

UN MODÈLE HYDROLOGIQUE SPATIALISÉ POUR LA SIMULATION DE TRÈS GRANDS BASSINS : LE MODÈLE EROS, FORMÉ DE GRAPPES DE MODÈLES GLOBAUX ÉLÉMENTAIRES

D. THIERRY¹ ; C. MOUTZOPOULOS²

RÉSUMÉ

La modélisation des écoulements dans les très grands bassins hétérogènes ne peut être abordée simplement par les modèles hydrologiques globaux pluie-débit. De tels modèles permettent en effet de calculer le débit uniquement à l'exutoire du bassin et à condition qu'il soit possible de définir une lame d'eau moyenne représentative et des paramètres moyens. Ceci n'est bien évidemment pas possible en présence de bassins montagneux enneigés en partie, ou bien en climat aride où les écoulements sont très localisés. D'autre part, les modèles globaux ne permettent pas de prévoir l'influence d'un aménagement : pompage en rivière, barrage, imperméabilisation, etc..

L'approche classique consiste alors à se tourner vers des modèles spatialisés sous forme d'un découpage du bassin en mailles régulières. Cette approche donne de bons résultats mais au prix d'une complexité beaucoup plus grande et faisant intervenir de très nombreux paramètres. Elle ne se prête ni à un calage automatique ni à une analyse de sensibilité de paramètres ; d'autre part, elle est peu adaptée à des micro-ordinateurs donc aux pays en développement. On a donc mis au point un modèle à mi-chemin entre les modèles globaux et les modèles maillés : le modèle EROS (Écoulement dans une Rivière Organisée en Sous-bassins). Ce modèle est formé d'une grappe de modèles globaux élémentaires (par exemple une dizaine) ayant chacun une lame d'eau et quelques paramètres globaux. Il est possible d'introduire des prélèvements -existants ou prévus- en rivière ou en nappe dans des bassins. Ce modèle conserve la légèreté des modèles globaux, en particulier le calage automatique et le faible nombre de paramètres donc la robustesse ; il permet cependant de modéliser des bassins complexes, à l'échelon régional, et surtout d'y prévoir l'influence d'aménagements.

¹BRGM 4S/EAU - B.P. 6009 - 4500 Orléans - Cedex 2 - France

²Université de Thessalonique - Thessalonique - Grèce

INTRODUCTION

Le calcul du débit à l'aval d'un bassin versant hydrologique à partir des précipitations auquel il est soumis, est un problème extrêmement classique en hydrologie essentiellement pour deux raisons :

- l'information pluviométrique est généralement beaucoup plus abondante que l'information hydrométrique, parce qu'il est beaucoup plus simple et économique de mesurer la pluie en continu avec un pluviomètre que de jauger un cours d'eau ;
- il est fondamental de connaître les réactions d'un bassin versant à des séquences de précipitations très abondantes -qui peuvent provoquer des inondations- ou à des séquences très déficitaires qui provoquent des difficultés d'approvisionnement.

Ces deux classes de problèmes, qui sont tous les deux l'analyse des réactions d'un bassin à des variations naturelles d'alimentation, peuvent être résolus classiquement avec des modèles simples entrée-sortie, à condition que le bassin ne soit pas trop grand pour qu'on puisse lui associer une entrée unique. Ces modèles simples sont du type fonction de transfert ou convolution d'une réponse unitaire pour les problèmes de crue pour lesquels le sol du bassin étant saturé, la réponse à la pluie est relativement linéaire, ou bien de type modèle hydrologique global à réservoir (voir par exemple NASH, 1959 ; Roche, 1971 ; DEGALLIER, 1972 ; MÉRO, 1979 ; Thiery, 1980, 1988 ; Roche et Thiery, 1984 ; EDIJATNO et MICHEL, 1989).

L'intérêt de ce type de modèle est sa simplicité, puisqu'il ne fait intervenir qu'un nombre très limité de paramètres (de 3 à 15 environ) qui peuvent être calés (ajustés) par des procédures d'optimisation automatique très économiques. Un autre avantage -associé à la simplicité- est la robustesse. Les paramètres, étant peu nombreux, sont bien identifiés et non redondants. Un calage sur une relativement courte période d'observation peut être extrapolé sans trop de danger sur une période plus longue. D'autre part, une analyse de sensibilité sur les paramètres (LEIJNSE, 1982 ; Thiery, 1989, 1990) permet de connaître l'intervalle de confiance des paramètres et surtout l'intervalle de confiance sur les prévisions réalisées avec le modèle. La limite d'application de ce type de modèle est la dimension du bassin versant en relation avec son homogénéité morphologique ou climatique. Il est nécessaire de pouvoir définir :

- une lame d'eau moyenne : ceci n'est évidemment pas possible pour de très grands bassins (de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres carrés) qui sont affectés par plusieurs climats différents, ou pour des bassins montagneux qui ne sont enneigés que sur une partie de leur extension ;

- des paramètres moyens : il n'est pas possible par ce type de modèles de représenter des bassins très hétérogènes, par exemple en climat aride, ou les écoulements sont très localisés et prennent naissance sur quelques zones à faible évaporation et faible infiltration.

Dans cet objectif, une spatialisation d'un modèle global par séparation en deux compartiments a été réalisée par Vilmus (1990).

Une autre classe de problèmes est formée par les études d'aménagement qui consistent à prévoir l'influence d'aménagement de bassins : implantation de prélèvements en rivière, de retenues, de dérivations, imperméabilisation d'une partie du bassin...

Il n'est alors plus possible d'utiliser un modèle global pluie-débit puisque les paramètres de modélisation (par exemple le coefficient de ruissellement ou de tarissement, ou bien la réserve utile du sol) changent, et il n'est pas possible de prévoir comment ils vont changer. L'approche classique consiste à se tourner vers des modèles spatialisés sous forme d'un découpage en mailles régulières (ou irrégulières). C'est l'approche retenue par exemple par le modèle CEQUEAU (GIRARD *et al.*, 1972) éventuellement couplée avec les écoulements souterrains (GIRARD *et al.*, 1979 ; Ledoux, 1980). De tels modèles fonctionnent correctement mais au prix d'une réelle complexité qui en rend l'utilisation coûteuse et peu adaptée aux micro-ordinateurs. D'autre part, le nombre très élevé de paramètres (plusieurs dizaines de paramètres au moins) rend vaine toute tentative de calage automatique et -plus grave- toute possibilité rigoureuse d'analyse de sensibilité.

Pour tenter de conserver les avantages inhérents aux modèles globaux (utilisation simple, calage automatique, robustesse, analyse de sensibilité) et ceux apportés par les modèles discrétisés (modélisation de grands bassins hétérogènes, prévision de l'influence d'aménagements...), on a mis au point un nouveau type de modèle à mi-chemin entre les modèles globaux et les modèles maillés : le modèle EROS (Écoulement dans une Rivière Organisée en Sous-bassins). Ce modèle est formé d'une grappe de modèles globaux élémentaires, chaque modèle global représentant un sous-bassin homogène caractérisé par une lame d'eau et quelques paramètres globaux. Ces sous-bassins (donc ces modèles globaux élémentaires) sont interconnectés par un arbre de branchement et il est possible de prévoir l'influence d'aménagement sous forme d'introduction de prélèvements en rivière au point d'interconnexion de plusieurs sous-bassins, ou en nappe (loin du cours d'eau) dans le bassin, ou bien sous forme de dérivations par modification de l'interconnexion des bassins.

Chaque sous-bassin fait intervenir quatre à cinq paramètres qu'il est possible de fixer ou d'optimiser. D'autre part, certains paramètres peuvent être contraints à être identiques pour plusieurs ou pour tous les sous-bassins.

Le logiciel EROS est opérationnel sur stations de travail Vax ainsi que sur micro-ordinateurs compatibles IBM/PC.

SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT DU MODÈLE EROS

DÉCOUPAGE EN SOUS-BASSINS

La zone d'étude est découpée en un certain nombre de sous-bassins composant une grappe et reliés entre eux par une relation d'arborescence. On affecte à chaque bassin un numéro d'ordre et pour chaque bassin on définit les bassins amonts qui sont au nombre de 0 (sous-bassins sans affluent) 1 (sous-bassins en série) ou 2 (2 sous-bassins affluents).

Le débit calculé à l'exutoire des bassins amonts arrive directement dans le sous-bassin aval et chaque exutoire peut être :

- un point d'observations : on y dispose d'observations de chroniques de débits ;
- un point d'édition : on ne connaît pas le débit mais on veut le déterminer ;
- un point intermédiaire.

IMPLANTATION DE PRÉLÈVEMENTS

Il est possible également d'implanter des prélèvements en rivière en n'importe quel exutoire (avant l'exutoire). Ces débits sont alors retranchés du débit calculé, bien évidemment dans la limite des débits disponibles en ce point. De même, il est possible d'implanter des prélèvements en nappe. Ces derniers agissent alors à l'intérieur du réservoir souterrain qui représente les écoulements en nappe -dans la limite du stock en eau disponible dans ce sous-bassin-. Les prélèvements sont supposés être situés loin du cours d'eau et ils ne peuvent donc pas diminuer le ruissellement superficiel.

BILAN DANS UN SOUS-BASSIN

Chaque sous-bassin élémentaire est soumis à une lame d'eau de pluie et à une évapotranspiration potentielle. Le bassin est représenté par trois réservoirs :

- un premier réservoir représentant le sol, de capacité en eau RUMAX, qui est soumis à l'évapotranspiration ;
- un deuxième réservoir, non linéaire, dans lequel s'effectue la répartition entre ruissellement et infiltration ;
- un troisième réservoir, caractérisé par un temps de tarissement, qui représente la nappe souterraine.

Le schéma de fonctionnement de chaque sous-bassin est décrit sur la figure 1. Le bilan dans chaque sous-bassin est effectué au pas de temps mensuel (ou journalier). Le débit calculé à l'exutoire est alors la somme :

- du ruissellement dans le sous-bassin ;
- de l'écoulement superficiel dans le sous-bassin ;
- du débit total des un ou deux sous-bassins amonts à laquelle on retranche éventuellement :

- les prélèvements à l'exutoire,
- les prélèvements en nappe (dans la mesure du débit disponible).

Il est à noter que la superficie de certains sous-bassins peut être inconnue (et donc à déterminer par calage) ce qui est fréquent dans le cas de sous-bassins alimentés par des sources dont le bassin exact n'est pas connu.

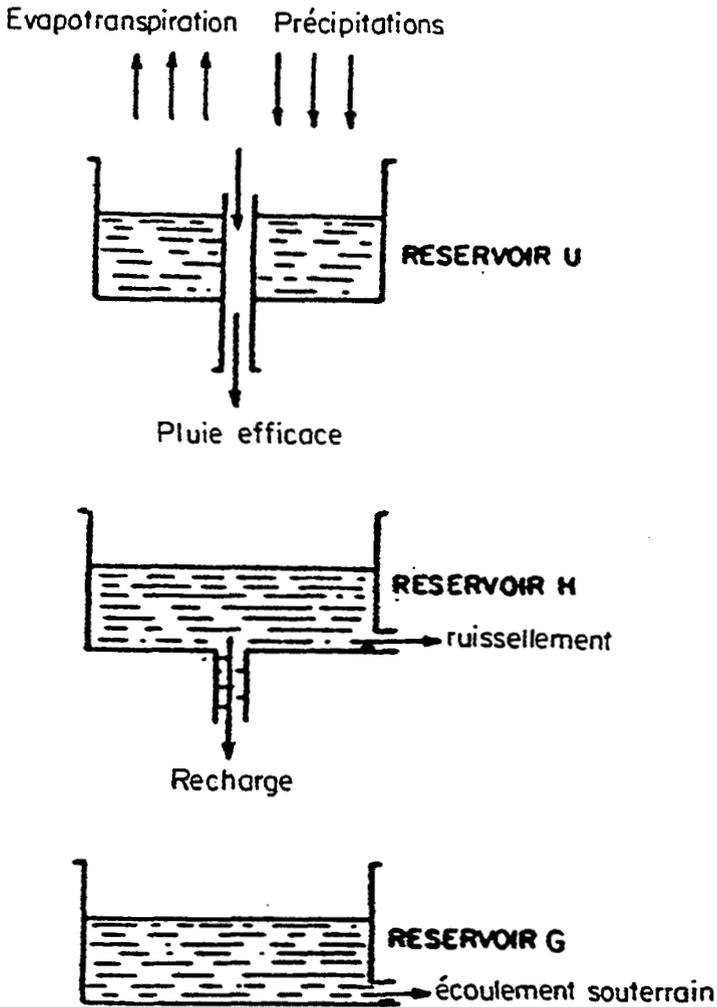


Figure 1

Bilan pluie-débit dans un sous-bassin élémentaire

CALAGE DU MODÈLE

Le modèle fait intervenir un certain nombre de paramètres typiques (quatre à cinq paramètres par bassin). Pour chaque paramètre on indique :

- s'il est connu ;
- s'il est inconnu et doit donc être optimiser entre des bornes ;
- s'il est inconnu mais identique au paramètre correspondant d'un autre (ou de plusieurs autres) sous-bassin(s).

Cette troisième possibilité est intéressante puisqu'elle permet de limiter efficacement le nombre de paramètres. Par exemple, il est possible de décider que le temps de tarissement du bassin n°4 est inconnu mais identique à celui des bassins 1 et 3 (qui sont inconnus). Il y a alors un seul paramètre à optimiser pour ces trois bassins.

Le calage du modèle consiste à ajuster tous les paramètres inconnus pour reproduire au mieux tous les débits observés en tous points d'observations. Dans ce but, on utilise une procédure d'optimisation non linéaire - dérivée de la méthode de ROSENBROCK - qui maximise la somme des coefficients de détermination (coefficients de corrélation avec paramètres a et b fixés respectivement à 1 et 0) entre les débits calculés et observés en chaque point d'observation.

Quand toutes les surfaces de tous les sous-bassins sont connues, la méthode d'optimisation est simple. Par contre, quand certaines surfaces sont inconnues et qu'il y a des prélèvements, le système d'optimisation est complexe puisque le débit calculé à un exutoire dépend des prélèvements dans le bassin et en amont dont l'influence dépend elle-même de la superficie des bassins inconnus. Les superficies inconnues sont donc déterminées par régressions multiples de manière itérative pour itération sur les paramètres physiques du modèle (temps de tarissement, capacité de la réserve utile).

EXEMPLE D'APPLICATION

ARBORESCENCE DU BASSIN

La figure 2 présente un exemple synthétique de bassin formé de neuf sous-bassins (numérotés de 1 à 9). La partie gauche est un plan du bassin versant et la partie droite montre l'arborescence correspondante. On dispose de cinq points d'observations : à l'exutoire des sous-bassins n°1, 2, 3, 6 et 9. On remarque qu'on a introduit trois bassins fictifs supplémentaires : en aval de la jonction 5 et 6, en aval du bassin 7 et en aval du bassin 8. Ces bassins fictifs (auxquels on a donné une superficie qui tend vers zéro) ont été introduits pour respecter la règle qui stipule qu'un bassin ne peut avoir que deux bassins directement en amont.

L'ensemble du bassin est constitué de cinq « grappes », chaque grappe étant constituée par un point de contrôle :

Numéro de la grappe	Rang de la grappe	Grappes amont	Sous-bassin
5	3	-	3
4	2	-	2
3	2	-	1
2	2	5	6
1	1	2,3,4	4,5,7,8,9

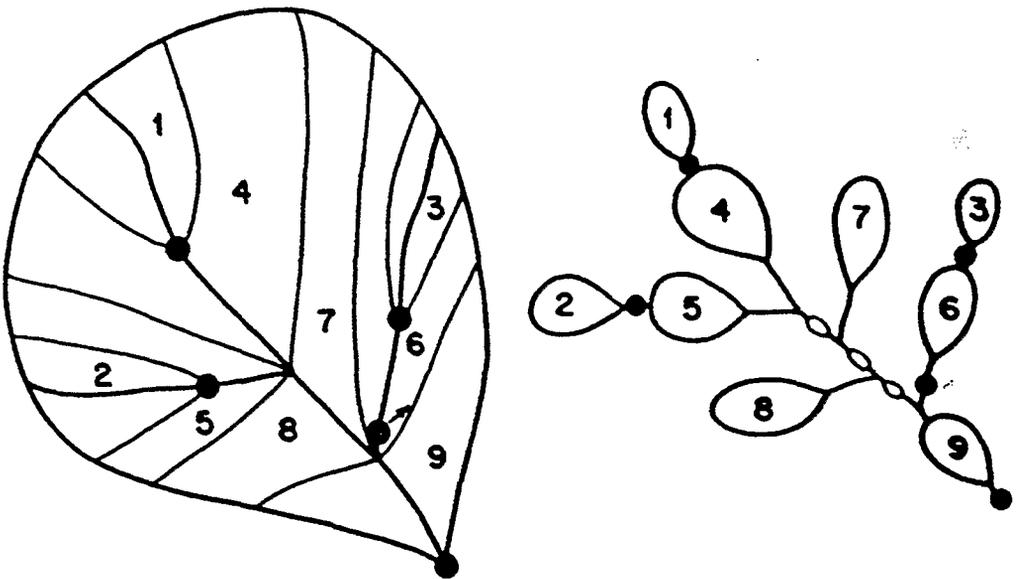


Figure 2
 Modèle EROS. Exemple d'application d'un bassin complexe décomposé en neuf sous-bassins

CALAGE SUR LES OBSERVATIONS

Pour le calage, les superficies des bassins 1, 5 et 7 étaient inconnues. Il y avait d'autre part au total quatorze paramètres à optimiser (mais cinq points d'observations pendant quatre ans de 1989 à 1992). Après calage (avec des données correspondant à un autre pas de temps donc ne permettant pas un calage parfait), on obtient les valeurs suivantes pour les carrés des coefficients de détermination :

Numéro de grappe	5	4	3	2	1
Numéro de bassin	3	2	1	6	9
Carré de corrélation	0,98	0,97	0,98	0,93	0,92

La figure 3 montre que l'ajustement est très bon.

EXPLOITATION DU MODÈLE POUR SIMULER DES AMÉNAGEMENTS

Après calage du modèle, on a simulé un aménagement consistant à introduire des prélèvements en rivière de 2 m³/s au cours des mois de juillet à septembre dans le bassin n°1 et des prélèvements en nappe, pendant les mêmes mois, dans le bassin n°6.

La figure 4 montre l'effet prévu de l'aménagement.

Dans le petit bassin n°1 (le plus en amont), on voit que la rivière est asséchée chaque année et que les prélèvements ne peuvent être totalement satisfaits puisqu'ils sont supérieurs aux débits dans le cours d'eau.

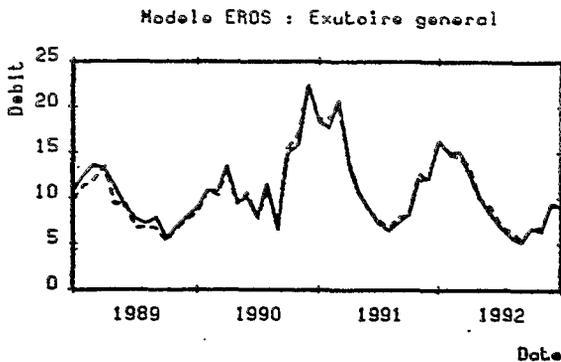


Figure 3
Calage du modèle : débits à l'exutoire général

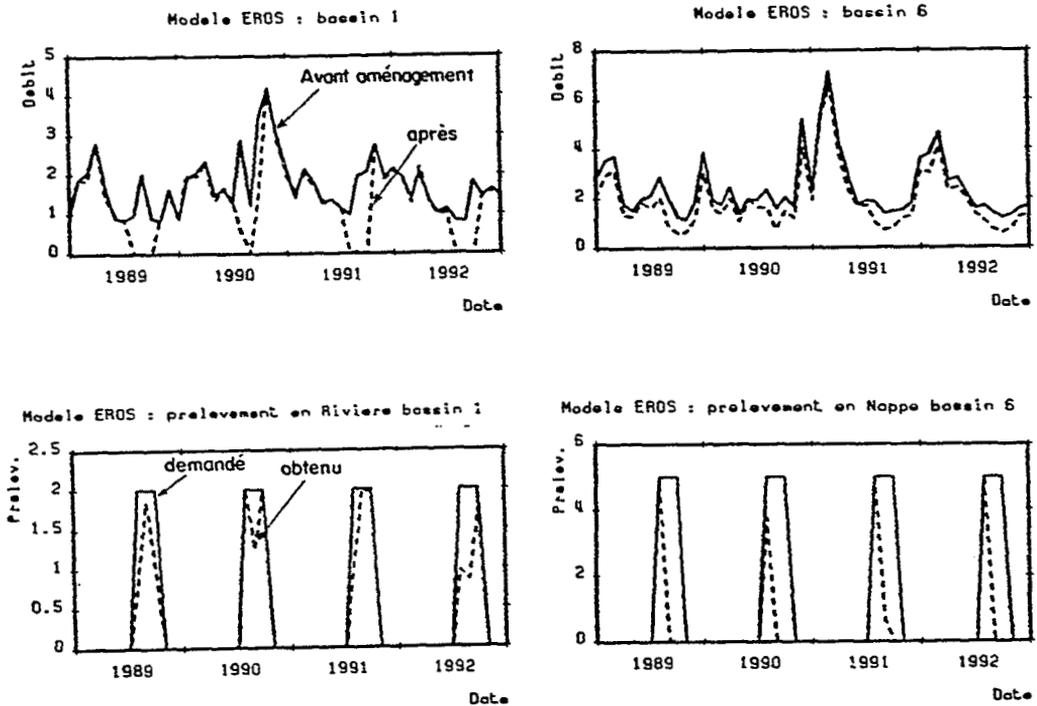


Figure 4

*Simulation d'un aménagement : prélèvement en rivière dans le bassin n°1
et en nappe dans le bassin n°6*

Dans le bassin n° 6 par contre, bien que le débit des mois d'été soit de l'ordre de 1,5 à 2 m³/s, on arrive à prélever 5 m³/s en juillet, en sollicitant les réserves de la nappe. Par contre, à partir d'août, ces réserves sont asséchées et on ne peut plus rien prélever en nappe, bien que la rivière ne soit pas asséchée comme le montre la figure. L'écoulement en rivière n'est plus alors constitué que de ruissellement superficiel qui ne peut être prélevé en nappe.

REMERCIEMENTS

La conception et la réalisation du modèle EROS ont été financées par la Direction Scientifique du BRGM sur le projet de recherche n° EG43 « spatialisés des modèles globaux ».

CONCLUSION

Le modèle EROS est un compromis entre les modèles globaux simples et robustes mais inadaptés aux grands bassins hétérogènes et aux études d'aménagements, et les modèles spatialisés maillés qui peuvent tout simuler... mais dont la robustesse est très sujette à caution. Le modèle EROS dispose d'une procédure de calage automatique efficace et fonctionne sur stations de travail et micro-ordinateurs PC ; sa mise en oeuvre extrêmement facile, rapide et économique, lui donne un large domaine d'action.

BIBLIOGRAPHIE

- DEGALLIER R., 1972 - Un modèle de simulation des écoulements superficiels et souterrains : le modèle SIMERO. Bulletin du BRGM, section III, n°3.
- EDIJATNO, MICHEL C., 1989 - Un modèle pluie-débit journalier à 3 paramètres. La Houille Blanche, 2. 113-121.
- GIRARD G., MORIN G., CHARBONNEAU R., 1972 - Modèle précipitations-débits à discrétisation spatiale. Cahiers Orstom, série Hydrologie, vol. IX, n° 4.
- GIRARD G., LEDOUX E., VILLENEUVE J.P., 1979 - Modèle intégré pluie-eau de surface-eau souterraine. Société Hydrotechnique de France, session 114, novembre 1979.
- LEDOUX E., 1980 - Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Thèse École Nat. Sup. Mines de Paris et Univ. P. et M. Curie.
- LEINSE A., 1982 - Evaluation of pumping tests : identification of parameter values and their reliability. Improvements of methods of Long Term Prediction of Variations in Groundwater Resources and Regimes due to Human activity (Proceeding of the Exeter Symposium July 1982). AISH Publ. n° 136.

- MÉRO F., 1979 - The MM08 hydrometeorological simulation system. Basic concepts and operator's guide. Tel Aviv, 18 p., April 1978.
- NASH J.E., 1959 - Systematic determination of unit hydrograph parameters. J. Geophys. Res., vol. 64, n° 1.