hydrogéologique correspond au bassin versant hydrologique.

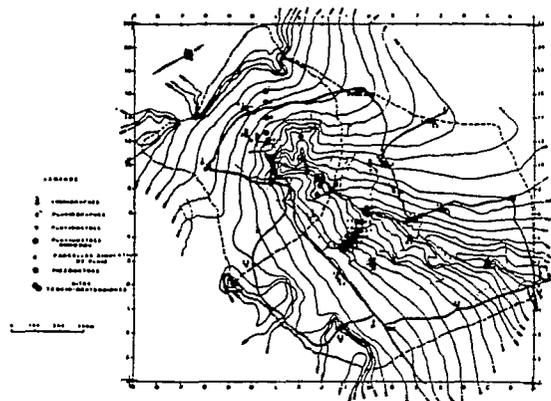


Figure 2 : Le bassin versant de Booro-Borotou

Le milieu naturel

Le substratum est essentiellement constitué de gneiss migmatitique à hypersthène ou à biotite parsemé de quelques lentilles de pyroxénoamphibolite plagioclasique.

La structure pédologique s'identifie bien le long du versant, installée sur le manteau altéritique du substratum dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Des plateaux cuirassés bordent le bassin. Ce sont les reliques de la formation pédologique ancienne. Ils constituent le domaine ferrallitique. Sous ces plateaux le domaine transformant est constitué du haut de versant vers le bas par trois systèmes indépendants : un système ferrugineux, un système cuirassé et un système hydromorphe. Le système ferrugineux est associé aux pentes rectilignes du haut de versant. Il est constitué de sols rouges à structure fine qui évoluent vers des sols ocres plus massifs. Le système cuirassé correspond à une rupture de la pente moyenne qui devient plus forte à mi-versant. Il est caractérisé par l'affleurement d'une cuirasse qui se démantèle à partir de la surface en produisant des nappes de gravillons. Le système hydromorphe est constitué par le bas fond et les bas de versants concaves. A l'amont on trouve des sols jaunes sableux ou argilo-sableux à structure massive qui évoluent vers des sols blancs à structure bouillante.

La hauteur moyenne interannuelle de précipitation est de 1360 mm, avec 7 mois humides (avril à octobre), un maximum en septembre (222 mm en moyenne) et un minimum en janvier (10 mm en moyenne).

L'évapotranspiration potentielle évaluée par la formule de Penman donne un total moyen de 1600 mm par an avec des valeurs mensuelles moyennes qui se situent entre 3,2 (décembre) et 5,7 (avril) mm/jour.

Le bilan hydrologique

L'évaluation des termes du bilan hydrologique est donné dans le tableau ci-dessous en années hydrologiques (c'est à dire pour cette région du 1er avril au 31 mars) pour les quatre années d'observation.

Tableau 1 : bilan hydrologique annuel sur le bassin versant de Booro-Borotou en mm

Années	Précipitation	Écoulement	Ruissellement	ETP Penman	Déficit écoulement
1984-85	1161	59	10	1620	1102
1985-86	1528	205	33	1602	1323
1986-87	1073	31	6	1604	1042
1987-88	1244	86	26	1590	1158

Ce bilan fait apparaître clairement la faible part de l'écoulement au regard des apports par précipitation et la part encore plus faible des écoulements rapides de crue (ruissellement). Si l'on assimile en moyenne le déficit d'écoulement (ce qui revient à adopter l'hypothèse que le système hydrologique étudié ne fuit pas) à l'évapotranspiration réelle, on constate un déficit évapotranspiratoire d'environ 400 mm par an.

Le fonctionnement hydrologique

L'analyse des observations réalisées sur le terrain complétées par un certain nombre d'expérimentations spécifiques conduit à formuler un schéma global de fonctionnement hydrologique du bassin versant (Chevalier, 1988). Ce schéma de fonctionnement est assez proche de ceux proposés pour les bassins versants de Korhogo (Camus et al., 1976) et de Sakassou (Lafforgue, 1982) dans un milieu naturel assez comparable.

Il peut être sommairement décrit sur le versant :

Sur les plateaux on admet une infiltration totale. La perméabilité décroît sur les sols rouges et ocres (ou les états de surfaces présentent des indices de ruissellement caractéristiques) pour atteindre un minimum sur le système cuirassé à mi-versant. Cette perméabilité croît à nouveau sur les sols jaunes et blancs pour être totale dans la zone de bas-fond.

Lors d'un événement pluvieux le ruissellement de surface, qui se produit le plus souvent sur les sols ocres, les sols d'induration de mi-versant et les sols jaunes, s'infiltré à nouveau dans le sol avant d'atteindre le cours d'eau proprement dit.

L'écoulement provient essentiellement de la nappe souterraine dont le niveau est subaffleurant dans le bas-fond dès que les pluies ont été suffisamment abondantes. Cela explique l'arrivée tardive de cet écoulement, le niveau de la nappe ne variant de façon sensible qu'à partir du mois de juillet lorsque l'équilibre entre les apports et la reprise par évapotranspiration est rompu.

Les événements exceptionnels enfin ne sont susceptibles de se produire que lorsque l'ensemble du système sol-souterrain a atteint un nouvel équilibre entre zone non-saturée et zone saturée.

LE MODELE COUPLE

Le modèle couplé, MODCOU, (Ledoux, 1980 ; Girard et al., 1981) est un modèle hydrologique pluie-débit que l'on peut qualifier de modèle conceptuel déterministe distribué. Il est constitué par le mariage entre un modèle hydrologique superficiel, CEQUEAU, développé dans le cadre d'une coopération entre l'ORSTOM et l'Institut National de la Recherche Scientifique du Québec (Girard et al., 1972) et un modèle hydrogéologique multicouche, NEWSAM, élaboré par le Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris (Ledoux, 1975 ; Marsily et al., 1978).

Le principe :

Le modèle couplé a été réalisé avec le souci d'une représentation aussi phénoménologique que possible d'un système hydrologique. L'espace du système étudié est divisé en deux ensembles : le domaine de surface et le domaine souterrain entre lesquels tous les échanges sont possibles. Spatialement chacun de ces domaines est représenté par une "couche" (éventuellement plusieurs pour le souterrain), elle-même découpée en mailles carrées élémentaires régulières (chacune des mailles pouvant être redivisée en 4, 16 ou 64) dont la taille est fonction de l'échelle du système, de la connaissance du milieu étudié et de la variabilité des paramètres actifs dans le fonctionnement hydrologique local.

On superpose sur ce maillage régulier d'une part les "zones météo", d'apports pluviométriques et d'aptitude à l'évapotranspiration homogène, et d'autre part les "zones de production", de comportement hydrodynamique local homogène.

Le modèle distingue pour représenter le cycle de l'eau cinq fonctions interconnectées :

- la fonction d'entrée ; c'est l'apport pluviométrique avec un découpage selon un pas de temps (pas de temps météo) élémentaire compatible avec le problème posé.
- la fonction de production ; elle répartit à chaque pas de temps et pour chaque zone de production la donnée d'entrée entre l'évapotranspiration, le ruissellement de surface, l'infiltration vers les couches souterraines et une réserve qui vient compléter la donnée d'entrée au pas de temps suivant.
- la fonction de transfert de surface ; elle définit les temps de parcours de l'eau dans le réseau hydrographique.
- la fonction de transfert souterrain ; elle définit les temps de parcours dans la zone non-saturée comme dans les nappes et contrôle les niveaux piézométriques.
- la fonction d'échange surface-souterrain ; elle redistribue le stock souterrain en fonction de contraintes naturelles de drainage ou de potentiel, mais aussi d'interventions extérieures (par exemple des pompages).

L'organisation générale :

Le modèle est un programme écrit en FORTRAN qui nécessite des moyens de calcul relativement puissants ; mais il offre une présentation modulaire assez souple permettant des adaptations pour des problèmes spécifiques. Il est divisé en cinq étapes qui s'effectuent séquentiellement (pour une présentation détaillée, consulter Girard et al., 1981) :

Etape GEOCOU :

Cette étape se charge de la définition des caractéristiques géométriques et physiographiques du domaine étudié.

Etape MODSUR :

Elle est centrée sur la modélisation des phénomènes superficiels et assure essentiellement les fonctions d'entrée, de production et de transfert de surface.

Etape NONSAT :

Elle assure le transfert de l'infiltration calculée par MODSUR à travers la zone non saturée pour l'alimentation de la nappe.

Etape MODCOU :

Elle simule finalement le devenir de l'eau disponible simultanément à travers le domaine de surface et le domaine souterrain en tenant compte des interactions respectives.

Etape COMPAR :

Elle permet enfin de confronter graphiquement les résultats du calcul avec les données d'observation de débits en un point quelconque du réseau hydrographique ou avec les données d'observation de piézométrie en un point quelconque du domaine souterrain étudié.

APPLICATION DU MODELE COUPLE AU BASSIN VERSANT DE BOORO-BOROTOU

L'application du modèle couplé au bassin versant de Booro-Borotou soulève de nombreux problèmes pour la plus-part liés au fonctionnement hydrologique assez bien connu avec une échelle fine de description, fonctionnement dont il n'est pas toujours facile de simplifier les mécanismes.

Il n'est pas possible de rentrer ici dans le détail de la mise en oeuvre ; mais nous allons tenter d'en donner les grandes lignes et de présenter quelques résultats très partiels.

La représentation géographique

La géométrie du bassin versant est représentée par une couche de surface (figure 3) et une seule couche souterraine (figure 4). La maille élémentaire a 100 m de côté. Elle est divisée le cas échéant en moyennes mailles de 50 m de côté et, sur la couche souterraine dans le bas-fond en petites mailles de 25 m de côté. Cela fait un total de 294 mailles de surface et de 474 mailles de souterrain.

Le modèle couplé ne permet de transfert dans les deux sens entre la surface et le souterrain que dans des mailles appartenant au réseau hydrographique. C'est la raison pour laquelle l'ensemble des mailles du bas-fond sont considérées dans l'application à Booro-Borotou comme "mailles rivières", même si la rivière n'y passe pas vraiment de façon à simuler la réalité de l'infiltration d'un ruissellement de surface avant de parvenir au marigot ou de l'apparition en période très humide de lignes de sourcins sur les bas de versants.

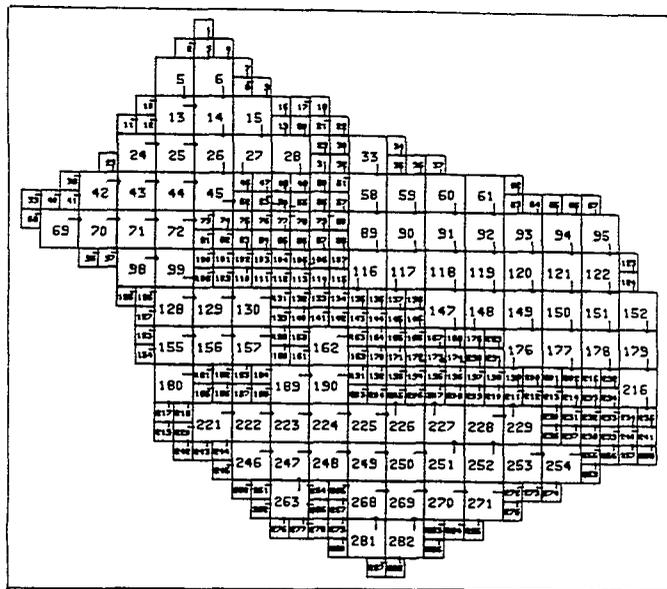


Figure 3 : Booro-Borotou ; modèle couplé, représentation de la surface

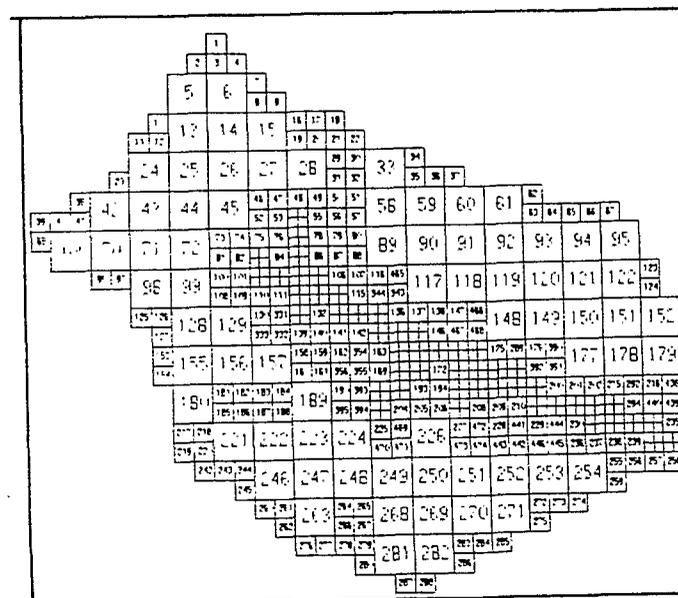


Figure 4 : Booro-Borotou ; modèle couplé, représentation du souterrain

La production et le transfert de surface

Le pas de temps élémentaire choisi pour le calcul est celui de la journée. La totalité des informations pluviométriques disponibles sur le bassin est prise en compte avec un découpage en 12 "zones météo", correspondant aux 12 postes pluviométriques répartis sur le bassin. Pour l'évapotranspiration, les valeurs adoptées sont les moyennes mensuelles interannuelles calculées par la formule de Penman.

7 zones homogènes de production de surface sont cartographiées. Plusieurs critères de détermination de ces zones sont possibles. A Oursi (Chevallier et al., 1985) ou Gagara (Albergel et al., 1987) priorité avait été donnée aux états de surface. En région de savane humide les mécanismes hydrologiques sont plus complexes et il a semblé plus conforme à la réalité d'adopter des critères morpho-pédologiques :

- les buttes et plateaux du domaine ferrallitique ;
- les sols rouges,
- les sols ocres,
- les sols jaunes du système ferrugineux ;
- l'induration de mi-versant et sa zone d'affleurement gravillonnaire ;
- le bas-fond représentant le système hydromorphe ;
- les champs cultivés enfin.

Le problème des temps de transfert de surface est inexistant puisque le temps de concentration du bassin est largement inférieur au pas de temps élémentaire de la journée.

Les transferts dans le souterrain

Dans le cas de Booro-Borotou, il n'est pas fait de modélisation particulière pour les transferts dans la zone non saturée.

Le niveau piézométrique est réglé essentiellement par deux jeux de paramètres : les transmissivités qui représentent les vitesses des flux d'écoulement dans la zone saturée et les emmagasineurs qui chiffrent les possibilités de stockage du souterrain.

Dans une optique simplificatrice, ces transmissivités et ces emmagasineurs qui peuvent être défini pour chacune des mailles de la couche souterraine sont considérés comme homogènes dans trois grandes zones :

- d'une part, tout ce qui se trouve à l'amont de l'induration de mi-versant ;
- d'autre part, les pentes à l'aval de l'induration ;
- enfin, le bas-fond hydromorphe.

Les données d'observation pour évaluer ces paramètres se limitent au suivi d'une vingtaine de piézomètres situés tous à l'aval de l'induration. C'est sommaire, mais ce type d'observation n'avait pas été prévu dans le projet.

Résultats

Les résultats obtenus sont encore très partiels. Ils concernent pour le moment les débits moyens journaliers.

On trouvera un exemple de ces résultats sur les figures 5 et 6.

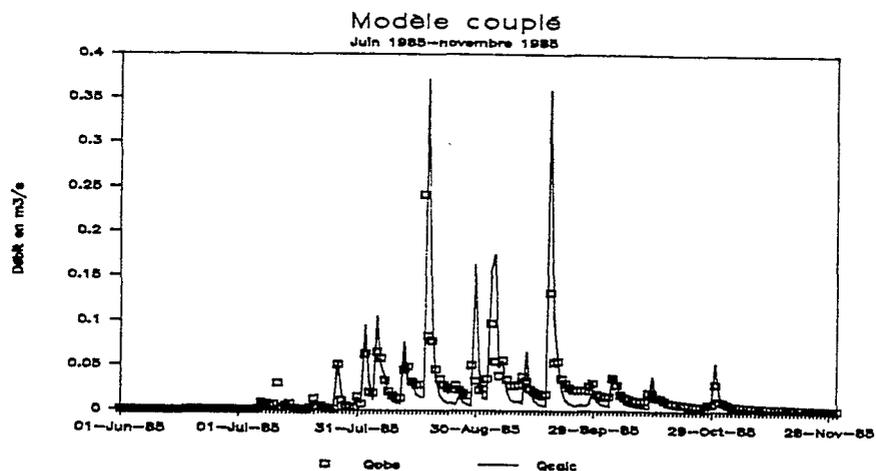


Figure 5 : Modélisation des débits moyens journaliers à Booro-Borotou Année 1985

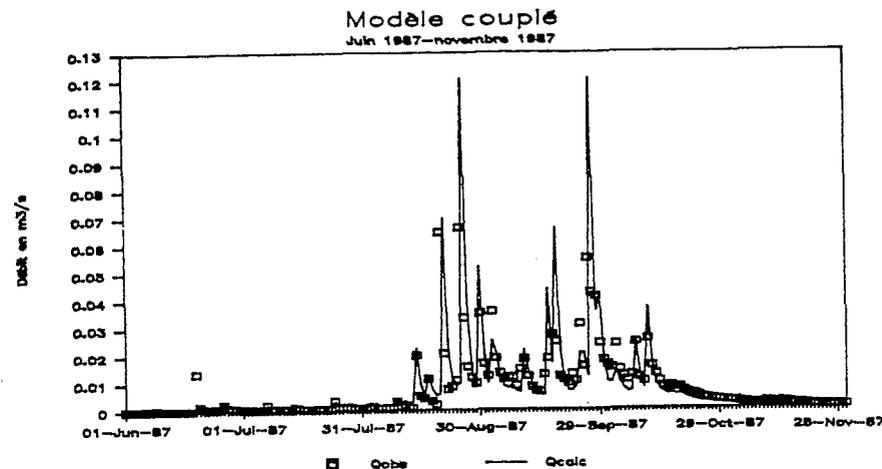


Figure 6 : Modélisation des débits moyens journaliers à Booro-Borotou Année 1987

Commentaires

Les résultats obtenus ne sont pas très spectaculaires et on peut avoir l'impression sur ce travail d'une "montagne qui accouche d'une souris".

Il est en effet certain que si l'objectif initial avait été uniquement d'évaluer les débits à partir des pluies sur ce bassin versant, un modèle conceptuel global fait aussi bien l'affaire (Chevallier, 1988).

Cependant deux leçons intéressantes apparaissent devoir être tirées :

- Aux échelles fines, il est extrêmement délicat d'employer un modèle qui essaie d'être phénoménologiquement proche de la réalité. En effet les hypothèses simplificatrices inhérentes à toute modélisation peuvent devenir trop simplificatrice sur des échelles de variabilité spatiale de quelques dizaines de mètres. Cela est d'autant plus difficile que les phénomènes mis en jeu atteignent une plus grande complexité (comme dans cette région de savane).

- La mise en oeuvre sous forme modélisée, même très simplifiée, des hypothèses de fonctionnement hydrodynamique formulées sur le bassin versant de Booro-Borotou ne contredit pas ces hypothèses. Sans donner la preuve que la solution proposée est la bonne, le fonctionnement proposé trouve ici une sorte de validation. Cela permet d'envisager le transfert géographique de cette modélisation à un autre système non étudié présentant des caractéristiques géomorphologiques similaires (ce qui est probablement le cas de toute la région géologique cristalline du nord de la Côte d'Ivoire, du Sud du Mali et du Sud du Burkina Faso).

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier T. Lebel qui a largement oeuvré à l'implantation du Modèle Couplé sur le réseau de stations de travail Apollo du Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM à Montpellier.

REFERENCES

Albergel J., Chevallier P., Lortic B., 1987. D'Oursi à Gagara : transposition d'un modèle de ruissellement dans le Sahel (Burkina Faso). *Hydrologie Continentale*, vol. 2(2).

Camus H., Chaperon P., Girard G., Molinier M., 1976. Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en culture (Côte d'Ivoire, Korhogo, 1962-1972). *Travaux et Documents de l'ORSTOM n°52*. ORSTOM Paris.

Chevallier P., Claude J., Pouyau B., Bernard A., 1985. Pluies et crues au Sahel. *Hydrologie de la Mare d'Oursi (Burkina Faso)*. *Travaux et Documents de l'ORSTOM n° 190*. ORSTOM, Paris.

Chevallier P., 1988. Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide : Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Thèse Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier. (A soumettre prochainement).

Girard G., Morin G., Charbonneau R., 1972. Modèle précipitations-débits à discrétisation spatiale. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. IX, n°4.

Girard G., Ledoux E., Villeneuve J.P., 1981. Le modèle couplé. Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol XVIII, n°4.

Lafforgue A., 1982. Etude hydrologique des bassins versants de Sakkassou (Côte d'Ivoire, 1972-1977). *Travaux et Documents de l'ORSTOM n°149*. ORSTOM Paris.

Ledoux E., 1978. Programme NEWSAM. Principe et notice d'emploi. *Rapport Ecole des Mines. LHM/R75/11*.

Ledoux E., 1980. Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Thèse de Docteur Ingénieur, Ecole des Mines de Paris, Université Pierre et Marie Curie.

Marsily G. de, Ledoux E., Levassor A., Poitrinal D., Salem A., 1978. Modelling of large multilayered aquifer system : theory and applications. *Journal of Hydrology*, 36.