

LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

Pierre Chevallier⁽¹⁾, *Olivier Planchon*⁽²⁾ et *Paul Quinn*⁽³⁾

(1) ORSTOM, IPH-UFRGS, C.P. 530, 90.000 Porto Alegre RS, Brésil.

(2) ORSTOM, B.P. 5045, 34032 Montpellier Cedex 1

(3) Centre for Research on Environmental Systems, University of Lancaster , Lancaster, LA1 4YQ
Royaume Uni.

INTRODUCTION

L'application de modèles mathématiques aux observations et aux expérimentations hydrologiques sur de petits bassins versants est le complément logique et nécessaire à l'interprétation de leur fonctionnement.

On a pris l'habitude de classer les modèles dans des catégories qui, bien que ce classement ne soit pas toujours exclusif, permettent de mieux décrire l'opération réalisée. On dit qu'un modèle est :

- *déterministe* (par opposition à *stochastique*), lorsque les variables employées ne sont pas aléatoires et résultent soit de l'observation, soit de grandeurs reconstituées.
- *conceptuel* (par opposition à *empirique*), si les algorithmes qui constituent le modèle s'essayent à représenter de façon plus ou moins précises les phénomènes physiques que l'on cherche à décrire.
- *global*, si la modélisation concerne l'entité géographique complète étudiée, sans modulation selon les particularités locales.
- *distribué*, par opposition à global, si le modèle résulte de la composition de fonctions ponctuelles ou locales pour l'obtention d'un résultat concernant l'entité géographique totale.

Dans l'application à Booro-Borotou, nous avons cherché à mettre en oeuvre différents modèles hydrologiques qui appartiennent tous à la catégorie des modèles conceptuels déterministes. Cela entraîne l'utilisation d'une stratégie dont le schéma général est obligatoire (O'Donnell, 1986) :

- a) Les données d'entrée sont constituées par une série chronologique de précipitations correspondant à un pas de temps fixe qui peut varier entre quelques minutes et le mois.
- b) Le modèle donne en sortie une série chronologique de débits avec le même pas de temps.

- c) Cette série est comparée à la série des débits observés pour la série de précipitations choisie, selon des critères qui peuvent être très divers (graphiques ou statistiques, en général). Si l'opération n'est pas jugée satisfaisante, on modifie les paramètres de réglage du modèle et on recommence.
- d) Si le résultat est accepté, on procède à la même opération avec une nouvelle série de précipitations et, pour que l'opération de modélisation soit considérée comme *correcte*, il est *nécessaire* que ce nouveau résultat soit acceptable au sens des critères choisis.

Les opérations b) et c) constituent le *calage* du modèle, l'opération d), la *validation*.

Le critère choisi dans notre étude est celui proposé par Nash (1969) qui est le plus communément employé :

$$C = 1 - (\sum (Q_o - Q_c)^2) / (\sum (Q_o - mQ_o)^2)$$

où :
 Q_o , débit observé à un pas de temps
 Q_c , débit calculé au même pas de temps
 mQ_o , moyenne des débits observés de l'échantillon.

Cinq modèles différents ont été employés jusqu'à présent sur les données de base de Booro-Borotou pour deux pas de temps différents :

- au pas de temps journalier :
 - trois modèles globaux : CREC à 5 paramètres, MODGLO et MODIBI ;
 - un modèle distribué : MODCOU.
- au pas de temps de 30 minutes :
 - le modèle à approche géomorphologique TOPMODEL.

MODELISATION AU PAS DE TEMPS JOURNALIER

Nous proposons une description rapide des modèles utilisés au pas de temps journaliers ; le lecteur soucieux de plus de détails pourra se reporter aux publications décrivant ces modèles ou à la présentation un peu plus complète de leur application à Booro-Borotou proposée par Chevallier (1988).

Trois modèles globaux

Ces trois modèles conçus par des auteurs différents ont été récemment reformulés sous une forme standardisée (Servat, 1986 ; Dezetter, 1986 ; Ibiza, 1988).

Deux d'entre eux (CREC et MODGLO) font appel à des techniques d'optimisation. Il existe diverses méthodes qui ont pour objet de trouver les paramètres de fonctions non linéaires qui donnent la meilleure adéquation entre valeurs calculées et observées, adéquation chiffrée par le calcul d'un *critère*. La méthode employée dans notre étude est celle de Rosenbrock (1960).

CREC à 5 paramètres

Ce modèle mis au point dans les années 70 (Cormary et Guilbot, 1971) a été l'objet d'un assez grand nombre de versions. Celle utilisée dans notre étude est celle dite à *cinq*

paramètres (Combes, 1985). Ce modèle sépare, comme la plupart des modèles de ce type, la transformation pluie-débit en deux phases décrites chacune comme une fonction propre :

- la *production*, qui prend en compte l'humidité du sol et fournit d'une part l'évapotranspiration et d'autre part la fraction de l'eau devant participer à l'écoulement ;
- le *transfert*, qui décompose cette fraction en écoulement rapide et en écoulement lent.

Les cinq paramètres du modèle correspondent à des réglages de fonctions liées à une représentation sous la forme de trois réservoirs qui communiquent entre eux. Un seul de ces paramètres peut être assimilable à une grandeur physique (la *réserve maximale* du sol) mesurable sur le terrain. La détermination se fait par une méthode automatique d'optimisation.

MODGLO

C'est également un modèle relativement ancien développé à l'ORSTOM par Girard dans les années 70. Comme dans le modèle CREC 5, production et transfert sont nettement dissociés. Mais contrairement à CREC 5, MODGLO se veut plus près des observations de base et la plupart de ses paramètres correspondent à des notions physiques. La séparation des écoulements correspond mieux aux notions habituelles de l'hydrologie de bassins versants représentatifs et les différents termes du bilan hydriques sont nettement identifiés.

Ce modèle comporte 20 paramètres ; mais ils n'ont pas tous la même importance et ne sont pas toujours indépendants les uns des autres. Certains de ces paramètres peuvent être l'objet d'une optimisation automatique.

MODIBI

C'est un modèle développé plus récemment par Ibiza (1983). La fonction de production, relativement complexe, représente l'équation du bilan hydrique à travers un premier système à *réservoirs*. Le transfert consiste en un retard à l'écoulement introduit à travers un deuxième système de réservoirs. Les deux principales originalités consistent en :

- la prise en compte explicite du fonctionnement des nappes souterraines dont le niveau peut influencer l'aptitude à l'infiltration ;
- l'interdépendance étroite dans la fonction de production entre l'évapotranspiration, le couvert végétal, l'horizon racinaire et l'aptitude à la percolation (et donc à l'alimentation de la zone saturée).

16 paramètres permettent le réglage du modèle. Mais parmi eux, certains sont considérés comme secondaires et pouvant être fixés *a priori*. On admet que le calage réel ne se fait que sur cinq paramètres sensibles.

Un modèle distribué : MODCOU

Le modèle couplé, MODCOU, (Ledoux, 1980 ; Girard *et al.*, 1981) est un modèle hydrologique pluie-débit distribué résultant d'une collaboration entre l'ORSTOM et

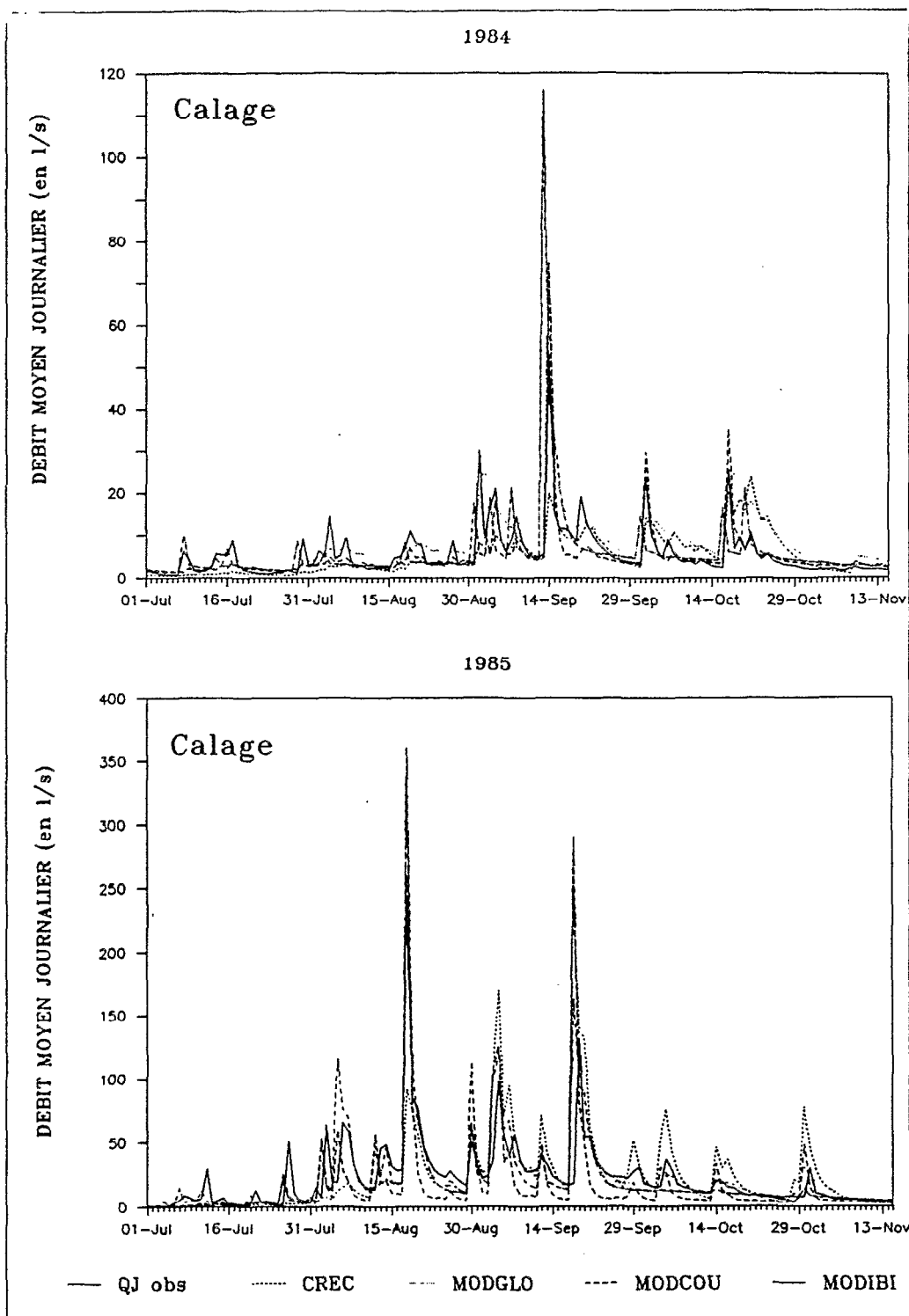


Figure 1. Simulation des débits moyens journaliers.

l'Ecole des Mines de Paris. Il a fait l'objet de nombreuses applications dans des régions diverses.

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 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 d'une part les *zones météo*, d'apports pluviométriques et d'aptitude à l'évapotranspiration, et d'autre part les *zones de production* de comportement hydrodynamique local homogène.

L'organisation générale

Le modèle nécessite des moyens de calcul relativement puissants. Il est divisé en cinq étapes qui s'effectuent séquentiellement :

- l'étape *GEOCOUC* se charge de la définition des caractéristiques géométriques et physiographiques du domaine étudié.
- l'étape *MODSUR* réalise la modélisation des phénomènes superficiels et assure les fonctions d'entrée, de production et de transfert de surface.
- l'étape *NONSAT* assure le transfert de l'infiltration calculée par *MODSUR* à travers la zone non saturée pour l'alimentation de la nappe.
- l'étape *MODCOUC* 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.
- l'étape *COMPAR* permet à la fin des étapes *MODSUR* et *MODCOUC* de confronter graphiquement les résultats du calcul avec les données d'observation.

Résultats

Les quatre modèles ont été employés sur les données de Booro-Borotou avec la même approche :

- *calage* sur la période du 1er avril 1984 au 31 mars 1987 ;
- *validation* sur la période du 1er avril 1987 au 31 mars 1988.

Ce sont les données de pluies journalières à l'ensemble des postes pluviométriques, ainsi que les valeurs mensuelles de l'évapotranspiration à la station climatologique, qui ont constitué dans tous les cas les données d'entrée du modèle. Les résultats obtenus ont été confrontés aux débits moyens journaliers calculés à partir des valeurs instantanées.

Par commodité, on s'intéresse dans la présentation des résultats plus particulièrement à la saison des pluies susceptible de présenter des variations notables de débit. On trouvera donc sur les figures 1 et 2 la représentation graphique des débits observés et calculés pour les quatre modèles et les quatre années d'observation (trois de

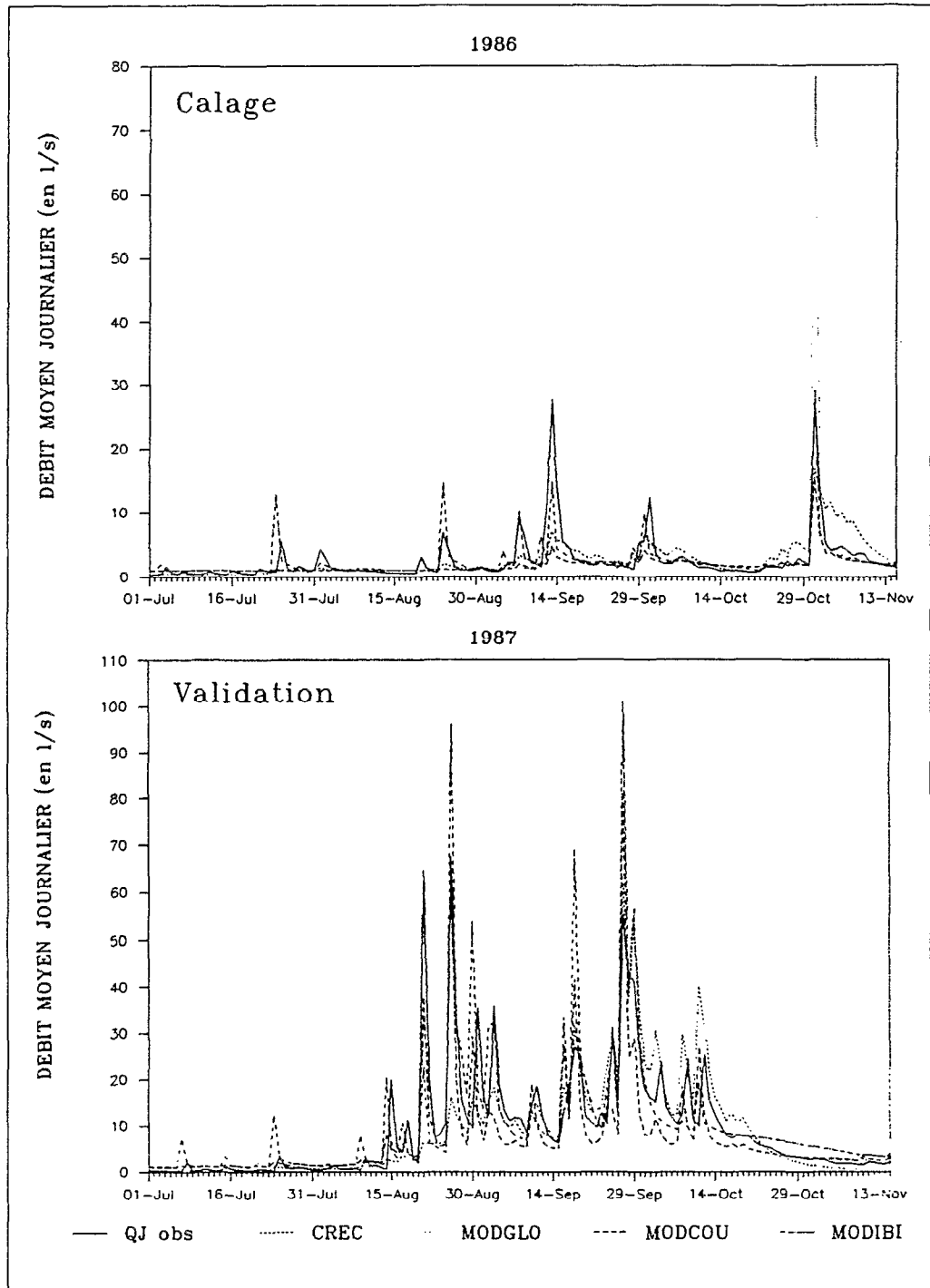


Figure 2. Simulation des débits moyens journaliers.

calage, une de validation) sur la période allant du 1er juillet au 15 novembre de chaque année.

Le critère de Nash, exprimé en %, a été calculé sur ces mêmes périodes pour chacun des modèles (tableau n°1).

Tableau n°1. Valeurs du critère de Nash en %.

année	CREC 5	MODGLO	MODIBI	MODCOU
1984	33,5	56,6	-185,2	72,6
1985	-15,3	-4,5	35,2	-10,9
1986	44,6	-90,2	60,7	39,9
1987	48,5	81,3	37,5	63,8
médiane	39,1	26,1	36,4	51,9

Sur le même principe, le tableau n°2 donne les valeurs du critère de Nash après avoir effectué un très léger lissage sur les débits à travers une moyenne mobile sur 3 jours.

Tableau n°2. Valeurs du critère de Nash en % après lissage des débits.

année	CREC 5	MODGLO	MODIBI	MODCOU
1984	27,5	46,0	-63,5	72,5
1985	7,5	61,8	68,6	42,0
1986	47,5	-38,3	72,6	38,3
1987	63,2	91,6	69,6	80,2
médiane	37,5	53,9	69,1	57,3

Si on s'en tient strictement à ces tableaux et que l'on prend en compte d'éventuels petits écarts liés à des problèmes de date ou d'horaire (gommés par le lissage), globalement le meilleur résultat est obtenu avec le modèle MODIBI, le plus mauvais avec CREC 5. Les valeurs médianes du critère restent toutefois dans tous les cas assez médiocres. MODCOU donne d'excellents résultats en années normales, mais reste décevant en année excédentaire (1985) ou déficitaire (1986). MODIBI donne de bons résultats d'ensemble, sauf la première année, sans doute à cause de difficulté de calage des valeurs initiales. On notera enfin que, généralement, le résultat de la validation est bon, et même, dans trois cas sur quatre, meilleur que les résultats obtenus en calage.

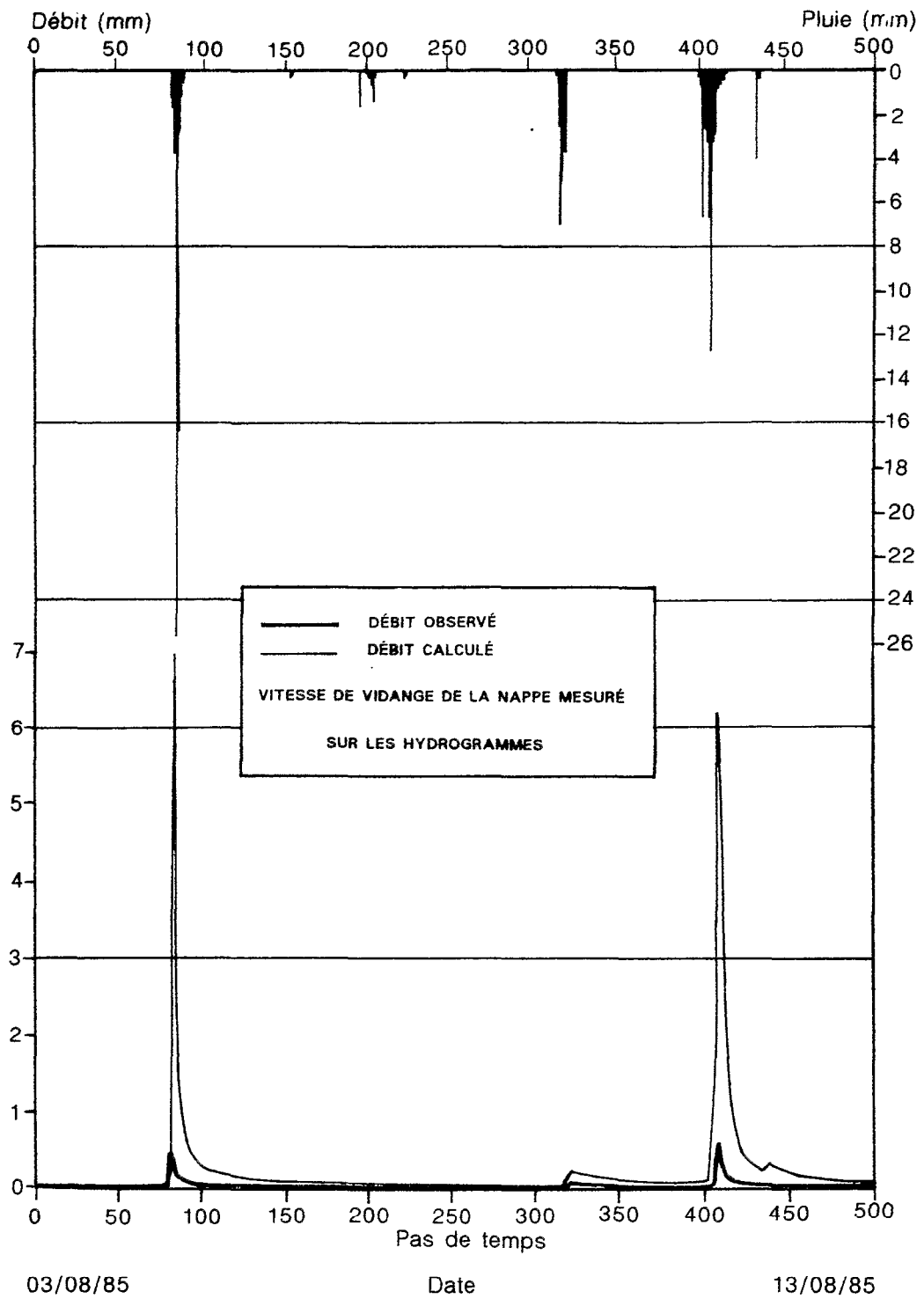


Figure 3. Calage de TOPMODEL en début de saison des pluies avec contrainte de tarissement.

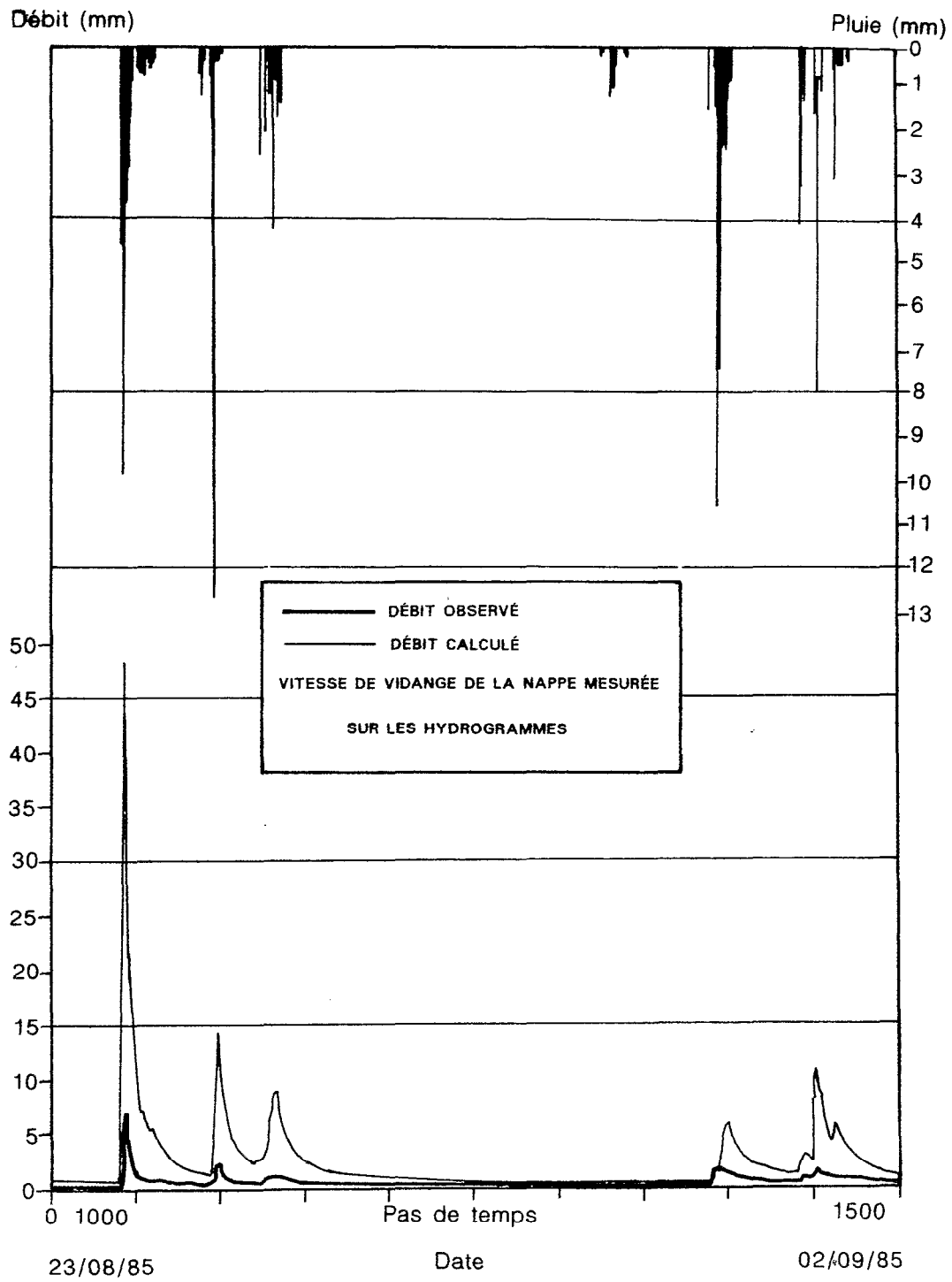


Figure 4. Calage de TOPMODEL en fin de saison des pluies avec contrainte de tarissement.

Un fait remarquable est à signaler à l'occasion de l'examen des paramètres des quatre modèles : les paramètres décrivant le volume du réservoir sol ont systématiquement des valeurs très élevées (l'ordre de grandeur est de 800 mm, alors que l'on considère généralement qu'il se situe autour de 200/300 mm). Ce résultat peut-être mis en relation avec les chiffres de variation de stock hydrique du sol, mesurés sur les tubes neutroniques, dont l'amplitude dépasse 500 mm.

On aurait pu penser que MODCOU était susceptible de donner des résultats nettement meilleurs que les modèles globaux. En réalité le modèle s'adapte mal aux conditions complexes de fonctionnement de Booro-Borotou et simule difficilement les transferts souterrains, n'étant pas conçu pour suivre à une échelle aussi fine des mécanismes de l'écoulement variables dans l'espace et le temps. De plus, les informations de terrain sur le domaine souterrain de Booro-Borotou sont relativement pauvres et conduisent à certaines hypothèses de calage qui nécessiteraient beaucoup plus de soin.

MODELISATION AU PAS DE TEMPS DE 30 MINUTES : TOPMODEL

Insatisfaits par les résultats obtenus par ces modèles, nous avons cherché à reprendre cette modélisation avec un modèle faisant mieux intervenir les processus identifiés de l'écoulement à Booro-Borotou et en particulier la notion d'écoulement sur surface saturée, directement associée au modelé du terrain. Un modèle topographique, TOPMODEL, a été développé récemment par une équipe anglaise autour de Beven et de Kirkby (1979, 1984). Dans le cadre d'une collaboration entre l'ORSTOM et l'Université de Lancaster, nous avons tenté d'appliquer ce modèle à un petit pas de temps (30 minutes) aux données de base de Booro-Borotou.

Principe de TOPMODEL

Le lecteur recherchant une présentation complète de TOPMODEL pourra se référer à de nombreuses descriptions, en particulier celle de Beven *et al.* (1984) ou celle, très récente présentant les dernières mises à jour, de Quinn *et al.* (1989). Nous n'en donnons ici que les principales idées.

TOPMODEL emploie un Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour calculer un indice topographique utilisé pour prévoir la dynamique de l'extension dans l'espace des aires contributives variables. Fondamentalement ce modèle constitue une passerelle entre la géomorphologie et l'hydrologie. On admet en effet que les principales composantes du relief sont liées à l'altération, à l'érosion et aux processus associés de transport en solution et de sédimentation, et sont contrôlées par le cycle de l'eau. La morphologie du bassin versant reflète le régime hydrologique (ou son évolution) qui a caractérisé le milieu pendant de très longues périodes.

Dans TOPMODEL l'hétérogénéité de la topographie du bassin est présentée sous la forme d'une fonction de distribution d'un indice topographique calculé automatiquement pour chaque point du bassin à partir du MNT. Cet indice, proposé par Beven et Kirkby (1979), s'écrit :

$$\ln(a/T_0 \tan b)$$

où :

a, surface drainée au point de calcul par unité de longueur de courbe de niveau ;
 T_0 , transmissivité à saturation en surface
 tan β , angle local de la pente.

Une subdivision en bassins versants élémentaires est réalisée, dont la production est ensuite composée et transférée à l'exutoire principal.

Les différentes étapes de la modélisation consistent en :

- a) Remplissage par les précipitations d'un réservoir d'interception dans lequel la reprise de l'évapotranspiration potentielle est autorisée ;
- b) Alimentation d'un réservoir de proche surface (zone racinaire) de volume maximal SRMAX, où l'on autorise également une certaine évaporation ; ce réservoir se vidange dans un réservoir profond susceptible de se saturer ; on admet que, dans ce réservoir, la conductivité décroît exponentiellement avec un coefficient m .
- c) Production d'écoulement de surface (aire contributive variable) si le réservoir profond est saturé ; c'est dans cette étape qu'intervient la distribution de l'indice sol/topographie.
- d) Production d'écoulement de base (interne retardé) selon une loi exponentielle.
- e) Transfert de l'écoulement de surface sur le bassin élémentaire.
- f) Convolution et transfert des écoulements de chaque bassin élémentaire.

Les trois principaux paramètres de TOPMODEL (m , T_0 , SRMAX) sont optimisés à l'aide d'une méthode de Rosenbrock (identique à celle employée pour CREC 5 et MODGLO).

Application à Booro-Borotou

TOPMODEL a été appliqué à Booro-Borotou sous une première forme simple :

- utilisant le MNT construit selon les principes exposés précédemment par Depraetere (1990) ; la maille élémentaire a cependant été ramenée à 12,5 m, ce qui permet de la confronter de façon simple au repérage général du bassin versant réalisé sur un carroyage de 100 m de côté ;
- subdivisant le bassin en deux sous-bassins élémentaires correspondant à la station amont et à la station principale ;
- sur un pas de temps élémentaire de 30 minutes appliqués aux observations de la période du 1er avril 1985 au 31 mars 1986 (correspondant à l'année hydrologique humide observée) ; les précipitations ont été calculées à partir des observations aux deux pluviographes du bassin.

Cette application est actuellement en cours. Nous en présentons ici les premiers résultats.

Calage libre

Un premier calage est réalisé, sans contrainte particulière sur les paramètres, donnant un résultat voisin de 50 % pour le critère de Nash. La valeur obtenue pour le paramètre m est élevée et donne une réponse très faible pour les écoulements de surface. La zone saturée pour les événements les plus importants atteint 40 % de la superficie totale du bassin. L'analyse plus détaillée montre que ces résultats ne

correspondent pas aux processus identifiés de l'écoulement sur le bassin et que la valeur du paramètre m doit être réduite.

Calage avec contrainte de tarissement

Le paramètre m est directement lié aux lois de tarissement du bassin. Il est donc possible de le calculer directement à partir des courbes de Chevallier (1988). La faible valeur déduite de m suggère une réponse de surface active et rapide lors d'une averse, ainsi que des variations rapides des stocks dans la zone racinaire (liées également à l'intense évapotranspiration). Le résultat obtenu en fixant la valeur de m et en optimisant les autres paramètres est présenté sur les figures 3 et 4. Il apparaît évidemment un sérieux problème de bilan. La forme des hydrogrammes est parfaitement reconstituée et en réduisant le volume des précipitations de 60 à 80 %, on obtiendrait un résultat acceptable. Le faible stockage dans la zone racinaire engendré par ce calage conduit à un large excédent dans le bilan simulé.

Calage avec stockage

En autorisant un stockage plus profond (augmentation notable du réservoir racinaire) on obtient les résultats des figures 5 et 6, qui, s'ils respectent mieux les bilans, ne reproduisent plus correctement les formes des tarissements et des écoulements de base.

Commentaires

Ces premiers résultats obtenus avec l'application simple de TOPMODEL au bassin de Booro-Borotou, démontre une fois de plus que la complexité du milieu ne s'adapte pas aussi limpide qu'on l'aurait souhaité à la conceptualisation standard proposée par le modèle. Les comportements hydrologiques très différents de la zone amont, caractérisée par une forte infiltration, et de la zone aval aux processus aussi variés que complexes, sont difficiles à modéliser. Il est probable que l'indice topographique, dans sa forme actuelle, est établi sur des hypothèses trop éloignées de la réalité de Booro-Borotou.

Mais cette approche n'est pas terminée au moment où nous la présentons ici et des développements sont envisagés pour résoudre les difficultés soulevées. Il faut cependant retenir de cette première tentative que les concepts simples de fonctionnement qui ont conduit à un modèle couronné de succès en climat tempéré humide doivent être considérés avec plus de précautions dans leur mise en oeuvre dans notre milieu de savane humide.

DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Les difficultés rencontrées dans la modélisation des écoulements sur le bassin versant de Booro-Borotou, illustrées rapidement par la présentation que nous en avons faite, ont eu pour conséquences immédiates :

- d'abord, un constat d'échec en regard des objectifs que nous nous étions fixés initialement ;
- ensuite, des questions, sur les raisons de cet échec ;
- enfin, des idées et peut-être de nouvelles perspectives pour aborder la modélisation.

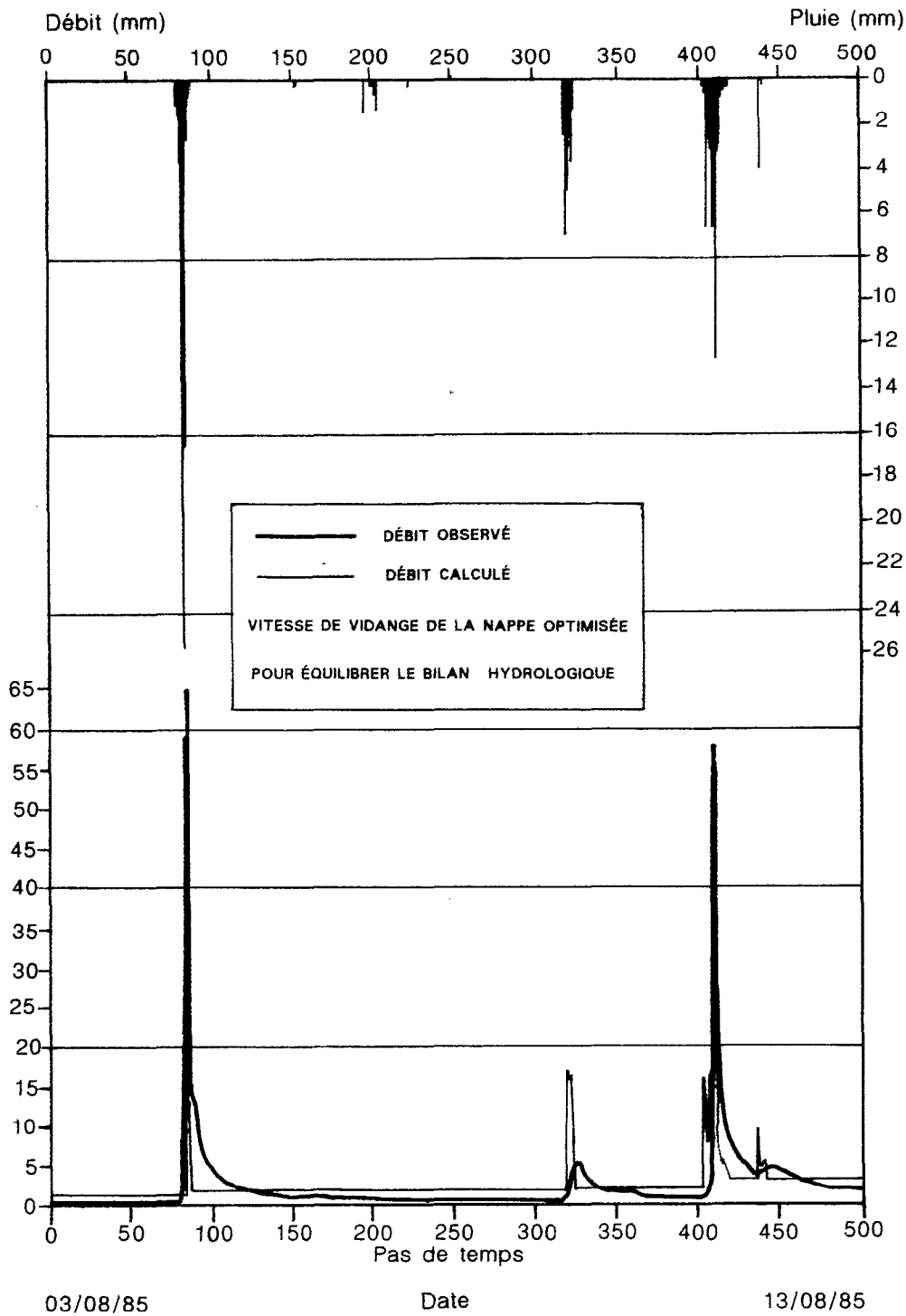


Figure 5. Calage de TOPMODEL avec stockage, en début de saison des pluies .

Un constat d'échec

Un des objectifs principaux du Programme Hyperbav au départ était d'utiliser la grande quantité d'informations collectées sur tous les facteurs intervenants sur le bilan hydrique pour, dans un premier temps, construire une modélisation de bonne qualité de la relation pluie-débit et, dans un deuxième temps, l'étendre à une zone plus large (le bassin versant de la Séné), voire même à un autre site dont Booro-Borotou aurait été *représentatif*. Dans notre esprit cette opération devait être simple, à l'image du travail que nous avons réalisé auparavant sur les bassins versants sahéliens de la Mare d'Oursi et de Gagara (Chevallier *et al.*, 1985 ; Albergel *et al.*, 1987).

La première des constatations que l'on doit faire sur le travail de modélisation réalisé à Booro Borotou, c'est que ça n'est pas simple. Si on excepte CREC 5, avec lequel la marge de manoeuvre est particulièrement réduite (et la qualité des résultats également), nous avons rencontré dans tous les cas des difficultés.

Sans doute, avec de meilleures données sur le domaine souterrain, nous aurions pu réaliser une modélisation plus fine et plus satisfaisante avec le Modèle Couplé. Mais à quel prix ? et dans quel but ? Il est peu probable que nous aurions réussi à appliquer les résultats ailleurs, où les informations n'auraient pu être que plus sommaires.

Des questions

On pourra nous objecter que nous n'avons pas choisi les bons outils. C'est possible, et c'est ce que nous pensions avant la mise en oeuvre de TOPMODEL, dont nous avons tendance à attendre des miracles. Les difficultés rencontrées pour la mise en oeuvre de ce modèle, dont la fiabilité en régions humides avait rarement été mise en défaut jusqu'à présent (à notre connaissance), montrent que le problème n'est pas là.

Le problème se trouve dans le choix de la zone d'étude et de l'échelle d'approche.

La zone d'étude

Dans un commentaire récent de l'étude de Booro-Borotou, Rodier (1989) écrit : *les bassins versants perméables en zone tropicale humide correspondent à un des domaines les plus mal connus des petits bassins tout simplement parce que les phénomènes d'infiltration y jouent un rôle très important et il s'agit de l'infiltration dans la totalité de ses aspects*. Il n'est plus nécessaire à la fin de ces Journées de revenir sur la complexité des processus rencontrés à Booro-Borotou, complexité dans l'espace et dans le temps que les outils actuels, même sophistiqués, de modélisation n'approchent que fort imparfaitement.

L'échelle d'approche

L'échelle du petit bassin versant est sans doute l'une des plus difficile à étudier à travers la modélisation. En effet, elle prend en compte d'une part une production complexe et d'autre part un transfert délicat dans un réseau hydrographique difficile à cerner (depuis la protogriffe, où l'on assiste au début de la concentration de l'écoulement, au cours d'eau proprement dit). A des échelles plus grandes ou plus petites, l'un ou l'autre de ces aspects de production et de transfert, pratiquement toujours distingués dans les modèles hydrologiques, prend une part prépondérante sur l'autre, particulièrement dans le cas des écoulements internes.

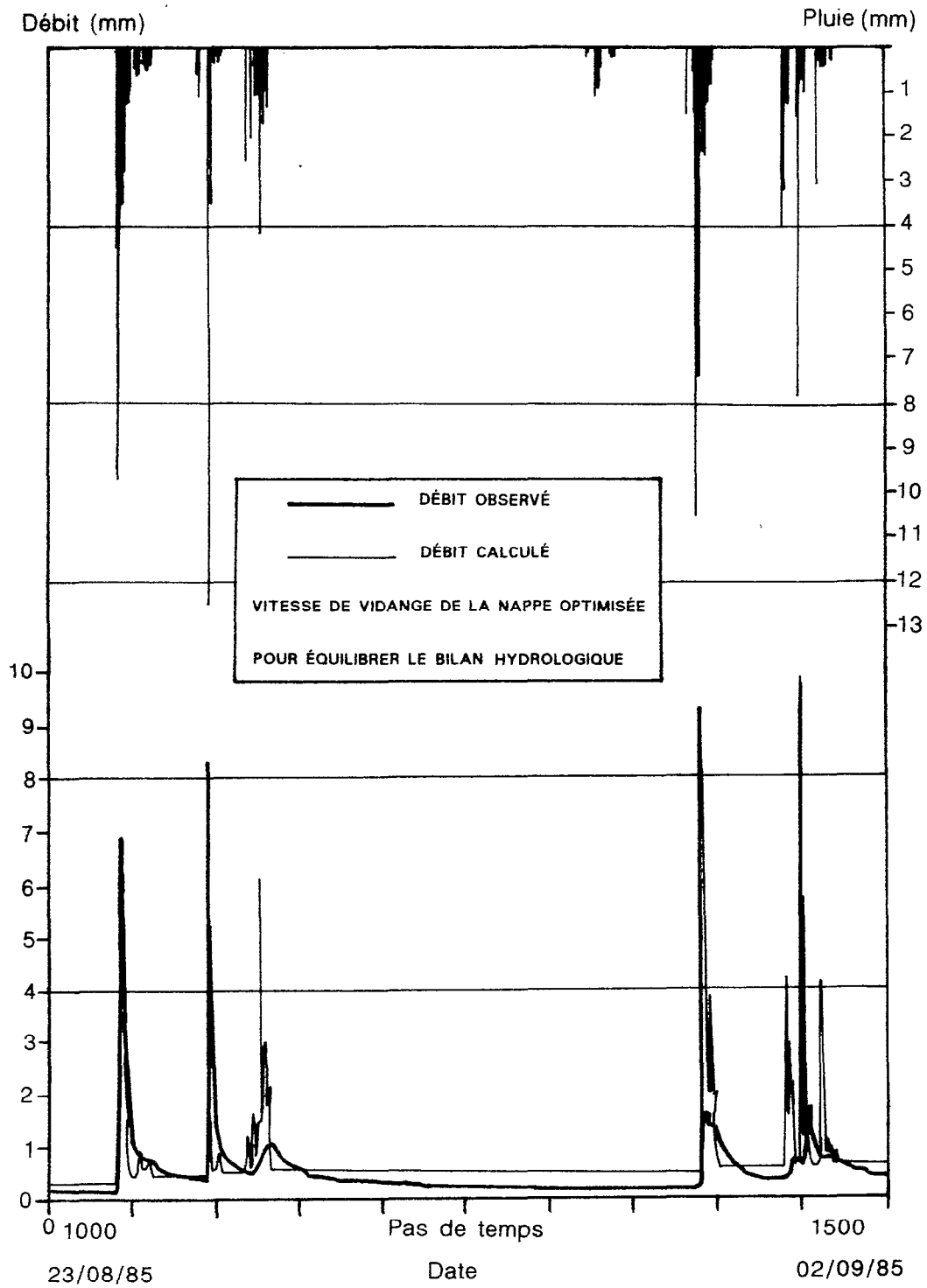


Figure 6. Calage de TOPMODEL avec stockage, en fin de saison des pluies .

De nouvelles perspectives

En réalité, sur ces petits bassins versants perméables de zone tropicale humide, pour reprendre l'appellation de Rodier, il n'y a pas de séparation géographique entre les zones de production et les zones de transfert ; et on peut même admettre que cette séparation correspond d'autant moins à une réalité physique que l'échelle d'étude est fine et que le pas de temps de la modélisation est petit. A l'issue des travaux de terrain, les mécanismes de l'écoulement sont souvent connus, ou du moins identifiés. Cette forme de connaissance devrait pouvoir être utilisée dans les modèles au même titre que les données numériques.

Dans cet esprit, une modélisation d'un nouveau type peut apporter des réponses à deux types de besoins : la validation des hypothèses de fonctionnement, la prévision de l'effet d'une modification du milieu. Une proposition de programme a été soumise dans ce sens et devrait débiter à Montpellier dans les prochains mois.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Albergel (J.), Chevallier (P.), Lortic (B.), 1987.** D'Oursi à Gagara : transposition d'un modèle de ruissellement dans le Sahel (Burkina Faso). *Hydrol. Continent.* 2(2):77-86.
- Beven (K.), Kirkby (M.J.), 1979.** A Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. *Hydrol. Sc. Bull.*, 24(1).
- Beven (K.), Kirkby (M.J.), Schoffield (N.), Tagg (A.), 1984.** Testing a Physically Based Flood Forecasting Model TOPMODEL for Three U.K. Catchments. *J. Hydrol.*, 69:119-143
- Chevallier (P.), 1988.** Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide, Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). *Thèse*, Université de Montpellier. Publié en 1990. ORSTOM, *Coll. Etudes et Thèses*, 332 p., 6 cartes h.t.
- Chevallier (P.), Claude (J.), Pouyaud (B.), Bernard (A.), 1985.** Pluies et crues au Sahel, Hydrologie de la Mare d'Oursi (Burkina Faso). 1976-1981. *Travaux et Documents de l'ORSTOM*, n°190. 256 p.
- Combes (V.), 1985.** Paramétrisation de modèles conceptuels d'un bassin versant. Contribution à l'élaboration d'un système de mesure des caractéristiques hydrologiques d'un bassin versant. Application au modèle CREC. *Thèse de Docteur Ingénieur*, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.
- Cormary (Y.), Guilbot (A.), 1971.** Ajustement et réglage des modèles déterministes. Méthode de calage des paramètres. *La Houille Blanche*, 2/1971 : 131-140.
- Depraetere (C.), 1990.** Etude géomorphométrique du bassin-versant de Booro-Borotou à partir d'un Modèle Numérique de Terrain. Cet ouvrage.
- Dezetter (A.), 1986.** Contribution à l'étude et à la refonte de deux modèles hydropluviométriques au pas de temps journalier. Modèle Girard, Modèle Ibiza. Rapport de stage effectué à l'ORSTOM, juillet-août 1986. Multigr., ORSTOM, Montpellier.
- Girard (G.), Ledoux (E.), Villeneuve (J.P.), 1981.** Le modèle couplé. Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système écologique. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol XVIII, n°4.
- Ibiza (D.), 1983.** Un modèle simplifié de calcul des écoulements mensuels par bilan hydrique. Application : variation de quelques paramètres hydrologiques d'après l'aspect des bassins. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol XX, n°1, pp. 3-46.
- Ibiza (D.), 1988.** Note complémentaire pour l'utilisation du modèle MODQJ (MODIBI). ORSTOM, Montpellier, multigr. 5 p.
- 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.
- Nash (J.E.)**, 1969. A Course of Lectures on Parametric or Analytical Hydrology. Great Lake Institute. University of Toronto Pr. 38, Lect. n°12.
- O'Donnel (T.)**, 1986. Deterministic Catchment Modelling. *In* : Kraijenhoff (D.A.) and Moll (J.R.) (editors), River Flow Modelling and Forecasting, pp. 11-37, D. Reidel Publishing Company.
- Quinn (P.)**, **Beven (K.)**, **Morris (D.)**, **Moore (R.)**, 1989. The Use of Digital Terrain Data in Modelling the Response of Hillslope and Headwaters. A paraître dans les comptes-rendus du British Hydrological Society 1989 Symposium.
- Rodier (J.)**, 1990. Postface. *In* : Chevallier (P.) 1988. *cf supra*.
- Rosenbrock (H.H.)**, 1960. An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Fonction. *The Computer J.*, n°3, pp.175-184.
- Servat (E.)**, 1986. Présentation de trois modèles globaux conceptuels déterministes : CREC 5, MODGLO, MODIBI. *Multigr.*, 58 p. ORSTOM, Montpellier.