

Modélisation hydrologique et hétérogénéité spatiale des bassins

Vers une comparaison de l'approche globale et de l'approche distribuée

J.C. Baudez*⁽¹⁾, C. Loumagne⁽¹⁾, Cl. Michel⁽¹⁾, B. Palagos⁽¹⁾, V. Gomendy⁽²⁾ et F. Bartoli⁽²⁾

(1) CEMAGREF, division qualité et fonctionnement hydrologique des systèmes aquatiques, Parc de Tourvoie BP 121
92185 Antony Cedex

* adresse actuelle : CEMAGREF, domaine des palaquins, 03 150 Montoldre

(2) CNRS, Centre de Pédologie Biologique associé à l'Université Henri Poincaré - Nancy I, BP 5,
54501 Vandoeuvre les Nancy Cedex

RÉSUMÉ

La pertinence de l'utilisation d'une approche distribuée par rapport à une approche globale de la transformation pluie-débit à travers un modèle hydrologique est une question souvent résolue de façon intuitive et au cas par cas. Cette recherche présente une tentative pour répondre à ce problème, afin d'améliorer les procédures de modélisation des débits d'un bassin versant, mais aussi de les généraliser aux différentes situations rencontrées. Deux approches complémentaires ont été suivies sur un échantillon de quinze triplets de bassins versants français jaugés, chacun de ces triplets étant constitué de deux sous-bassins juxtaposés d'amont en aval et de superficie équivalente, et d'un petit sous-bassin aval.

La première approche a consisté à étudier l'intérêt de découper un bassin versant en sous-unités pour sa modélisation hydrologique. Pour ce faire, une analyse statistique non paramétrique des résultats du critère de Nash de validité d'un modèle s'est avérée être la plus pertinente pour classer les bassins en fonction de la valeur du test de Wilcoxon. La seconde approche a porté sur une recherche, pour le même échantillon de bassins, de caractéristiques supposées a priori déterminantes pour l'hydrologie, à savoir la densité du réseau hydrographique, l'hypsométrie, et la nature des couvertures pédologique et végétale. Les différences observées sur les caractéristiques de deux sous-bassins juxtaposés ont été quantifiées afin d'obtenir des indices d'hétérogénéité de bassin.

Une comparaison des résultats a été alors réalisée afin de déterminer s'il était possible d'établir un lien entre la préférence raisonnée d'un type de modélisation hydrologique et les degrés d'hétérogénéité de bassin. Cette comparaison a mis en évidence une relation entre les valeurs du test de Wilcoxon et certains déterminants hydrologiques. C'est ainsi que le degré d'hétérogénéité de la couverture pédologique s'est avéré être le plus discriminant dans le choix de discrétiser ou non un bassin versant. Certaines valeurs du test de Wilcoxon ont été aussi reliées à la taille des bassins, ce qui serait attribuable au fait que les hétérogénéités de bassin peuvent augmenter en fonction de l'échelle d'observation, en ce qui concerne notamment la couverture pédologique.

Mots clés

Modélisation hydrologique, bassins versants, déterminants hydrologiques, indice d'hétérogénéité, densité de réseau, hypsométrie, sols, végétation, superficie de bassin.

SUMMARY**HYDROLOGY MODELLING AS A FUNCTION OF CATCHMENT HETEROGENEITY**

The question whether a distributed approach is more relevant than a lumped one for rainfall-runoff modelling has not yet been answered clearly. Most of the time, the problem is solved rather intuitively on a case by case basis. In this research, we attempted to bring an objective answer to this problem, in order to progress in catchment modelling. Two complementary approaches were used on the same set of fifteen gauged french catchment triplets, each triplet being composed by two up to down juxtaposed catchments and by a little down stream catchment.

In the first approach, we tried to assess whether it was interesting or not to partition a catchment in two sub-units during the hydrological modelling process. The statistical study of the fit of the results, as expressed by the Nash and Sutcliffe criterion, did not show a significant difference between both lumped and semi-distributed modelling approaches. In the second approach, we used the same catchment sample and measured, for each subunit, physical characteristics assumed to be relevant for its hydrological behaviour : drainage network density, hypsometry, soils and vegetation. Differences observed in the sub-units characteristics were quantified to obtain catchment heterogeneity indexes.

The topic is complex and it is not straightforward to marry the two approaches. However, we combined the results in order to determine if it was possible to establish a link between the degree of catchment heterogeneity and the type of hydrological model. This combination of results has showed a relation between some of the studied catchment traits and the Wilcoxon test values which were carried out on the two sets of Nash and Sutcliffe criterion values (lumped and semi-distributed models). The choice of a modelling type was mainly linked to soil heterogeneity, and secondary to the catchment size, which were partly interdependant parameters.

Key-words

Catchment modelling, catchments, hydrological determinants, heterogeneity index, drainage network density, hypsometry, soils, vegetation, catchment area.

RESUMEN**MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA Y HETEROGENEIDAD ESPACIAL DE CUENCAS : HACIA UNA COMPARACIÓN ENTRE EL ENFOQUE GLOBAL Y EL ENFOQUE DISTRIBUIDO**

La oportunidad del uso de un enfoque distribuido frente a un enfoque global de la transformación lluvia/gasto a través de un modelo hidrológico es una cuestión a menudo resuelta de manera intuitiva y caso por caso. Este artículo presenta una tentativa para responder a este problema, para mejorar los procesos de modelización de los gastos de una cuenca, pero también para generalizar en las diferentes situaciones encontradas. Dos enfoques complementarios fueron seguidos sobre una muestra de quince tripletes de cuencas francesas aforadas, cada uno de estos tripletes están constituidos de dos subcuencas yuxtapuestas desde aguas arriba hacia aguas abajo, y de superficie equivalente, y de una pequeña subcuenca agua abajo.

El primer enfoque consistió en estudiar el interés de recortar una cuenca en subunidades para su modelización hidrológica. Para hacerlo, se demostró que un análisis estadístico no paramétrico de los resultados del criterio de Nash de validez de un modelo, era lo más pertinente para clasificar las cuencas en función del valor del test de Wilcoxon.

El segundo enfoque consistió, para una misma muestra de cuencas, con características que se supone a priori determinantes para la hidrología, a saber, la densidad de la red hidrográfica, la hipsometría, y la naturaleza de las cubiertas pedológica y vegetal.

Las diferencias observadas sobre las características de dos subcuencas yuxtapuestas fueron determinadas para obtener índices de heterogeneidad de la cuenca.

Una comparación de los resultados fue entonces realizada para determinar la posibilidad de establecer un vinculo entre la preferencia razonada de un tipo de modelización hidrológica y los grados de heterogeneidad de la cuenca. Esta comparación muestra una relación entre los valores del ensayo de Wilcoxon y ciertos determinantes hidrológicos. Así el grado de heterogeneidad de la cubierta pedológica se demostró ser más discriminante en la elección para discretar o no una cuenca. Ciertos valores del ensayo de Wilcoxon fueron relacionados al tamaño de las cuencas, lo que podría ser atribuido al hecho de que las heterogeneidades de cuencas pueden aumentar en función de la escala de observación, particularmente en lo que concierne a la cubierta pedológica.

Palabras claves

Modelización hidrológica, cuencas, determinantes hidrológicos, índice de heterogeneidad, densidad de red, hipsometría, suelos, vegetación, superficie de cuencas

Pour déterminer le débit à un exutoire d'un bassin versant, deux écoles s'opposent : celle du modèle global, qui estime que les variations spatiales des paramètres et des variables d'entrées peuvent ne pas être prise en compte et qu'il n'y a donc pas lieu d'effectuer un découpage dans l'espace (par exemple, Nash et Sutcliffe, 1970 ; Michel *et al.*, 1991 ; Makhlof, 1994), et celle du modèle distribué, estimant que l'hétérogénéité du cadre physique doit être prise en compte dans les données d'entrée.

Cependant, par construction, un modèle distribué est un assemblage de sous-modèles globaux appliqués sur des mailles plus ou moins fines, qui peuvent aller des divisions naturelles en sous-bassins à des mailles carrées élémentaires. Sur chacune de ces mailles, les variables spatiales et autres flux sont représentés par des scalaires. L'utilisation d'une valeur de paramètre hydrologique par maille semble a priori d'autant plus légitime que la maille est plus petite, car les processus y opérant sont moins divers. Cependant, on introduit un besoin de modélisation supplémentaire qui est le modèle d'agrégation des flux en sortie des mailles constitutives. Cette approche peut être fortement simplifiée en utilisant des modèles semi-distribués qui ne découpent les bassins versants qu'en grandes parcelles fictives, ces niveaux de découpage n'ayant pas un ordre hiérarchique les uns par rapport aux autres.

L'approche distribuée a suscité de nombreuses études qui ont permis de mieux appréhender les processus à l'échelle de la maille choisie. C'est ainsi que les équations hydrologiques classiques, telles l'équation de Richards pour le mouvement de l'eau dans la zone non saturée ou l'équation de Saint-Venant pour la simulation des flux dans les cours d'eau, ont été intégrées au sein de modèles distribués pluie-débit, mis au point dans les années 80. On peut ainsi citer le modèle SHE (Système Hydrologique Européen) d'Abbott *et al.* (1986), le modèle TOPMODEL de Beven et Kirkby (1979), le modèle IHDM (Institute of hydrology Distributed Model) de Beven *et al.* (1987) ou le modèle SWATCHe de Morel-Seytoux et al Hasoun (1989). Dans ce cadre, des approches spécifiques de prise en compte de l'hétérogénéité spatiale ont été proposées, comme celle des zones contributives situées à l'aval des bassins, au sein desquelles les sols sont saturés et relativement imperméables (Gascuel-Oudou *et al.*, 1996 ; Curmi *et al.*, 1997).

Cependant, la place de ces modèles distribués dans le cadre de la modélisation pluie débit a été souvent discutée de façon critique (Doodge, 1986 ; Beven, 1989, 1993, 1997 ; Nathan et Mc Mahon, 1990 ; Grayson *et al.*, 1992 ; Abbott et Refsgaard, 1996) car la complexité du maillage rend notamment les mesures nécessaires au modèle très difficiles à mettre en oeuvre. De plus, cette complexité ne garantit pas d'obtenir des résultats plus satisfaisants que ceux issus de modèles globaux pluie-débit, plus simples. Loague et Freeze

(1985), Michaud et Soroshian (1994) ou Refsgaard (1996) ont ainsi montré le peu d'avantage des modèles distribués par rapport à de simples modèles globaux. Toutefois, ces travaux se basent sur la comparaison de deux modèles, ayant chacun leurs propres performances.

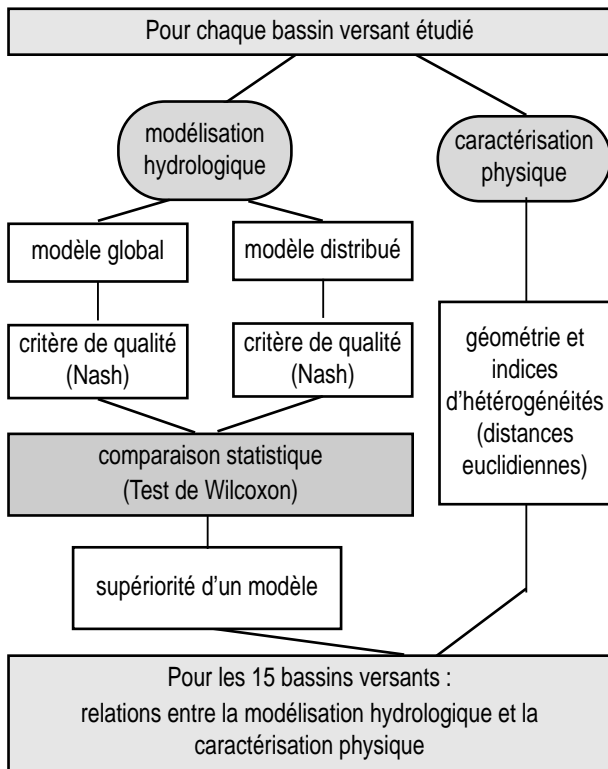
Dans le même esprit critique, la question que nous nous sommes posée est la suivante : l'approche discrétisée apporte-t-elle une amélioration par rapport à l'approche globale pour la prévision des débits à un exutoire ? Et si oui, pourquoi ? Pour nous, cette question en a aussitôt entraîné une autre : faut-il prendre en compte l'hétérogénéité physique des bassins versants, notamment celle de la répartition spatiale de leurs sols ?

Pour répondre de façon préliminaire à ces questions, deux analyses indépendantes et parallèles ont été effectuées : (i) la comparaison statistique des deux modélisations possibles que sont la modélisation globale et la modélisation semi-distribuée, en n'utilisant qu'un modèle hydrologique unique afin de n'introduire aucun biais relatif à la qualité des modèles et (ii) la recherche des caractéristiques physiques permettant la différenciation de deux sous-bassins composant un bassin global (*figure 1*). Ceci nous a permis d'apprécier, d'une part, l'apport hydrologique d'une décomposition en sous-ensembles et, d'autre part, l'intérêt d'une telle décomposition en fonction de contrastes physiques à identifier. La comparaison statistique de la modélisation pluie-débit s'est appuyée sur le test non paramétrique de Wilcoxon appliqué aux populations définies par les valeurs du critère de Nash et Sutcliffe pour le modèle global d'une part et le modèle semi-distribué d'autre part. L'hétérogénéité d'un bassin a été définie par le calcul de la distance entre les matrices des paramètres géométriques de chacun des sous-bassins. Dans l'espace de nos données, la plus grande distance témoigne de la plus grande hétérogénéité (*figure 1*).

MODELE HYDROLOGIQUE, BASSINS VERSANTS ET METHODES

Le modèle hydrologique

Le modèle hydrologique unique que nous avons utilisé au cours de cette étude est le modèle global GR4J à pas de temps journalier (Edijatno et Michel, 1989 ; Makhlof et Michel, 1992) déjà validé sur plus de 300 bassins versants (Makhlof, 1994 ; Nascimento de Oliveura, 1995). Ce modèle conceptuel pluie-débit à réservoirs, très robuste et simple à mettre en oeuvre, est évoqué avec plus de détails par ailleurs (Edijatno et Michel, 1989 ; Nascimento de Oliveira, 1995) et dans l'annexe, mais nous en faisons ci-après une analyse succincte. Cette modélisation pluie-débit ne présente que peu de paramètres en vue de l'utiliser sur des bassins versants non jaugés : la capacité maximale du réservoir sol, la capacité maximale du

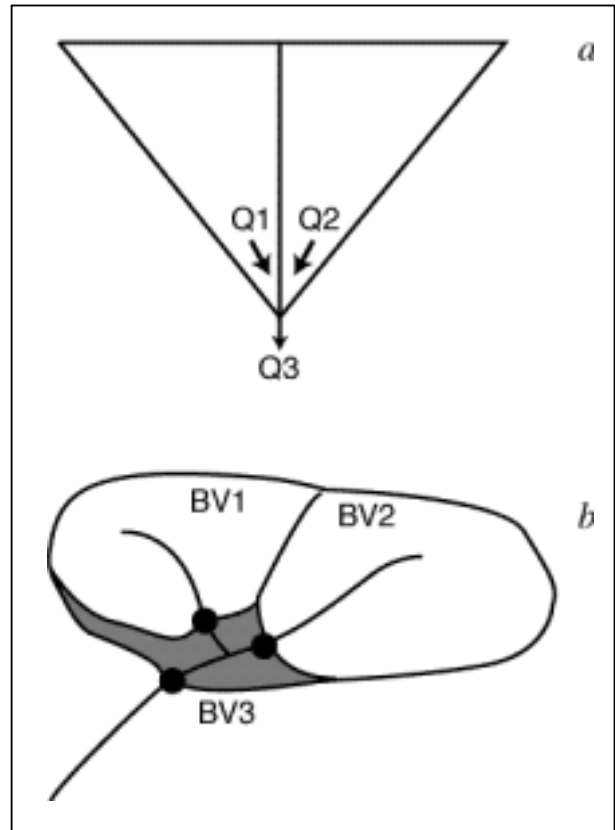
Figure 1 - Approche méthodologique utilisée.**Figure 1** - Methodological diagram.

réservoir de routage, la durée de l'hydrogramme unitaire et le paramètre d'échanges souterrains. Ses données d'entrée sont les pluies (et les débits en calage) ainsi que l'évapotranspiration. Ses données de sortie sont les débits. Enfin, le modèle GR4J s'est avéré plus performant que le modèle hydrologique de Wageningen (Heijens, 1993) et que le modèle GRHUM (Loumagne *et al.*, 1996).

Le modèle semi-distribué choisi est donc composé de la juxtaposition des deux modèles GR4J globaux relatifs à la partition d'un bassin global en deux sous-bassins comme l'indiquent les figures 2a et 2b. Dans un souci de comparaison rigoureuse, la situation idéale est un découpage d'amont en aval d'un bassin versant en deux entités égales, dont la somme des superficies correspond exactement à la superficie du bassin initial (figure 2a), mais trouver deux stations de jaugeage à proximité immédiate d'une confluence, avec une assez longue série de données communes est pratiquement impossible. Aussi, le cas le plus fréquent réunit trois stations de jaugeage peu éloignées d'une confluence, ce qui introduit une donnée supplémentaire : le bassin intermédiaire, grisé sur la figure 2b, et dont il faut tenir compte dans la modélisation semi-distribuée.

Figure 2 - Découpage des bassins versants : cas théorique idéal (a) et cas réel (b). BV1 et BV2 représentent les deux bassins versants juxtaposés d'amont en aval et BV3 le bassin intermédiaire aval. Chacun des trois cercles pleins représente une station de jaugeage.

Figure 2 - Catchment sub-units ; theoretical case (a) and real case (b). BV1 and BV2 correspond to the two juxtaposed catchments whereas BV3 is the intermediate catchment. Each of the filled circle symbols represent a gauged station.



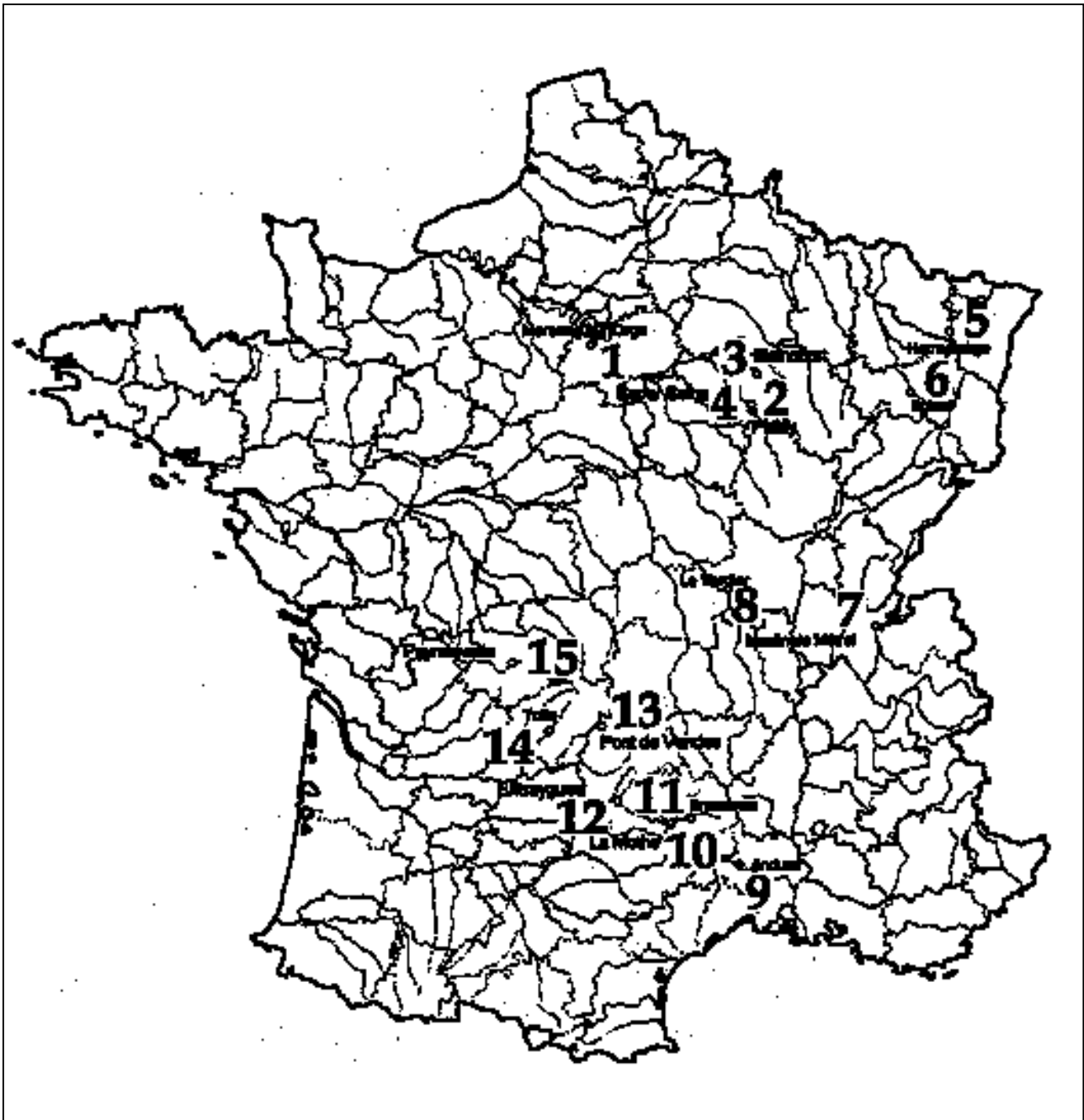
Les bassins versants

En pratique, il y a très peu de situations présentant trois stations de jaugeage à proximité d'une confluence (figure 2b). Aussi, après une recherche minutieuse, région par région, cours d'eau par cours d'eau, nous en avons recensé quinze (figure 3 et tableau 1) pour lesquelles la superficie du bassin intermédiaire aval ne représentait que 0 à 20 % de la superficie totale de bassin (hormis le bassin Aube 2 pour lequel le bassin intermédiaire représente 30 % de la superficie de bassin).

Les cadres géographiques de cette étude sont donc quinze bassins versants français (figure 3), de superficies très variées, de 192 à 5 460 km², mais suivis sur de longues périodes de temps (tableau 1), pas toujours identiques, ce qui

Figure 3 - Situation géographique des bassins versants étudiés. Les numéros de bassins permettent de se reporter au *tableau 1* (noms et caractéristiques des bassins).

Figure 3 - Localization of the studied catchments. The catchment numbers allow the reader to have informations on the studied catchments reported on *table 1*.



introduit un biais méthodologique. Néanmoins, les postes météorologiques ont été choisis de manière à couvrir l'ensemble des bassins versants, leur nombre étant proportionnel à la superficie du bassin versant, pour chaque sous-bassin et

bassin intermédiaire. De plus, nous avons estimé (i) que ces analyses de pluie et de débit se recoupaient suffisamment dans le temps pour être comparées et (ii) que la durée des périodes de mesures, de 10 à 20 ans, était suffisamment

Tableau 1 - Principales caractéristiques des bassins versants et périodes de suivi hydrologique. Les numéros de bassins sont ceux reportés sur la figure 3.

Table 1 - Main catchment characteristics and periods of hydrological study. Catchment numbers are those which are plotted on figure 3 (catchment location in France).

Fichier	Numéro de bassin (figure 3)	Cours d'eau	Altitude moyenne (m)	Superficie de bassin (km ²)	Densité de réseau (km ⁻¹)	Période d'étude
ESSONNE	1	Orge (Yvette et Orge)	115	922 (224 et 632)	0,25 (0,25 et 0,25)	1982-1994
AUBE	2	Seine (Seine et Laigne)	338	1450 (704 et 614)	0,15 (0,20 et 0,08)	1968-1983
AUBE 2	3	Aube (Aujon et Aube)	344	1640 (481 et 657)	0,20 (0,20 et 0,24)	1972-1984
COTE D'OR	4	Seine (Seine et Ource)	332	2340 (1450 et 730)	0,15 (0,13 et 0,19)	1969-1992
MOSELLE	5	Sarre (Sarre Blanche et Sarre Rouge)	226	192 (64,2 et 90,4)	0,52 (0,70 et 0,44)	1968-1994
VOSGES	6	Moselle (Moselle et Vologne)	528	1219 (621 et 369)	0,46 (0,42 et 0,54)	1970-1980
AIN	7	Valserine (Valserine et Semine)	1092	395 (119 et 183)	0,27 (0,25 et 0,22)	1961-1983
SAONE	8	Arroux (Arroux et Boubince)	426	3166 (2277 et 819)	0,34 (0,36 et 0,29)	1967-1994
GARD	9	Gardon d'Anduze (Gardon St Jean et Gardon de Mialet)	536	546 (263 et 239)	0,60 (0,59 et 0,59)	1970-1979
LOZERE	10	Lot (Lot et Bramont)	1372	465 (250 et 116)	0,74 (0,82 et 0,83)	1974-1991
LOZERE 2	11	Lot (Lot et Colagne)	1410	1164 (465 et 456)	0,67 (0,74 et 0,64)	1971-1994
AVEYRON	12	Lot (Lot et Truyère)	1102	5460 (2180 et 3280)	0,61 (0,67 et 0,58)	1979-1991
CANTAL	13	Sumène (Sumène et Mars)	721	401 (284 et 117)	0,53 (0,57 et 0,43)	1961-1969
CORREZE	14	Corrèze (Corrèze et Vimbelle)	722	356 (147 et 167)	0,71 (0,61 et 0,76)	1961-1981
VIENNE	15	Vienne (Vienne et Taurion)	586	2296 (1030 et 1156)	0,19 (0,19 et 0,19)	1980-1995

plongue pour que ces mesures soient représentatives et permettent des calages et des validations de modèles.

Par ailleurs, la densité de réseau hydrographique de ces bassins, qui est le rapport entre la longueur cumulée des canaux d'écoulement et la surface du bassin (*tableau 1*), augmente de façon non-linéaire avec l'altitude, hormis pour les deux bassins Ain et Vienne.

Méthodes de comparaison

Modélisation hydrologique

Il existe dans la littérature de nombreux critères indépendants du jugement de l'observateur, le plus classique étant celui des moindres carrés (Martinec et Rango, 1989). Il est parfois commode de rendre cette quantité adimensionnelle, ce qui facilite les comparaisons. C'est ce qui est fait avec le critère de

Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) qui permet de comparer les débits observés, Q_o , aux débits calculés à l'aide d'un modèle, Q_c , selon l'équation :

$$NASH = 100 \times \left[1 - \frac{\sum (Q_o - Q_c)^2}{\sum (Q_o - Q_m)^2} \right] \quad (1)$$

où Q_m est la moyenne des débits observés Q_o . Le modèle est parfaitement validé lorsque le critère de Nash est égal à 100 %.

Nous avons comparé, pendant les périodes de validation du modèle GR4J, les distributions statistiques des critères de Nash pour chaque option de modélisation, globale et semi-distribuée, et pour chaque bassin versant étudié. En outre, dans la mesure du possible, les périodes d'étude ont été découpées en intervalles de quatre ans, et ceci pour trois raisons :

- le faible nombre d'individus en notre possession nous incite à augmenter notre échantillon de valeurs ;
- en découpant les périodes d'étude, on cale systématiquement le modèle sur une période et on le valide sur les autres périodes, ce qui permet d'intégrer le caractère aléatoire des précipitations. Ainsi, sur une période d'étude de 20 ans, découpée en 5 intervalles, A, B, C, D, E, on obtient, in fine, 20 critères de qualité, correspondant aux périodes de calage-contrôle AB, AC, ..., puis EC, ED.... pour lesquelles la période A puis la période E correspond à la période de calage du modèle ;
- ce découpage temporel, bien que très grossier, permet de prendre en compte la dynamique du fonctionnement hydrologique des bassins décrite par le coefficient de variation (pourcentage du rapport écart-type/moyenne) des valeurs du critère de Nash.

Hétérogénéité des bassins

L'écoulement à l'exutoire d'un bassin versant est déterminé par (i) les conditions climatiques de la région, (ii) les caractéristiques physiques du bassin et (iii) l'aménagement et l'occupation du territoire.

Cependant, deux bassins voisins, de superficie quasi-identique, soumis aux mêmes conditions climatiques, comme c'est le cas dans cette étude, peuvent avoir un régime d'écoulement totalement différent. Ceci peut alors être attribuable à leurs caractéristiques physiques hétérogènes. Par exemple, des différences de couverture végétale entre bassins versants juxtaposés induisent des flux d'évapotranspiration différents au sein de ces deux bassins et donc des régimes hydrologiques hétérogènes.

Nous avons donc recherché à quantifier, pour chacun des bassins versants étudiés, les différences et les similitudes de leurs sous-bassins juxtaposés en utilisant les caractéristiques physiques suivantes :

- la densité de leur réseau hydrographique, ou densité de drainage, qui se définit comme le rapport entre la longueur cumulée des canaux d'écoulement et la superficie du bassin (tableau 1) ;

- leur hypsométrie, que nous avons caractérisé à l'aide de la distribution spatiale de 5 grandes classes d'altitude (0-100 m, 100-200 m, 200-500 m, 500-1 000 m et 1 000-2 000 m). L'hypsométrie est une caractéristique fortement reliée à la distribution de la pluie, variable d'entrée du modèle ;

- leur couverture végétale, que nous avons quantifiée à l'aide du premier niveau hiérarchique de la base de données CORINE LAND COVER (5 unités de couvert végétal : territoires artificialisés, territoires agricoles, forêts et milieux semi-naturels, zones humides et surfaces en eau) et du Système d'Information Géographique ArcInfo pour caler et digitaliser les bassins. La répartition spatiale des forêts et des cultures a notamment une nette incidence sur le fonctionnement hydrologique du système, le recyclage de l'eau par la forêt étant beaucoup plus important que celui effectuée par la végétation des territoires agricoles (Granier *et al.*, 1995 ; Tessier *et al.*, 1996) ;

- leur couverture pédologique, avec un nombre d'unités pédologiques variant de 2 à 9, selon les bassins étudiés, comme nous allons le voir ci-après.

Nous avons ensuite caractérisé pour chacun des bassins versants étudiés, les similitudes et les hétérogénéités, par rapport à ces 5 paramètres, de leurs deux sous-bassins juxtaposés, en utilisant la distance euclidienne introduite en Hydrologie par de Coursey (1973) :

$$d_{j,k} = \left[\sum_{i=1}^p (x_{i,j} - x_{i,k})^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

où $d_{j,k}$ représente la distance entre les stations j et k , $x_{i,j}$ est la $i^{\text{ème}}$ caractéristique de la station j et p est le nombre total de caractéristiques. Les plus grandes similitudes sont ainsi liées aux plus petites distances.

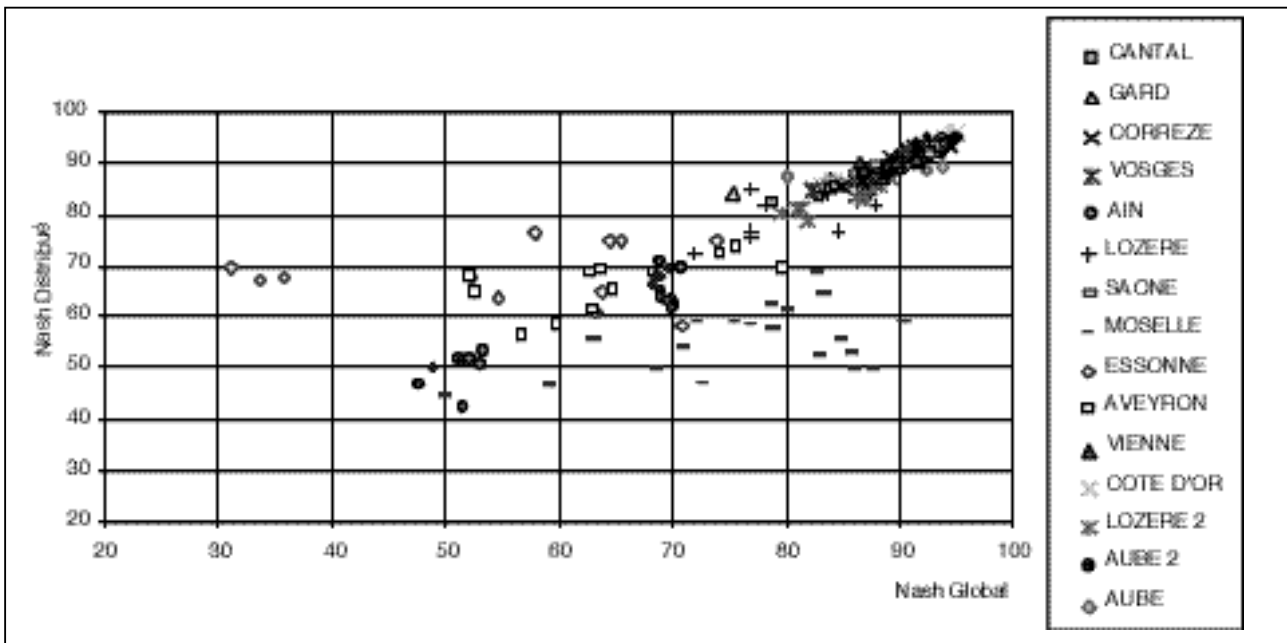
RESULTATS ET DISCUSSION

Résultats de la modélisation

La figure 4 met en relation les valeurs du critère de Nash obtenues, sur le même jeu de données, pour l'approche semi-distribuée (ordonnée) et pour l'approche globale (abscisse). On remarque que les points sont agglomérés autour de la première bissectrice, sauf dans deux cas, celui de la Moselle pour lequel l'approche globale est la plus performante, et celui de l'Essonne pour lequel l'approche semi-distribuée est la meilleure.

Figure 4 - Comparaison des valeurs du critère de Nash obtenues (plus de 20 valeurs pour chaque bassin par découpage de la période d'étude) pour l'approche semi-distribuée (ordonnée) et pour l'approche globale (abscisse).

Figure 4 - Relationship between the Nash criterion values (more than 20 values for each basin according to the split-sample test) obtained for the semi-distributed approach (ordinate) and those obtained for the lumped approach (abscissa).



De façon complémentaire, nous avons mis en relation le coefficient de variation du critère de Nash appliqué au modèle global (abscisse) à celui appliqué au modèle semi-distribué (ordonnée) (figure 5). Près de la moitié des points est située sur la première bissectrice alors que l'autre moitié des points est située sous cette bissectrice, ce qui révèle que la partition d'un bassin versant entraîne une plus grande stabilité des résultats dans la modélisation temporelle pluie-débit.

La comparaison statistique de l'efficacité de chacune des deux approches, globale ou semi-distribuée sur la modélisation hydrologique (critère de Nash) a été effectuée à l'aide du test non paramétrique de Wilcoxon (Wilcoxon, 1945; Gibbons, 1971; Dodge, 1993). Nous avons ainsi établi un classement entre les résultats de l'approche globale et ceux de l'approche semi-distribuée en utilisant la variable t1 du test statistique de Wilcoxon. Si la valeur de t1 est négative l'approche semi-distribuée est mieux adaptée à la prévision hydrologique que l'approche globale; si la valeur de t1 est positive, c'est l'inverse.

Pour une probabilité de 79 %, correspondant à un seuil de signification de 21 %, nous avons ainsi pu distinguer trois groupes de bassins versants (tableau 2) :

- ceux pour lesquels une approche semi-distribuée est significativement meilleure qu'une approche globale (Saône, Gard, Vienne, Aveyron et Vosges),

- à l'opposé, ceux pour lesquels une approche globale est significativement mieux adaptée qu'une approche semi-distribuée (Lozère 2, Lozère, Ain, Aube 2 et Moselle)

- et enfin les bassins intermédiaires pour lesquels il n'y a pas de différence significative entre les deux approches (Essonne, Cantal, Côte d'Or, Aube et Corrèze).

Les valeurs des variables t1 du test de Wilcoxon ainsi que cette classification en trois groupes de bassins ont donc été retenues pour relier le type d'approche hydrologique recommandée aux indices d'hétérogénéités des bassins.

Caractérisation des degrés d'hétérogénéités des bassins versants

Tout comme pour la végétation, l'identification de chacune de ces unités pédologiques a été très globale et simplificatrice, associant souvent deux types de sols dont la répartition spatiale n'a pas pu être différenciée à l'échelle kilométrique qui est la nôtre. L'identification et la répartition spatiale de ces ensembles de sols ont souvent été effectuées à l'aide de cartes pédologiques existantes ou, dans quelques cas, extrapolées à l'aide de cartes géologiques, comme cela a été le cas des bassins versants de l'Ain, du Gard et de la Saône. Cette analyse pédologique sommaire mériterait d'être affinée et précisée dans le cadre de recherches ultérieures. Néanmoins, dans le cadre de cette étude préliminaire, le

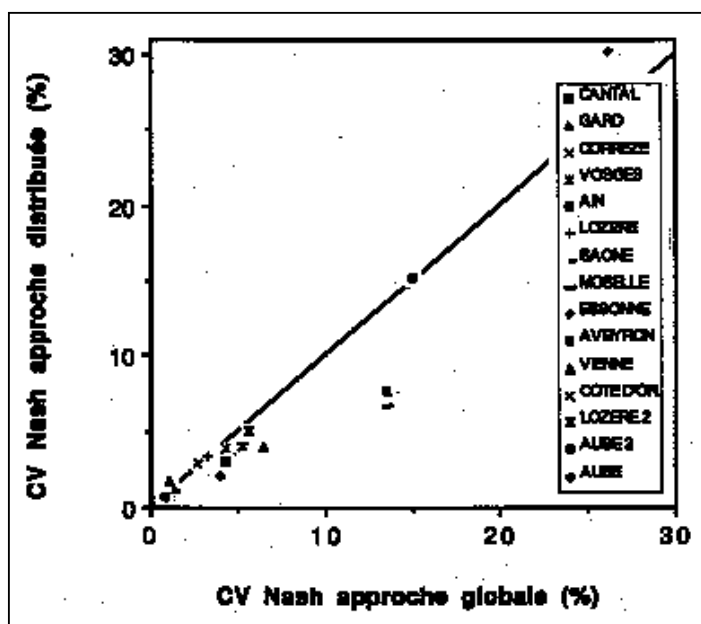
Bassins	Cours d'eau	T1 de Wilcoxon	Seuil de signification (%)
SAONE	Arroux	-1,408	10
GARD	Gardon d'Anduze	-1,282	10
VIENNE	Vienne	-0,948	20
AVEYRON	Lot	-0,837	21
VOSGES	Moselle	-0,802	21
ESSONNE	Orge	-0,693	
CANTAL	Sumène	-0,480	
COTE D'OR	Seine	-0,081	
AUBE	Seine	0,054	
CORREZE	Corrèze	0,059	
LOZERE 2	Lot	1,177	20
LOZERE	Lot	1,209	20
AIN	Valserine	2,381	5
AUBE 2	Aube	2,543	5
MOSELLE	Sarre	5,275	5

Tableau 2 - Classement des bassins versants en fonction de la valeur t1 du test statistique de Wilcoxon appliqué à la comparaison des deux séries de critère de Nash (approches globale et semi-distribuée).

Table 2 - Catchment classification as a function of the Wilcoxon t1 value carried out from the two Nash criteria series (lumped and semi-distributed approaches).

Figure 5 - Comparaison des coefficients de variation du critère de Nash obtenus pour l'approche semi-distribuée (ordonnée) et pour l'approche globale (abscisse).

Figure 5 - Relationship between the Nash criterion variation coefficients obtained for the semi-distributed approach (ordinate) and those obtained for the lumped approach (abscissa).



nombre d'unités pédologique que nous avons ainsi pu identifier tend à augmenter avec la superficie du bassin versant considéré. Le classement croissant des bassins étudiés selon leur nombre d'unités pédologiques (UP) est ainsi le suivant :

- 2 UP pour les bassins de l'Essonne (sols bruns lessivés, majoritaires, et sols bruns), de la Moselle (sols podzoliques, majoritaires, et sols bruns eutrophes) ou de l'Ain (sols humiques carbonatés et rendzines, rendzines brunifiées et sols bruns calcaires et calciques)

- 3 UP pour les bassins de l'Aube, de l'Aube 2, de la Côte d'Or (rendzines et sols bruns calcaires, sols bruns calciques, sols bruns) ou du Gard (sols bruns calcaires et calciques, sols bruns acides, sols bruns),

- 4 UP pour les bassins du Cantal (sols bruns andiques, sols bruns lessivés, sols ocres podzoliques et bruns acides, rankers), de la Saône (sols bruns eutrophes, sols bruns lessivés, sols bruns acides et lithosols, sols podzoliques), de la Corrèze ou de la Vienne (sols ocres podzoliques et bruns acides, sols bruns acides, sols bruns lessivés, sols bruns lessivés et bruns acides),

- 6 UP pour les bassins des Vosges (sols alluviaux, sols bruns acides, sols bruns acides et bruns ocreux, sols bruns ocreux et ocres podzoliques, sols ocres podzoliques humifères, sols podzoliques : *tableau 3*), de la Lozère ou de la Lozère 2 (rankers, sols ocre podzoliques et bruns acides, sols de tourbière, sols bruns calcaires et rendzines rouges, sols bruns lessivés, rendzines rouges et lithosols),

- et enfin 9 UP pour le plus grand bassin de l'Aveyron (rankers, sols ocre podzoliques et bruns acides, sols de tourbière, sols bruns calcaires et rendzines rouges, sols bruns lessivés, rendzines rouges et lithosols) qui englobe les deux bassins précédents de la Lozère et de la Lozère 2.

Les caractéristiques des sols qui ont des incidences sur l'hydrologie du système sont notamment leurs capacités de stockage d'eau et de drainage, toutes deux fortement dépendantes de leurs taux d'argile, c'est à dire, de façon plus physique, de leurs surfaces spécifiques, et de façon inverse de leurs porosités (Richter, 1987 ; Petersen *et al.*, 1996 ; Bruand *et al.*, 1996). C'est ainsi qu'un sol podzolique sableux retient très peu l'eau et est, au contraire, très drainant. Il s'oppose en cela à un sol brun calcaire, riche en argiles et à forte capacité de stockage d'eau.

La répartition spatiale, dans chacun des 30 sous-bassins étudiés, des différentes classes topographiques, pédologiques ou végétales a été alors normée par rapport à la surface de sous-bassin considéré. C'est ainsi qu'hormis la densité de drainage, la mesure, dans chacun de ces sous-bassins, de la répartition spatiale d'une de ces classes a été effectuée en pourcentage de superficie de sous-bassin. Un exemple de calcul de cet indicateur d'hétérogénéité de la couverture pédologique pour le bassin versant des Vosges est reporté sur le *tableau 3*. Le *tableau 4* montre les valeurs des distances euclidiennes pour les principales caractéristiques physiques des bassins prises en compte dans notre étude.

Relations entre modélisation hydrologique et caractéristiques des bassins versants (échelle et degré d'hétérogénéité)

Les valeurs t_1 du test non paramétrique de Wilcoxon ainsi que les valeurs des distances caractérisant les hétérogénéités de la couverture pédologique (d sols), de la couverture végétale (d végétation), du réseau de drainage (d réseau hydrographique) et de l'hypsométrie (d topographie) (*tableau 4*) ont tout d'abord été reliées aux superficies de bassin (S).

Ces différents paramètres n'obéissent apparemment pas à des lois d'échelle. Cela est particulièrement le cas pour les degrés d'hétérogénéité de la couverture végétale, du réseau hydrographique et de la topographie, dont les variabilités sont par ailleurs relativement réduites (résultats non montrés). Néanmoins, bien que la dispersion des points soit très grande, une tendance à une diminution de la valeur t_1 du test de Wilcoxon en fonction de la superficie de bassin a été identifiée (*figures 6a et 7*), l'approche semi-distribuée étant plutôt recommandée, de façon d'ailleurs significative (*figure 7*), pour les bassins les plus grands. Dans le cas des bassins emboîtés de Lozère, de Lozère 2 et de l'Aveyron pour lesquels le changement d'échelle est important, cette tendance à la diminution de la valeur t_1 du test de Wilcoxon en fonction de la superficie de bassin est nettement confirmée (flèche de la *figure 6a*).

Ceci serait attribuable au fait, déjà évoqué, que le nombre d'unités du milieu, qu'elles soient géologiques, pédologiques, topographiques ou végétales, aurait tendance à augmenter

Tableau 3 - Distribution spatiale, en pourcentage de superficie de bassin, des unités pédologiques des bassins versants juxtaposés de la Moselle et de la Vologne, et mode de calcul conduisant, par addition des termes $(x_{i,j} - x_{i,k})^2$ à d^2 sol, puis à l'indice d'hétérogénéité, d sols, de la couverture pédologique du bassin versant Moselle plus Vologne.

Table 3 - Spatial distribution of the pedological units, normalized to the catchment area, of the neighbour Moselle and Vologne catchments. Addition of the $(x_{i,j} - x_{i,k})^2$ values written on the right-hand side of the table leads to the d^2 soil value, and then to the heterogeneity index, d soil, for soil unit areas occurring within the whole Moselle and Vologne catchment.

Unité pédologique	Noir Gueux (Moselle)	Jarménil (Vologne)	$(x_{i,j} - x_{i,k})^2$
sols alluviaux	4,4 %	0,2 %	$(0,044 - 0,002)^2$
sols bruns acides	0 %	32,9 %	$(0 - 0,329)^2$
sols bruns acides et bruns ocreux	56,5 %	37,2 %	$(0,565 - 0,372)^2$
sols bruns ocreux et ocres podzoliques	36,2 %	29 %	$(0,362 - 0,29)^2$
sols ocres podzoliques humifères	1,6 %	0 %	$(0,016 - 0)^2$
sols podzoliques	1,3 %	0,7 %	

Fichier	Numéro de bassin (figure 3)	d sols	d végétation	d réseau hydrographique	d topographie
ESSONNE	1	0,147	0,197	0	0,028
AUBE	2	0,146	0,128	0,12	0,028
AUBE 2	3	0,152	0,084	0,04	0,024
COTE D'OR	4	0,219	0,125	0,06	0,028
MOSELLE	5	0,028	0,201	0,26	0,028
VOSGES	6	0,391	0,178	0,12	0,143
AIN	7	0,17	0,19	0,03	0,101
SAONE	8	0,385	0,206	0,07	0,255
GARD	9	0,468	0,007	0	0,235
LOZERE	10	0,232	0,157	0,01	0,353
LOZERE 2	11	0,225	0,229	0,1	0,255
AVEYRON	12	0,379	0,296	0,09	0,035
CANTAL	13	0,31	0,211	0,14	0,126
CORREZE	14	0,489	0,236	0,115	0,58
VIENNE	15	0,539	0,029	0	0,099

Tableau 4 - Principales distances euclidiennes caractérisant les degrés d'hétérogénéités physiques des sous-bassins juxtaposés étudiés, degrés d'autant plus élevés que les valeurs de ces distances sont grandes. Les numéros de bassins sont ceux reportés sur la figure 3.

Table 4 - Main euclidean distances for characterizing physical heterogeneities between juxtaposed basins. High distance values correspond to significant heterogenous basins, for the considered parameter

Figure 6 - Valeurs t1 du test de Wilcoxon appliquées à la comparaison des deux séries du critère de Nash (approche semi-distribuée et approche globale) (t1 Wilcoxon) (a) et degrés d'hétérogénéité de la couverture pédologique (d sols) (b) en fonction de la superficie du bassin.

Global = bassins versants pour lesquels l'approche globale est la meilleure ; semi-distribué = bassins versants pour lesquels l'approche semi-distribuée est la plus performante ; indifférencié = bassins versants pour lesquels il n'y a aucune différence significative entre les deux approches (voir tableau 2).

Figure 6- Wilcoxon t1 values carried out from the comparison between the two Nash criterion series (semi-distributed approach and lumped approach) (t1 Wilcoxon) (a) and heterogeneity degrees for soils (d sol) (b) as a function of catchment area.

Global = catchments where the lumped approach was the best ; semi-distribué = catchments where the semi-distributed approach the most appropriate ; indifférencié = catchments where no difference between the two approaches was observed (see table 2).

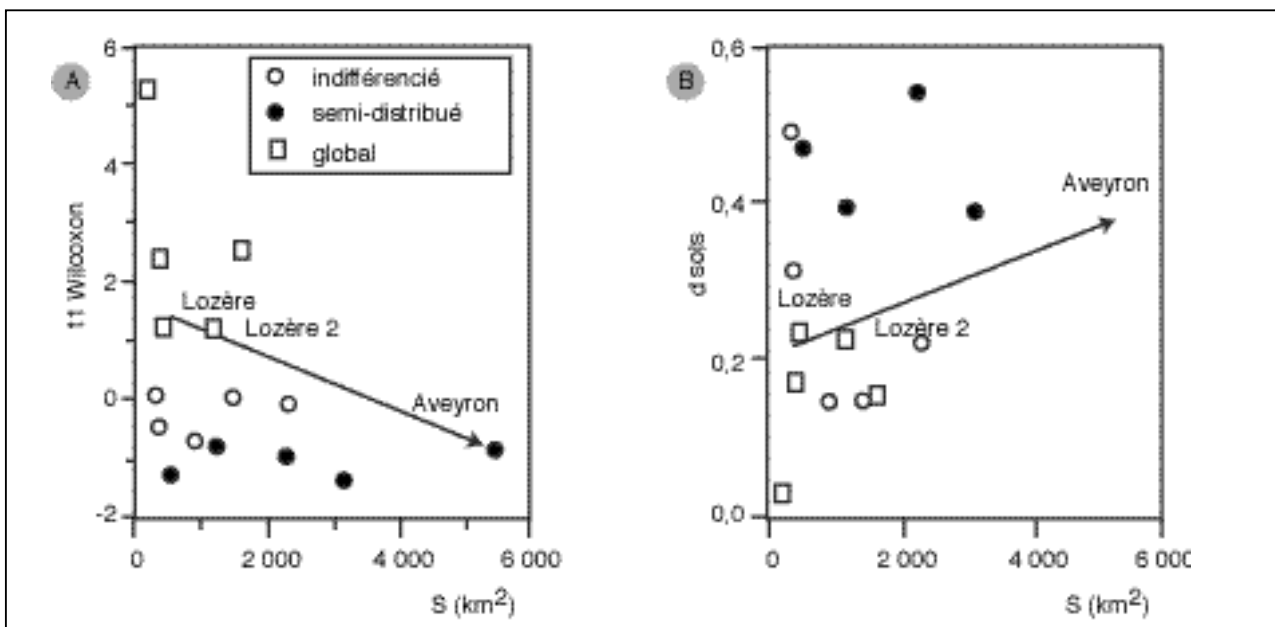
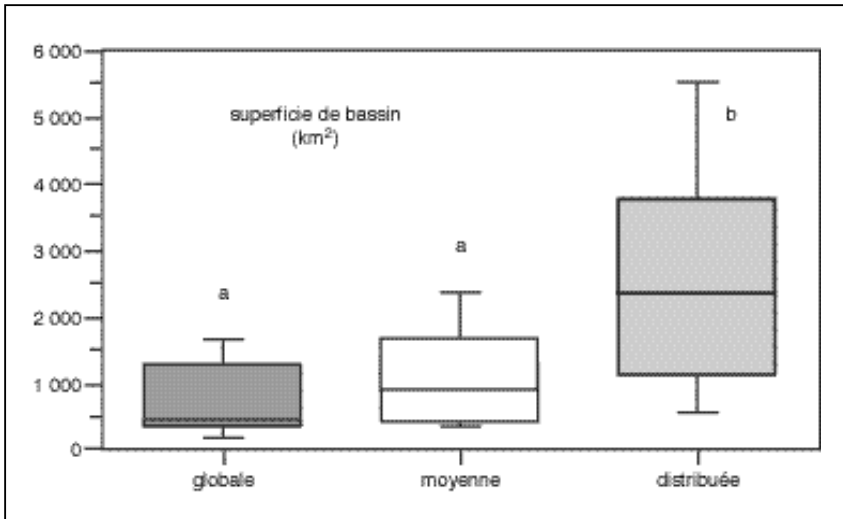


Figure 7 - Boîtes de distribution des superficies de bassin pour les trois types de bassins versants : ceux pour lesquels l'approche globale est la meilleure (global), ceux pour lesquels il n'y a pas de différence significative entre les deux approches (moyenne) et ceux pour lesquels l'approche semi-distribuée est la meilleure (distribuée). Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre populations, à $p < 0,05$ (moindres carrés de Fisher et test F de Scheffe).

Figure 7- Notched box plots for catchment area of the three catchments types : those where the lumped approach was the most appropriate (global), those with no difference between the two approaches (moyenne) and those where the semi-distributed approach was the most appropriate (distribuée). Values with different letters are significantly different at $p < 0.05$ in both the Fisher PLSD and the Scheffe T-test).



avec la taille d'un bassin, rendant plus complexe son analyse. C'est ainsi que le nombre d'unités pédologiques passe de six pour les bassins de la Lozère et de la Lozère 2 (1 372 et 1 410 km², respectivement) à neuf pour le très grand bassin de l'Aveyron (5 460 km²) qui les englobe de façon emboîtée. Trois nouvelles unités pédologiques (sols bruns lessivés et bruns acides, sols bruns eutrophes, sols bruns acides) viennent ainsi s'ajouter aux six unités pédologiques déjà recensées dans les bassins de la Lozère et de la Lozère 2 (rankers, sols ocre podzoliques et bruns acides, sols de tourbière, sols bruns calcaires et rendzines rouges, sols bruns lessivés, rendzines rouges et lithosols). Corrélativement, le degré d'hétérogénéité de la couverture pédologique (d sols) augmente des bassins de Lozère et de Lozère 2 à celui de l'Aveyron (flèche de la *figure 6b*).

Dans un deuxième temps, nous avons relié les valeurs t1 du test de Wilcoxon aux degrés d'hétérogénéités des bassins versants.

Aucune relation n'existe entre la valeur t1 du test de Wilcoxon et le degré d'hétérogénéité de la couverture végétale ou celui du réseau hydrographique (*figures 8b et 8c*).

A l'opposé, l'analyse des facteurs limitants révèle que, pour six bassins versants, dont les cinq pour lesquels l'approche globale est recommandée, la valeur t1 du test de Wilcoxon diminue avec le degré d'hétérogénéité de la topographie (*figure 8d*). Ce résultat serait attribuable au fait que la donnée d'entrée du modèle GR4J, la pluie, est fortement liée à l'hypsométrie : plus la variabilité spatiale de la topographie au sein d'un bassin versant est élevée, plus la pluie est variable au sein de ce bassin, rendant la modélisation globale moins performante pour la simulation des débits à l'exutoire. Plus encore, la

figure 8a permet d'établir qu'il existe une relation négative entre la valeur t1 du test de Wilcoxon et le degré d'hétérogénéité de la couverture pédologique, caractérisée par la valeur d sols (*figure 8a*). Cette relation est homogénéisante puisqu'elle intègre la tendance à ce que l'échelle d'observation ait un effet sur la modélisation hydrologique, sans toutefois passer par une loi d'échelle explicite. Cette relation est aussi relativement spécifique puisque les points de la *figure 8a* sont peu dispersés, à l'opposé des points des *figures 6a et 6b*.

L'hétérogénéité de la couverture pédologique, qui peut aussi être élevée dans le cas de petits bassins versants tels ceux du Gard et des Vosges, constitue donc une caractéristique physique de bassin incontournable en matière de modélisation hydrologique régionale. En effet, dans notre étude, tout à fait préliminaire, ce degré d'hétérogénéité de la couverture pédologique nous est apparu être le déterminant hydrologique le plus discriminant, l'approche semi-distribuée étant nettement recommandée pour les bassins versants, quelles que soient leurs tailles, dont la valeur de d sols dépasse le seuil de 0,3 (*figures 8a et 9*).

CONCLUSION

La démarche que nous avons suivie a consisté à trouver un lien entre les principales caractéristiques physiques des bassins versants et l'intérêt de les décomposer en deux sous-unités de superficie équivalente afin de modéliser les relations pluie-débit non plus de façon globale mais semi-distribuée (*figure 1*). Les principaux résultats de ce travail préliminaire sont les suivants :

1. Le fait de découper chaque bassin versant en deux sous-bassins juxtaposés de superficie équivalente n'a permis une meilleure prévision hydrologique que dans le cas du tiers

Figure 8 - Relations entre les valeurs t1 du test de Wilcoxon appliqué à la comparaison des deux séries du critère de Nash (approche semi-distribuée et approche globale) (t1 Wilcoxon) et les degrés d'hétérogénéité de la couverture pédologique (d sols) (a), de la couverture végétale (d végétation) (b), de la densité du réseau hydrographique (d réseau) (c) et de l'hypsométrie (d topographie) (d) (voir tableau 4).

Global = approche globale, la meilleure ; semi-distribué = approche semi-distribuée, la plus performante ; indifférencié = pas de différence significative entre les deux approches (voir tableau 2).

Figure 8 - Relationships between the Wilcoxon t1 values carried out from the comparison between the two Nash criterion series (semi-distributed approach and lumped approach) (a), heterogeneity degrees of soils (d sol) (b), vegetation (d vegetation) (c), drainage network density (d réseau) (d) and hypsometry (d topographie) (e) as a function of catchment area (see table 4).

Best approaches for the catchments : global = lumped approach ; semi-distribué = semi-distributed approach ; indifférencié = no difference between the two approaches (see table 2).

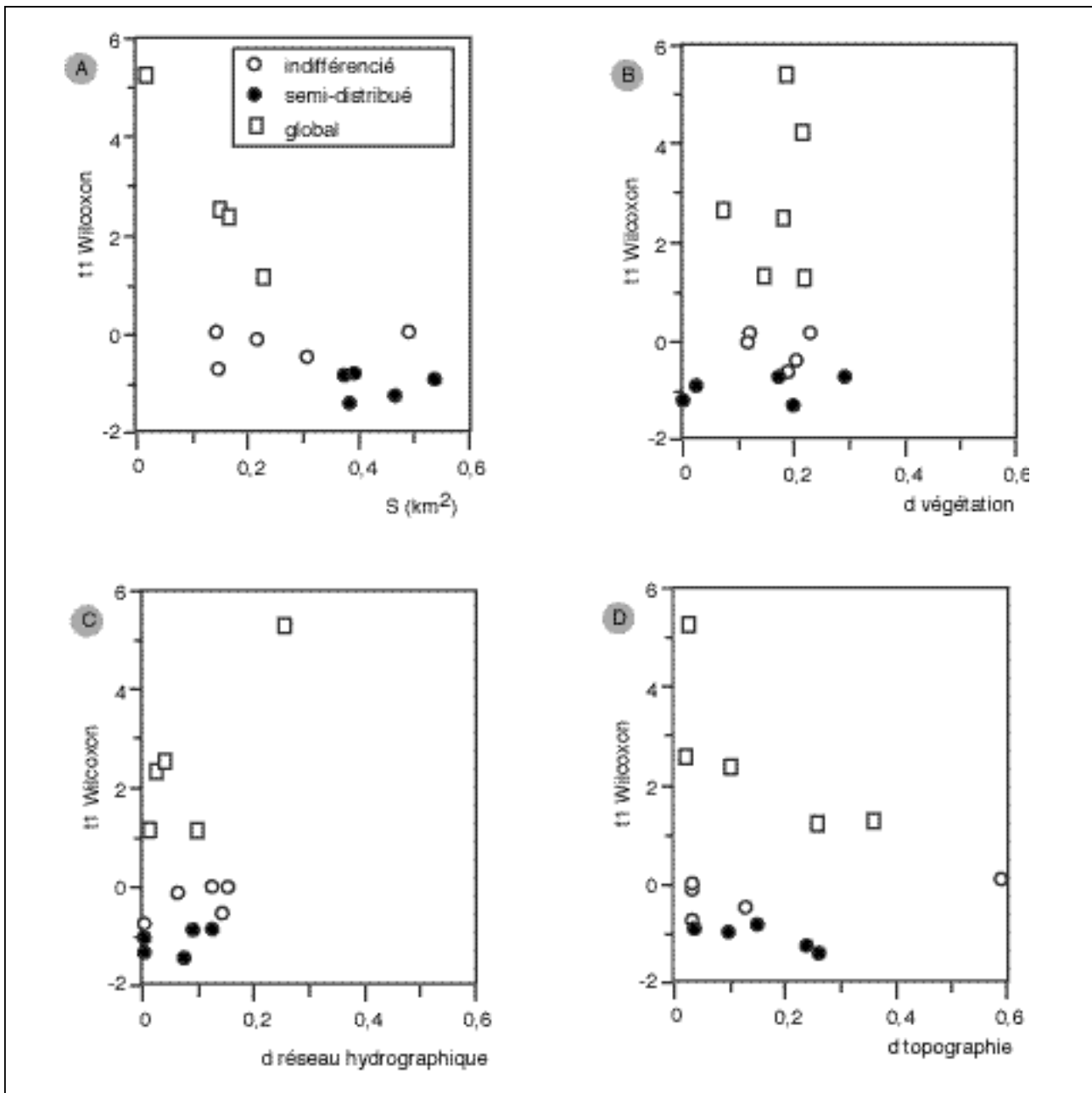
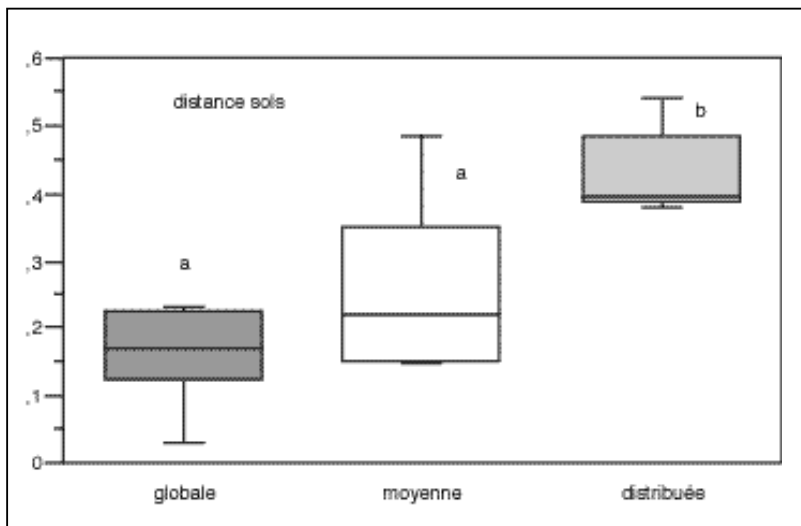


Figure 9 - Boîtes de distribution des degrés d'hétérogénéité de la couverture pédologique (distance sols) pour les trois types de bassins versants : selon l'approche, la meilleure : globale (global), semi-distribuée (distribué), ou intermédiaire (moyenne). Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre populations, à $p < 0,05$ (moindres carrés de Fisher et test F de Scheffe).

Figure 9 - Notched box plots for soil heterogeneity degree values (distance sols) of the three catchments types : those where the lumped approach was more appropriate than the semi-distributed one (global), those with no difference between the two approaches (moyenne) and those where the semi-distributed approach was more appropriate than the lumped one (distribué). Values with different letters are significantly different at $p < 0.05$ in both the Fisher PLSD and the Sheffe T-test).



des quinze bassins étudiés, la modélisation globale étant plus performante que la modélisation semi-distribuée dans le cas d'un autre tiers des quinze bassins. Une absence de confrontation des modélisations hydrologiques avec des caractéristiques physiques de bassins aurait conduit à attribuer, pour ces bassins, la meilleure performance de l'approche semi-distribuée au fait de dédoubler le nombre de paramètres du modèle global GR4J.

2. Bien que les relations pouvant exister entre modélisation et déterminants hydrologiques se soient révélées complexes, nous avons pu au contraire montrer que les bassins versants pour lesquels l'approche semi-distribuée permettait une meilleure prévision hydrologique que celle obtenue à l'aide d'une approche globale se différenciaient des autres bassins étudiés par leurs plus grandes dimensions (superficie de bassin supérieure à 1 000 km²) et des degrés d'hétérogénéité de leurs couvertures pédologiques plus élevés (d sols supérieur à 0,3).

Cette étude préliminaire, relativement globale, mériterait donc d'être développée et approfondie, en choisissant d'étudier un système de bassins versants emboîtés et à couvertures pédologiques hétérogènes.

BIBLIOGRAPHIE

- Abbott M. B., Bathurst J. C., Cunge J. A., O'Connell P. E., Rasmussen J., 1986 - An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen "SHE". Journal of Hydrology, 87, 45-77.
- Abbott M. B., Refsgaard J. C., 1996 - Distributed Hydrological Modelling. Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers.
- Beven K., 1989 - Changing ideas in hydrology - the case of physically based models. Journal of Hydrology 105, 157-172.
- Beven K., 1993 - Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. Advances in Water Resources 16, 41-51.
- Beven K., 1997 - TOPMODEL : a critique. Hydrological Processes 11, 1069-1085.
- Beven K., Calvert A., Morris E. M., 1987 - The Institute of Hydrology Distributed Model. Institute of Hydrology, Report n° 8, Wallingford (UK), 33 p.
- Beven K., Kirkby M. J., 1979 - A physically based, variable contributing area model of catchment hydrology. Hydrological Science 24, 43-69.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R., Jamagne M., 1996 - Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. Etude et Gestion des Sols 3, 27-40.
- De Coursey D. G., 1973 - Objective regionalization of peak flow rates. Water Resources Publications, pp 395-405.
- Curmi P., Bidois J., Bourrié G., Cheverry C., Durand P., Gascuel-Oudou C., Germon J. C., Hallaire V., Hénault C., Jaffrezic A., Mérot P., Trolard F., Walter C., Zida M., 1997 - Rôle du sol sur la circulation et la qualité des eaux au sein de paysages présentant un domaine hydromorphe. Incidences sur la teneur en nitrate des eaux superficielles d'un bassin versant armoricain. Etude et Gestion des Sols 4, 95-114.
- Dodge Y., 1993 - Statistique, Dictionnaire encyclopédique. Dunod, Paris. 408 p.
- Dooge J. C. I., 1986 - Looking for hydrological laws. Water Resource Research 22, 465-585.
- Edijatno C., Michel C., 1989 - Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La Houille Blanche 2, 113-121.
- Heijens F., 1993 - Toepassing van het neerlag-afvoer model grj op enkele stroogebieden in nederland. Rapport d'étude, Université de Wageningen, 57 p.
- Gascuel-Oudou C., Hallaire V., Mérot P., Robin P., 1996 -. Structure des zones contributives de bas-fonds : modélisation et validation expérimentale. In : Etude des Phénomènes Spatiaux en Agriculture (C. Christophe, S. Lardon et P. Monestier eds.), La Rochelle, 6-8 Déc. 1995, Paris, INRA, Les Colloques, n°78, pp 201-213.
- Gibbons, J.D., 1971 - Nonparametric Statistical Inference. McGraw-Hill, Kogakusha, Tokyo.
- Granier A., Badeau V., Bréda N., 1995 - Modélisation du

- bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue Forestière Française* 47, 59-68.
- Grayson R. B., Moore I. D., Mc Mahon T. A., 1992 - Physically based modelling. 2. Is the concept realistic? *Water Resource Research* 26, 2659-2666.
- Loague K. M., Freeze R. A., 1985 - A comparison of rainfall-runoff modelling techniques on small upland catchments. *Water Resource Research* 21, 229-248.
- Loumagne C., Chkir N., Normand M., Ottlé C., Vidal-Madjar D., 1996 -. Introduction of soil/vegetation/atmosphere continuum in a conceptual rainfall/runoff model. *Hydrological Sciences Journal* 41, 889-902.
- Makhlouf Z., 1994 - Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat, 426 + 208 p. Université Paris XI Orsay.
- Makhlouf Z., Michel C., 1992 - Relation entre les paramètres d'un modèle global pluie-débit et les caractéristiques physiques d'un bassin versant breton. 8ème Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, 22/23 sept. 1992.
- Martinez J., Rango A., 1989 - Merits of statistical criteria for the performance of hydrological models. *Water Resource Research* 25, 421-432.
- Michaud J., Sorooshian S., 1994 -. Comparison of simple versus complex distributed models on a mid-sized semiarid watershed. *Water Resource Research* 30, 593-605.
- Michel C., Edijatno C., Leviandier, T., 1991 - Progrès et application de la modélisation conceptuelle pluie-débit. Rapport quadriennal du CNFGG 1987-1990, Section VI : Sciences Hydrologiques, pp 219-222.
- Morel-Seytoux H. J., Al Hassoun S., 1989 - The unsaturated component of SWATCH : a multiprocess watershed model for runoff generation and routing. In Morel-Seytoux (Ed.) *Unsaturated Flow in Hydrological Modelling - Theory and Practice*. NATO ASI Series C, vol. n°275, Kluwer Academic Publ., pp 413-433.
- Nash J. E., Sutcliffe J. V., 1970 - River flow forecasting through conceptual models. *Journal of Hydrology* 10, 282-290.
- Nascimento de Oliveira N., 1995 - Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Thèse de doctorat del'ENPC. 550 p.
- Nathan R. J., Mc Mahon T. A., 1990 - Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. *Journal of Hydrology* 1, 217-238.
- Petersen, L.W., Moldrup, P., Jacobsen, O.H., Rolston, D.E. 1996 - Relations between specific surface area and soil physical and chemical properties. *Soil Science* 161, 9-21.
- Refsgaard J. C., 1996 - Model and data requirements for simulation of runoff and land surface processes in relation to global circulation models. In *Global Environmental Change and Land Surface Processes in Hydrology : the trial and tribulations of modelling and measuring*. NATO ASI Series I n° 46, Sorooshain S., Gupta H., Rodda J. (Eds), Springer-Verlag, New-York, pp 423-445.
- Richter, J., 1987 - The soil as a reactor : modelling processes in the soil. Catena, Verlag.
- Tessier D., Bruand A., Le Bissonnais Y., Dambrine E., 1996 - Qualité chimique et physique des sols : variabilité spatiale et évolution. *Etude et Gestion des Sols* 3, 229-244.
- Wilcoxon F., 1945 - Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics* 1, 80-83.

FICHE ANALYTIQUE DE MODELE PLUIE-DEBIT

Nom du modèle: GR4J

Créé par: EDIJATNO, NASCIMENTO, N.O., MICHEL, C.

Date de création (première publication): 1992

Institut - Pays: Cemagref,
Antony, France

Buts de modélisation et domaines d'application:

Modélisation pluie-débit à peu de paramètres en vue d'utilisation sur des bassins versants non-jaugés

Principales caractéristiques:

- Pas de temps : journalier
- Données d'entrée : Pluies (+ débits en calage)
Evapotranspiration
- Sorties: Débits
- Module neige: non
- Modules complémentaires: non
- Structure:

- **Interception :**

La pluie brute subit l'évapotranspiration potentielle ETP. La pluie nette P_n est alors déterminée par :

- si $P \geq E$ alors $P_n = P - E$ et $E_n = 0$
- si $P < E$ alors $P_n = 0$ et $E_n = E - P$

- **Réservoir sol :**

Lorsqu'il reste une pluie dP_n , la partie allant dans le réservoir sol est dP_s et l'autre partie dP_r transite vers l'exutoire :

$$dP_r = \left(\frac{S}{A}\right)^2 \cdot dP_n$$

$$dP_s = \left[1 - \left(\frac{S}{A}\right)^2\right] \cdot dP_n$$

où S est le niveau dans le réservoir sol et A la capacité maximale de ce réservoir. Le variation du niveau du réservoir sol est $dS = dP_s$ et le niveau est mis à jour suivant :

$$S_{k+1} = \frac{S_k + A \cdot \tanh(P_n / A)}{1 + [S_k / A] \cdot \tanh(P_n / A)}$$

Dans le cas où toute la pluie est consommée lors de l'interception, le restant E_n d'ETP sert à faire évaporer l'eau contenue dans le réservoir sol, à un taux commandé par une fonction du niveau dans le réservoir sol. La variation du niveau est :

$$dS = -dE_s$$

$$\text{avec } dE_s = (S/A) \cdot [2 - (S/A)] \cdot dE_n$$

Le niveau du réservoir est mis à jour suivant :

$$S_{k+1} = S_k \frac{1 + \tanh(E_n / A)}{1 + [1 - S_k / A] \cdot \tanh(E_n / A)}$$

- Séparation des composantes de l'écoulement :

La pluie est séparée en deux composantes, un écoulement pseudo-direct et un écoulement lent, représentant respectivement 10 % et 90 % de la pluie efficace.

- Hydrogramme unitaire :

Les deux composantes de l'écoulement subissent tout d'abord un retard par action d'un hydrogramme unitaire qui permet de simuler le temps de montée de l'hydrogramme. Ces hydrogrammes sont caractérisés par un temps caractéristique C. L'écoulement lent est retardé par une fonction UH1 de la forme :

$$\begin{aligned} q(t) &= \frac{3t^2}{C^3} && \text{pour } 0 \leq t \leq C \\ \text{et } q(t) &= 0 && \text{pour } t > C \end{aligned}$$

où t est le temps. L'écoulement rapide est retardé par un hydrogramme UH2 du type :

$$\begin{aligned} q(t) &= \frac{3t^2}{2C^3} && \text{pour } 0 \leq t \leq C \\ q(t) &= \frac{3(2C-t)^2}{2C^3} && \text{pour } C < t \leq 2C \\ \text{et } q(t) &= 0 && \text{pour } t > 2C \end{aligned}$$

- Réservoir de routage :

Après avoir été retardé par l'hydrogramme unitaire, la composante lente de l'écoulement transite par un réservoir de routage non linéaire qui se vidange suivant une loi :

$$Q_r(t) = K R(t)^\alpha$$

où K est une constante et R le niveau dans le réservoir de routage. Le niveau du réservoir de routage est donc mis à jour d'après :

$$\frac{1}{R_{k+1}^{\alpha-1}} = \frac{1}{R_k^{\alpha-1}} + \frac{1}{B^{\alpha-1}}$$

où B est la capacité maximale du réservoir de routage ($\frac{1}{B^{\alpha-1}} = K \cdot (\alpha - 1) \cdot \Delta t$). Le débit du réservoir est alors :

$$Q_r = R_{k+1} - R_k$$

- Écoulement pseudo direct :

Après le retard induit par l'hydrogramme unitaire, l'écoulement pseudo direct arrive directement à l'exutoire.

- Terme d'échanges souterrains :

Un terme T permet de tenir compte des infiltrations profondes ou des échanges d'eau souterrains. Il dépend d'un paramètre D (négatif ou positif).

Si D est négatif, T est exprimé par :

$$T = D \cdot \frac{S}{A}$$

et est soustrait à l'écoulement direct Q_p et au niveau du réservoir de routage suivant :

$$Q_p = \max(0, Q_p + T)$$

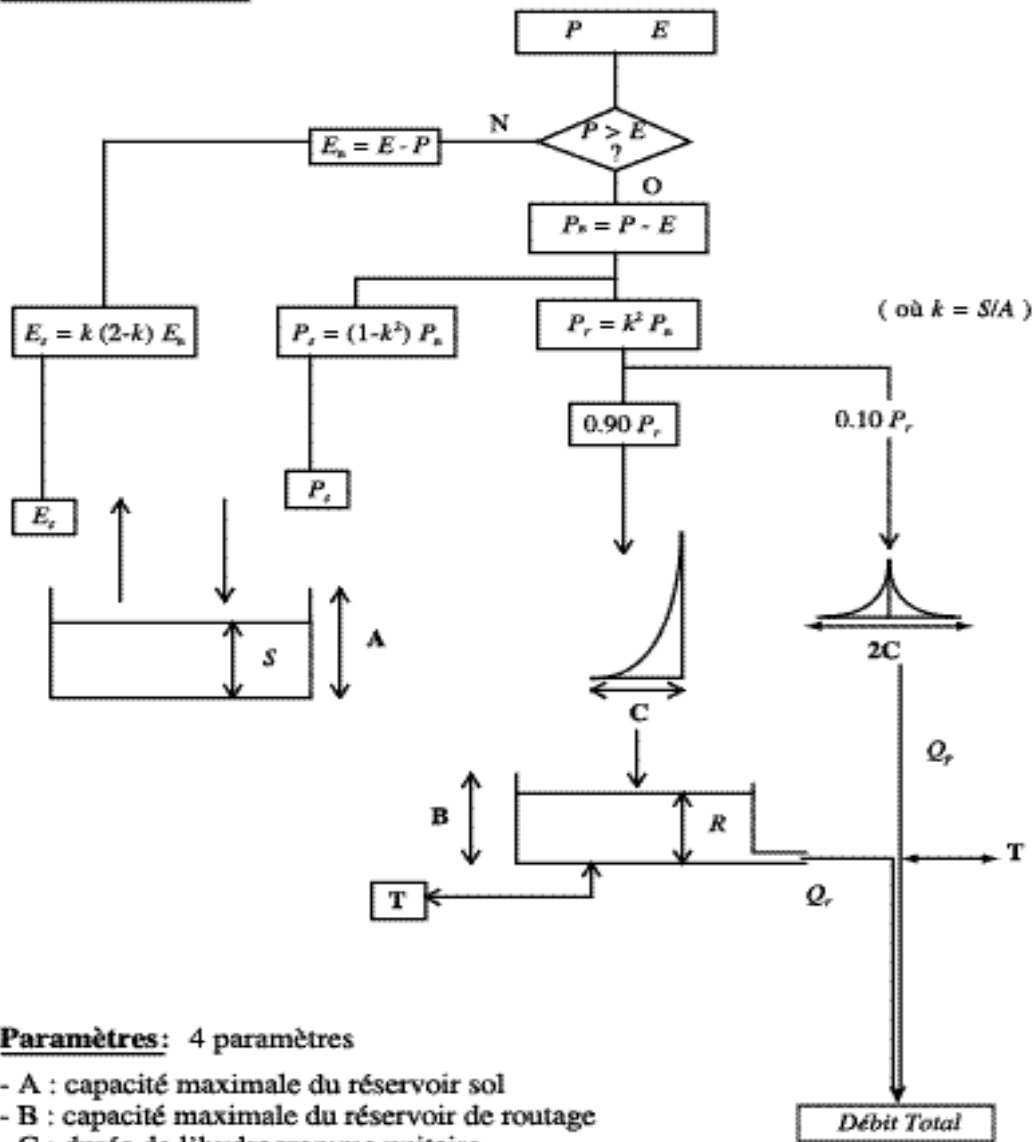
et $R = \max(\epsilon, R + T)$ où ϵ a une valeur faible

Si d est positif, on a alors :

$$T = D \cdot \frac{R}{B}$$

qui est appliqué aux deux composantes de l'écoulement comme précédemment.

Schéma structurel :



Paramètres: 4 paramètres

- A : capacité maximale du réservoir sol
- B : capacité maximale du réservoir de routage
- C : durée de l'hydrogramme unitaire
- D : paramètre d'échanges souterrains

Test du modèle sur:

Le modèle a été testé sur un grand nombre de bassins versants, essentiellement français (Makhlouf, 1994; Nascimento, 1995)

Analyse de sensibilité :

Nascimento (1995)

Régionalisation:

Travaux de régionalisation et d'interprétation des paramètres sur des bassins de Moselle et de Bretagne (Makhlouf, 1994) : interprétation parfois difficile. Etude de tendance sur les paramètres en fonction de changements environnementaux (Nascimento, 1995).

Technique d'optimisation des paramètres:

Méthode pas-à-pas

Comparaisons avec d'autres modèles:

- Loumagne et al. (1996) : performances comparées de GRHUM et GR4J sur le bassin de l'Orgeval. Meilleures performances de GR4J en validation.

- Heijens (1993) : comparaison avec le modèle de Wageningen : meilleures performances pour GR4J

Références bibliographiques:

Edijatno and Michel, C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, 2, 113-121.

Heijens, F. (1993). Toepassing van het neerslag-afvoer model gr4j op enkele stroomgebieden in nederland. Rapport d'étude, Université d'Agriculture de Wageningen, 57 pp.

Loumagne, C., Chkir, N., Normand, M., Ottlé, C., Vidal-Madjar, D. (1996). Introduction of soil/vegetation/atmosphere continuum in a conceptual rainfall/runoff model. *Hydrological Sciences Journal*, 41(6), 889-902.

Nascimento, N.O. and Michel, C. (1992). Some epistemological aspects of the development and use of hydrologic conceptual models. *Proceedings of the 4th Junior Scientist Course "Assessment of Modelling Uncertainties and Measurement Error in Hydrology"*, S-Etienne (France).

Makhlouf, Z. (1994). Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat. Université de Paris XI Orsay / Cemagref (Antony), 228 pp.

Nascimento, N.O. (1995). Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat. CERGRENE / ENPC, 550 pp.

Version retenue:

On conserve la structure décrite précédemment avec des modifications dans certaines des formulations mathématiques correspondant à des parties du modèle GR3J (issu de la modification de GR4J) :

- l'expression de la fonction de production est simplifiée. La partie de la pluie allant dans le réservoir sol est exprimée par :

$$P_s = \frac{P_n \left(1 - \left(\frac{S}{D}\right)^2\right)}{1 + \left(\frac{P_n}{D}\right) \left(1 + \frac{S}{D}\right)}$$

où S est le niveau dans le réservoir sol et D la capacité maximale de ce réservoir fixée à 330 mm.

- l'évapotranspiration issue du réservoir sol est exprimée par :

$$E_s = \frac{E_n \left(\frac{S}{D}\right) \left(2 - \frac{S}{D}\right)}{1 + \left(\frac{E_n}{D}\right) \left(2 - \frac{S}{D}\right)}$$

- les échanges souterrains sont exprimés dans tous les cas par :

$$F = X1 \cdot \left(\frac{R}{X2}\right)^4$$

où $X1$ est un paramètre positif, négatif ou nul et $X2$ la capacité du réservoir de routage.