

SHYREG : une méthode pour l'estimation régionale des débits de crue. Application aux régions méditerranéennes françaises

Jacques Lavabre^a, Catherine Fouchier^a, Nathalie Folton^a, Yves Gregoris^b

En France métropolitaine, les inondations des 15 dernières années ont provoqué une centaine de pertes en vies humaines et des dommages aux biens publics et privés qui sont estimés à plus de trois milliards d'euros. Afin de limiter l'impact des inondations, le ministère de l'Écologie et du Développement durable (MEDD) a mis en place une politique de prévention. Depuis 1995, cette politique s'est concrétisée, entre autres, par l'élaboration de plans de prévention des risques inondation – PPRi – (MATE, 1999). La crue de référence retenue dans le cadre des PPRi est définie par la plus forte crue historique ou par le débit centennal s'il excède le plus fort débit connu. Or, les informations historiques sur les petits bassins versants (de quelques km² à quelques centaines de km²) sont très parcellaires. Il en résulte que la très grande majorité des PPRi est élaborée sur la base d'une estimation des débits centennaux.

L'estimation des débits centennaux repose généralement sur l'étude statistique d'une chronique d'observation de débits ou, plus rarement, sur une approche par modélisation de la pluie en débit. Les informations hydro-climatologiques nécessaires ne sont disponibles que pour les bassins versants jaugés. Bien qu'en France le réseau de mesure soit relativement

consistant (plus de 4 000 stations de mesure des débits en continu, essentiellement gérées par les directions régionales de l'Environnement – DIREN), nous ne disposons d'aucune information sur la majorité des bassins versants.

Confronté à ce problème, le technicien dispose de quelques parades : modélisation simple de la pluie en débit, transfert d'information d'un bassin jaugé en utilisant un facteur de proportionnalité généralement basé sur le ratio des superficies des bassins versants, formulations régionales...

L'examen des dossiers PPRi en cours montre une certaine dispersion des estimations des débits de référence qui, rappelons-le, sont la base de la cartographie réglementaire des zones inondables. Devant cet état de fait, il a été décidé de mettre en œuvre une méthode régionale qui synthétise l'ensemble de l'information pluie et de l'information débit d'une région, pour proposer des estimations de débits de crue en tout point du réseau hydrographique.

La méthodologie retenue est basée sur une régionalisation de la méthode SHYPRE (Fouchier *et al.*, 2002 ; Fouchier et Lavabre, 2002 ; Lavabre *et al.*, 2003). La méthodologie est présentée dans la note ainsi que son application sur les régions méditerranéennes françaises.

Contact

a. Cemagref,
UR Ouvrages
hydrauliques et
équipements pour
l'irrigation,
Le Tholonet, BP 31,
13612 Aix-en-Provence
b. Météo-France,
Direction inter-
régionale Sud-Est,
2, boulevard du
Château Double,
13098 Aix-en-Provence

Méthodologie

La méthode SHYPRE

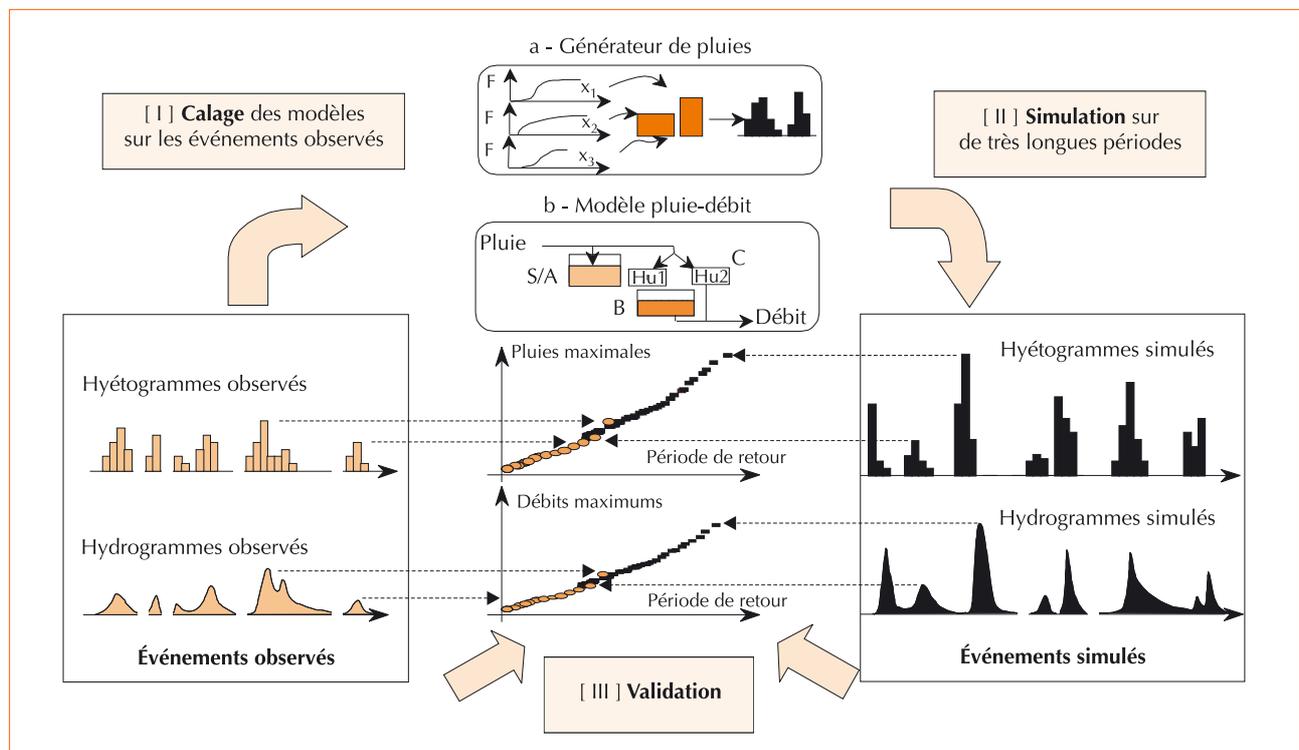
SHYPRE, acronyme de simulation d'hydrogrammes pour la prédétermination des crues, est une méthode développée au groupement d'Aix-en-Provence du Cemagref. Elle s'appuie sur les travaux de Cernesson (1993), Cernesson *et al.* (1996), Arnaud (1997) et Arnaud *et al.* (1999). La méthode associe un générateur aléatoire de pluies horaires et une transformation de la pluie en débit (figure 1). Les techniques de simulation permettent de générer de très longues chroniques de pluies horaires (sur 100 000 ans, par exemple), d'où se déduisent les hydrogrammes de crue par application d'une modélisation simple de la pluie en débit. Un simple classement des pluies et des débits simulés permet de tracer les distributions de fréquence « empiriques » des pluies et des débits de toutes durées et d'en déduire les quantiles pour une large gamme de périodes de retour, de 2 à 1 000 ans.

Le modèle de génération de pluie s'appuie sur une description géométrique du signal temporel de pluie. La génération du signal temporel de pluie est réalisée en deux étapes. La première étape est l'étude descriptive du phénomène. Elle est basée

sur l'analyse de la structure temporelle interne des événements pluvieux observés au pas de temps horaire. Un événement pluvieux est défini comme une succession de pluies journalières supérieures à 4 mm et dont au moins un cumul journalier excède 20 mm. Huit variables sont utilisées pour décrire le signal : le nombre d'événements par année, le nombre de périodes pluvieuses par événement (une période pluvieuse est constituée par une séquence de pluies horaires non nulles), le nombre d'averses par période pluvieuse (une averse, dans une période pluvieuse, est constituée par une séquence qui présente un seul maximum) et, pour chaque averse, sa durée, son intensité moyenne, la position relative de l'intensité maximale dans l'averse, le rapport entre l'intensité maximale horaire et l'intensité moyenne de l'averse, et enfin la durée sèche qui sépare deux périodes pluvieuses à l'intérieur d'un événement (figure 2). Ces variables sont ensuite identifiées par leur loi de probabilité.

Après cette phase d'identification, la seconde étape consiste en la génération des hyétochromes horaires à partir des variables descriptives qui sont générées, de manière indépendante, par un tirage aléatoire dans leur loi de probabilité suivant une

▼ Figure 1 – Principe de la méthode SHYPRE.



méthode de Monte-Carlo. On obtient ainsi de multiples scénarios de pluies horaires générées sur de très longues périodes de simulation.

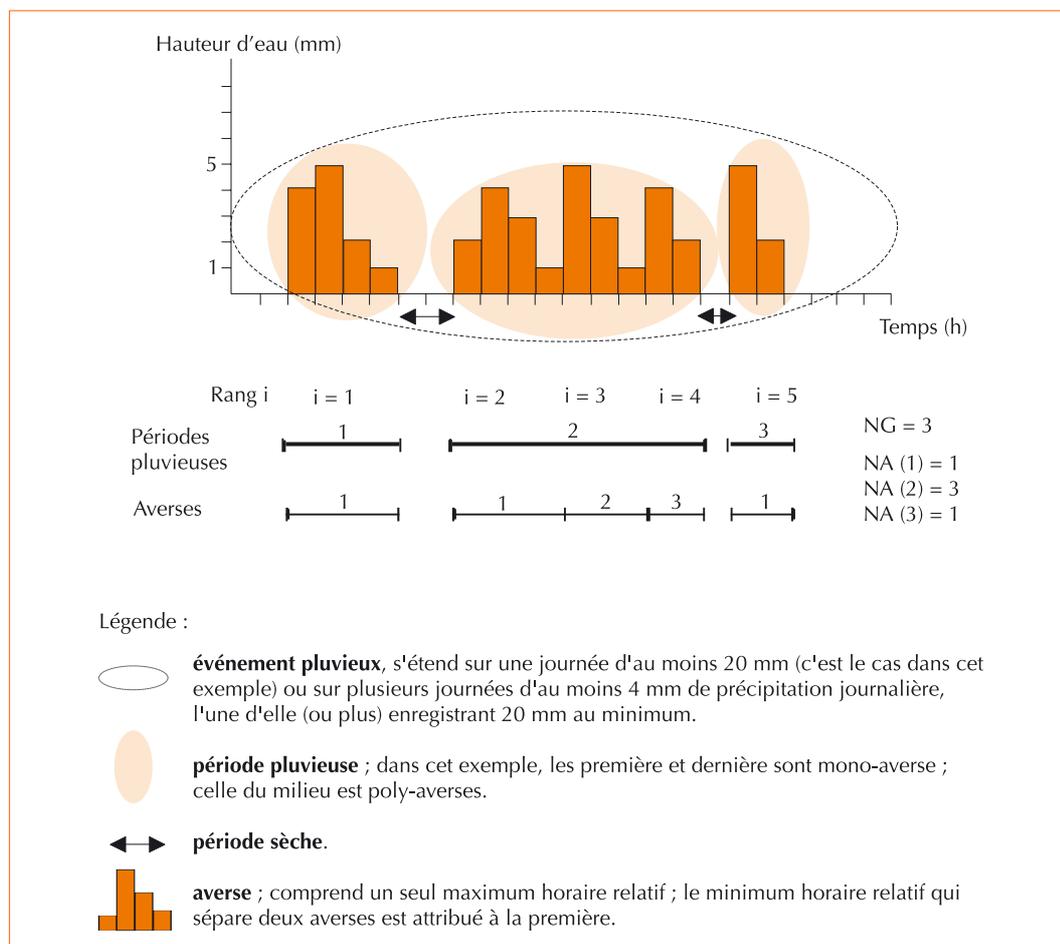
Les chroniques horaires d'une cinquantaine de postes situés sur la façade méditerranéenne française ont été examinées. Ceci a permis de retenir une loi de probabilité théorique pour chaque variable. Dans un souci d'homogénéité, nous retenons les mêmes lois pour l'ensemble des postes. Afin d'assurer une bonne robustesse à la méthode, nous avons identifié, lorsque cela était possible, les lois de probabilité sur l'ensemble des postes, après avoir homogénéisé les échantillons.

Le modèle de génération de pluie horaire nécessite 21 paramètres déterminés à partir des chroniques de pluies horaires observées, pour les deux saisons considérées : l'hiver de décembre à mai et l'été de juin à novembre. Ce nombre de paramètres peut paraître important, mais une

étude de sensibilité, réalisée en vue de régionaliser le modèle, a montré que seulement 5 paramètres suffisent pour couvrir la plage de variabilité pluviométrique importante de la région méditerranéenne française (Arnaud, 1997). Les autres paramètres peuvent être fixés à une valeur régionale soit parce qu'ils sont peu variables, soit parce que le modèle est peu sensible à leur fluctuation. Ces paramètres que l'on peut fixer dans le cadre d'une régionalisation sont surtout des paramètres influant sur la géométrie des hyétogrammes.

Deux modèles peuvent être mis en œuvre par SHYPRE pour la transformation pluie-débit :

- le modèle conceptuel GR3H défini par 3 paramètres (Edijatno *et al.* 1989) ;
- la fonction de production du SCS, *Soil Conservation Service (National Engineering Handbook, 1985)*, associée à un hydrogramme unitaire. La fonction de production est définie par



un paramètre J qui présente la capacité de rétention du sol pour une crue donnée. Sa formulation est la suivante :

$$R(t) = \frac{(P(t) - 0,2 J)^2}{P(t) + 0,8 J} \quad (1)$$

avec P(t) : pluie cumulée en mm,

R(t) : écoulement cumulé en mm,

J : paramètre qui représente la rétention du bassin versant en mm.

La fonction de transfert est assurée par un hydrogramme unitaire qui est défini par deux paramètres (D et α). La fonction retenue s'écrit (ministère de l'Agriculture, 1980) :

$$q(t) = Q_p \frac{2 \left(\frac{t}{D} \right)^\alpha}{1 + \left(\frac{t}{D} \right)^{2\alpha}} \quad (2)$$

avec q(t) : le débit à l'instant t,

Q_p : le débit de pointe de l'hydrogramme unitaire,

D : le temps de montée de l'hydrogramme unitaire,

α : le coefficient de forme de l'hydrogramme unitaire, ($\alpha > 0$).

C'est ce dernier modèle qui sera ici utilisé dans une forme simplifiée en le réduisant, comme nous le verrons par la suite, à la seule fonction de production.

SHYREG : la méthode SHYPRE régionalisée

Régionalisation du générateur de chroniques de pluies horaires

Dans sa conception initiale – calage local sur une chronique de pluies horaires – le modèle de génération de pluies est défini par 8 variables. La définition de ces variables pour les deux saisons considérées par le modèle (hiver de décembre à mai, été de juin à novembre) nécessite le calage de 21 paramètres. La régionalisation du modèle comporte 3 étapes :

(a) la simplification du modèle. Différents tests de sensibilité ont permis de réduire, pour chaque saison, le nombre de variables du modèle à cinq sans altérer sensiblement ses performances (Arnaud, 1997) ;

(b) la recherche de variables exogènes explicatives des paramètres des cinq variables du modèle de génération simplifié. L'information de la pluie journalière a pu être utilisée, ce qui est particulièrement intéressant au regard de la bonne disponibilité de cette information dans l'espace. Les deux grandeurs caractéristiques de la pluie au pas de temps journalier déterminées en chaque poste pour les deux saisons sont : le nombre N_e moyen d'événements pluvieux par saison et un paramètre régional indicateur du modèle de simulation des pluies (PRIMS). Les quantiles de pluie journalière peuvent aussi être directement estimés statistiquement grâce aux chroniques d'observation des pluies journalières. Nous avons ici retenu, pour l'ensemble des postes, un ajustement par une loi de Gumbel, calée par la méthode des moments.

Le modèle de simulation de pluies horaires peut être activé pour tout couple de valeurs N_e et PRIMS. Des chroniques de pluies horaires ainsi simulées, se déduisent directement les quantiles de pluies journalières de différentes périodes de retour. Pour un poste pluviométrique donné, nous retenons la valeur de PRIMS qui respecte au mieux les quantiles de la pluie journalière de période de retour 2, 5 et 10 ans issus des chroniques d'observations. À l'issue de cette étape, tous les postes pluviométriques sont caractérisés par un couple N_e - PRIMS (par saison) ;

(c) la régionalisation proprement dite des deux paramètres N_e et PRIMS. L'objectif de cette étape est de mettre en évidence une structure spatiale afin de disposer d'une estimation des paramètres étudiés en tout point de la zone étudiée. Une approche semblable à celle de la méthode AURELHY (Benichou *et al.*, 1986) est utilisée, sur la base d'une grille d'altitude plus fine (la maille de la grille est ici de 9 km² contre 100 km² dans la méthode AURHELY). Une analyse en composantes principales permet de dégager les éléments structurants du relief, qui sont utilisés comme variables explicatives. Des équations de régression linéaire sont ensuite établies avec les composantes principales du relief et avec des paramètres ayant une influence sur la climatologie locale tels que la proximité de la mer ou de reliefs importants, la présence de grandes vallées...

La modélisation de la pluie en débit

Il est clair que le modèle SCS n'est pas le meilleur outil de modélisation qui puisse être utilisé. Mais sa robustesse est reconnue et son faible paramétrage est un atout pour une approche régionale. Toutefois, l'objectif de construire une méthodologie susceptible d'estimer les débits de crue en tout point du réseau hydrographique, donc pour des superficies de bassin versant très variable, soulève, entre autres, le problème de la connaissance spatiale de la pluie. Quelques formulations de l'abattement des pluies en fonction de la superficie des bassins versants sont disponibles (Neppel *et al.*, 2003), mais elles sont limitées à des quantiles de pluie. Rien d'opérationnel n'est disponible pour une approche spatio-temporelle à faible pas de temps.

Afin d'évacuer, à ce stade de l'étude, le problème de l'abattement des pluies, nous appliquons le modèle de transformation de la pluie en débit à un pas d'espace fin en faisant l'hypothèse que l'abattement des pluies devient négligeable. En fait, l'espace d'étude est approché par une grille régulière de 1 x 1 km. Chaque maille constitue un bassin versant virtuel de 1 km², sur lequel la transformation pluie-débit est effectuée. Afin de simplifier au maximum la modélisation, une fonction de transfert unique (caractérisée par une valeur de α et de D) est retenue pour l'ensemble des pixels de 1 km². Les bassins versants virtuels sont donc caractérisés par le seul paramètre J de la fonction de production.

Agglomération de l'information à l'échelle du bassin versant

Pour obtenir le débit à l'exutoire d'un bassin versant, il est nécessaire de définir une règle d'agglomération des débits des pixels qui le composent. L'agglomération des pixels d'un quantile de débit donné pour estimer le même quantile de débit à l'exutoire du bassin versant n'est pas une pratique classique. Elle nous amène à proposer la notion de fonction de transfert statistique (FTS). Des développements méthodologiques pour améliorer l'estimation de cette FTS sont encore nécessaires. Nous nous limitons ici à la définition d'une FTS globale, définie en fonction uniquement de la superficie du bassin versant. Elle s'écrit :

$$Q(d, T) = \left(\sum_{i=1}^n q(d, T)_i \right) \times S^{1-\beta(1-S^\gamma)} \quad (3)$$

avec $q(t)$: le débit à l'instant t ,

$Q(d, T)$: le débit de durée d et de période de retour T à l'exutoire du bassin versant,

$q(d, T)_i$: le débit de durée d et de période de retour T pour un pixel i donné à l'intérieur des limites du bassin versant,

n : le nombre de pixel de 1 km² à l'intérieur du bassin versant,

S : la surface du bassin versant en km² (très peu différente de n),

β : paramètre fonction de la durée d des débits (débit de pointe, débit moyen en 1, 2, ... 72 heures). β décroît avec la durée d des débits, l'abattement étant plus élevé pour les débits de pointe que pour les débits moyens sur plusieurs heures ou plusieurs jours,

γ : paramètre qui limite l'abattement pour les petites surfaces. Il est fonction de la période de retour T .

La régionalisation du modèle pluie-débit

Par hypothèse, les paramètres α et D sont constants pour l'ensemble des pixels, tout comme β et γ qui ont aussi des valeurs uniques dans l'espace. La régionalisation porte essentiellement sur le paramètre J de la fonction de production qui représente la rétention du bassin versant. Il peut être déterminé à partir de tables publiées par le *Soil Conservation Service*, (*National Engineering Handbook*, 1985).

Nous avons préféré déduire J à partir d'informations locales issues des bases de données disponibles : altimétrie, occupation de l'espace, géologie. Le croisement de ces couches d'information permet d'établir une cartographie du paramètre de production du modèle J , à la maille du km². À cette étape, nous sommes en mesure, pour chacune des mailles, de simuler des chroniques horaires de pluie et de les transformer en hydrogrammes de crue. De ces chroniques de crue sont déduits les quantiles de débit de différentes durées et de différentes fréquences qu'il est possible de cartographier.

Examen et traitement des données de pluie et de débit

La méthode a été utilisée sur les régions méditerranéennes françaises Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte-d'Azur et Corse. Nous

rapporçons ici essentiellement l'approche des deux premières régions citées.

La pluie

Nous avons déjà indiqué que le calage du modèle de simulation de pluie horaire a été effectué sur une cinquantaine de postes de la zone méditerranéenne française.

À titre d'exemple, la figure 3 montre, pour le poste du Collet de Dèze (département du Gard), la bonne adéquation du modèle de simulation, que ce soit pour le modèle complet (figure 3a) et pour le modèle simplifié (figure 3b), uniquement mis en œuvre avec la valeur locale de Ne et de PRIMS. Les distributions de fréquence des points observés sont bien reproduites par la simulation, ceci malgré le fait que, par construction, le modèle ne dispose pas directement des échantillons des pluies observées. Les cumuls sur plusieurs heures sont calculés à partir des hyétoigrammes horaires simulés, ce qui laisse penser que le modèle de simulation respecte bien la structure temporelle des pluies.

L'approche régionale (pour la caractérisation de Ne et de PRIMS) s'appuie sur 556 stations pluviométriques de la zone méditerranéenne. Ces postes présentent une chronique de 20 années sur la période d'observation 1980-1999. Météo-France a estimé les quantiles de période de retour 2, 5 et 10 ans des pluies journalières, qui servent à la détermination du PRIMS.

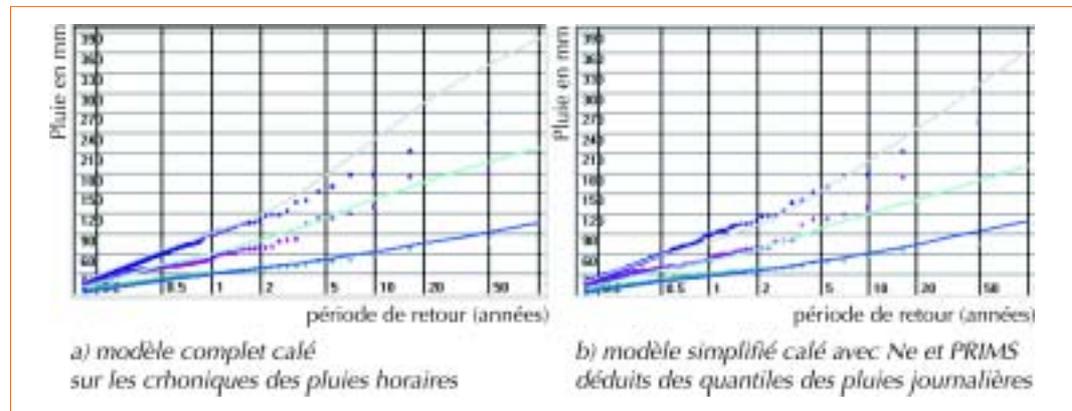
Sur la zone d'étude, les quantiles décennaux des pluies journalières varient dans une large fourchette de l'ordre de 50 à 60 mm pour certains postes alpins à plus de 300 mm pour certains postes des Cévennes.

La figure 4 met en évidence l'aptitude du modèle de simulation de pluie horaire à restituer correctement les quantiles des pluies journalières. Ce bon résultat n'est toutefois pas étonnant car la valeur de PRIMS a été déterminée localement pour représenter au mieux ces mêmes quantiles.

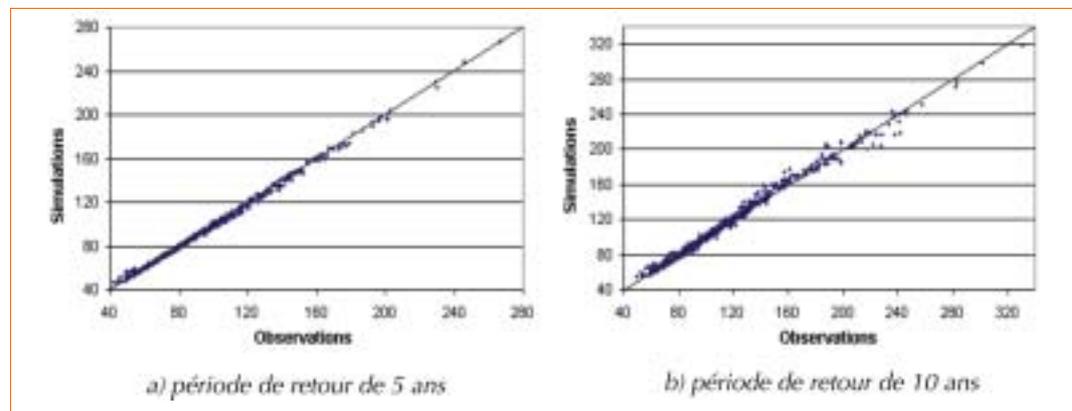
Les débits

Les DIREN Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte-d'Azur ont mis à notre disposition les

► Figure 3 – Poste du Collet de Dèze (saison été). Distributions de fréquence des pluies de durées 1, 4 et 24 heures (de bas en haut). Les points représentent les observations et les courbes sont issues de la simulation.



► Figure 4 – Comparaison des quantiles de pluies journalières déduits des 556 chroniques d'observations et déduits des chroniques simulées (saison été).



quantiles de période de retour 2, 5 et 10 ans des débits de pointe de crue et des débits journaliers maximum. Les DIREN ont procédé à un tri préalable des stations afin d'écartier celles pour lesquels les incertitudes sur les débits sont jugées trop élevées. Ce sont les données de 220 bassins versants qui ont finalement été examinées. La durée d'observation est d'au moins 10 ans sur la période 1970-1999. Nous n'avons retenu que les bassins versants de superficie inférieure à 1 000 km².

Nous avons cartographié (figure 5) les débits journaliers de fréquence décennale. On note une forte variabilité de ces débits, qui sont inférieurs à 20 mm pour une proportion non négligeable de bassins versants (30 %) et peuvent dépasser 100 mm pour certains bassins versants de la zone cévenole et des Pyrénées-Orientales. Afin de pouvoir comparer les débits de pointe de crue de fréquence décennale, quelle que soit la surface du bassin versant, il est commode d'établir une relation de type $Q = A \times S^{0,8}$. Le coefficient A est cartographié figure 6 (p. 104).

Globalement on retrouve pour A une répartition dans l'espace comparable à celle des débits journaliers de fréquence décennale : valeurs élevées sur la zone cévenole, valeurs faibles pour les bassins versants des Bouches-du-Rhône, du Vaucluse, des Hautes-Alpes...

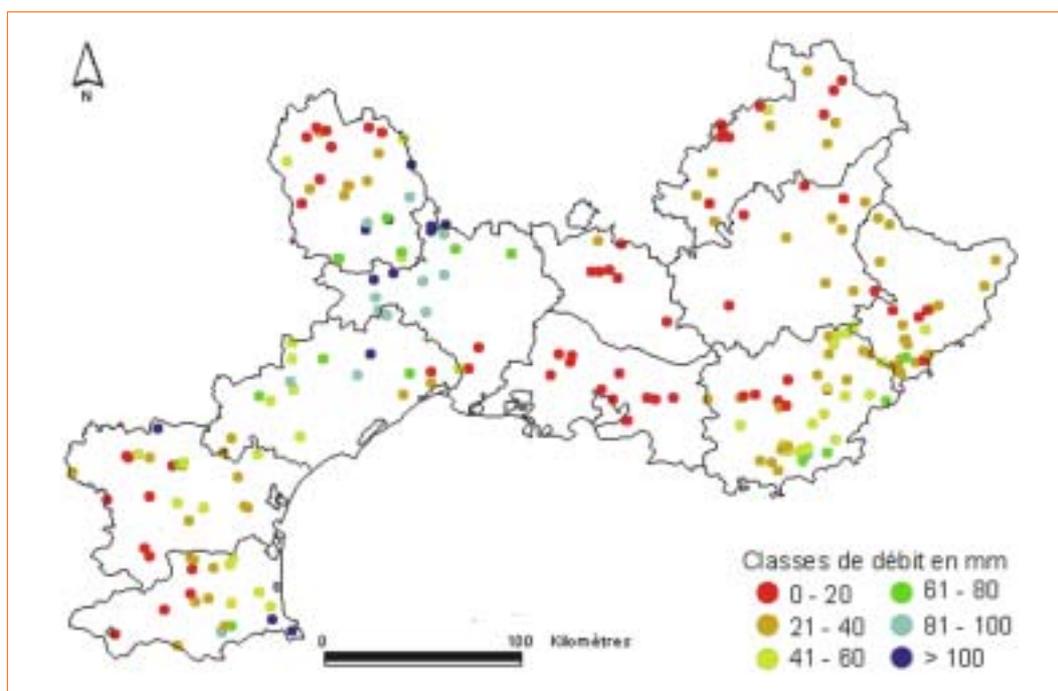
La régionalisation

La régionalisation du modèle de pluie

Les valeurs locales de Ne et de PRIMS sont connues pour chacun des 556 postes du réseau pluviométrique. La connaissance de ces paramètres en tout point de l'espace (en fait à une maille de 1 km²) nécessite une phase de régionalisation.

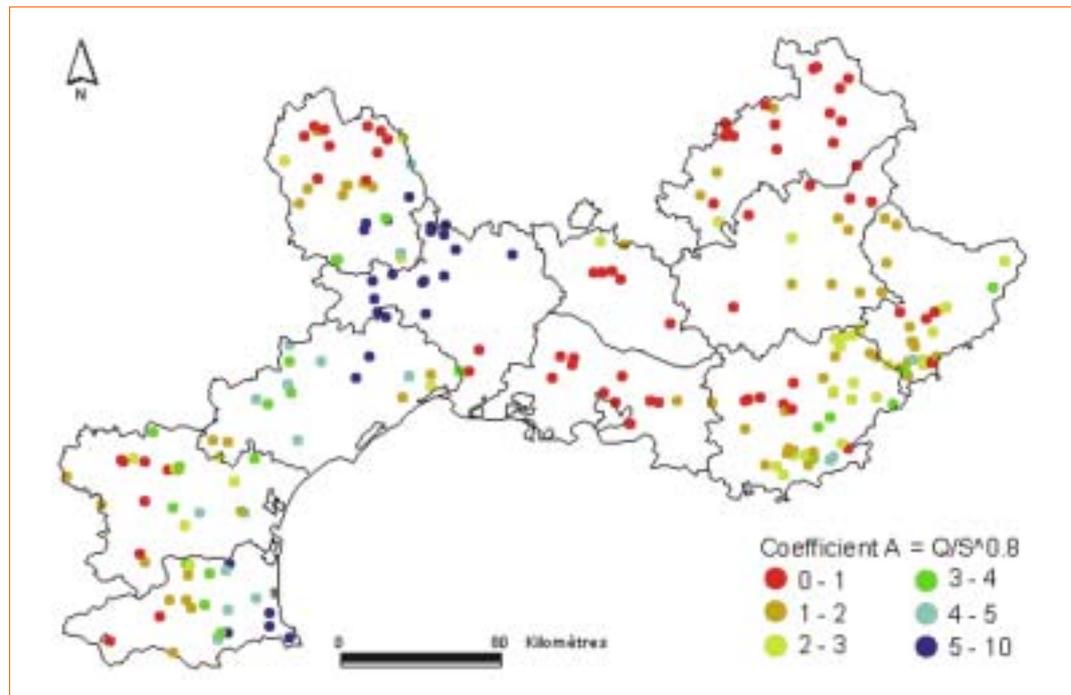
La régionalisation a été effectuée par Météo-France (Météo-France, 2001). Quatre zones homogènes au sens du régime des pluies, sont préalablement identifiées. Les régressions pour expliquer la variation spatiale de Ne et PRIMS sont établies pour chacune des zones. Outre les composantes principales du relief, d'autres variables *a priori* explicatives ont été introduites : altitude du point, distance à la côte, distance à la ligne de crête. Les coefficients de corrélation multiples varient entre 0,93 et 0,55. Pour 8 des relations établies sur 16 (4 régions, 2 saisons, deux paramètres Ne et PRIMS), le coefficient de corrélation est supérieur à 0,8, ce qui peut être considéré comme très correct. Aucune tendance : tel paramètre, telle zone, n'est discernable pour les relations les moins marquées.

Les équations de régression forment une fonction géographique susceptible d'estimer les variables



◀ Figure 5 – Cartographie des débits journaliers décennaux (mm).

► Figure 6 –
Cartographie du
coefficient A de la
relation $Q = A \times S^{0,8}$
où Q représente le
débit de pointe de
crue de fréquence
décennale (m^3/s) et S
la superficie du
bassin versant (km^2).



Ne et PRIMS en tout point de l'espace. L'incertitude de cette fonction peut être appréciée par les résidus locaux (différence entre la valeur « géographique » d'un paramètre et sa valeur locale climatologique).

Après quelques tests, nous avons décidé de borner les résidus à plus ou moins 20 % avant de procéder à leur lissage cartographique. Ce bornage élimine les forts résidus, que nous attribuons à des incertitudes d'échantillonnage lors des calculs locaux de Ne et surtout lors de l'estimation des quantiles des pluies journalières, qui conditionnent la valeur locale de PRIMS.

La superposition de la grille des résidus (obtenus par krigeage) et de la grille obtenue par la fonction géographique aboutit à la grille finale des paramètres. Ces grilles sont présentées, figures 7 et 8, pour la saison été.

Les quatre grilles ainsi obtenues (2 pour la saison été et 2 pour la saison hiver) suffisent pour le paramétrage du modèle de simulation de pluies horaires.

Le modèle a été activé pour chacun des pixels. Nous obtenons des scénarios de pluie horaire sur une période de simulation de 1 000 ans. Ces hyétogrammes sont destinés à être modélisés en débit. Il est aussi possible de tracer la

distribution de fréquence « empirique » des résultats de la simulation. Et ceci pour les pluies horaires et pour les pluies de durée supérieure obtenues par agglomération des pluies horaires.

Les figures 9 et 10 (p. 106) présentent les cartographies obtenues pour les quantiles de fréquence décennale des pluies horaires et des pluies journalières.

On remarque, entre autres :

- la forte pluviométrie de la zone languedocienne avec un maximum sur la zone cévenole ;
- la décroissance des pluies dès que l'influence méditerranéenne s'estompe (zone ouest de l'Aude, zone nord de la Lozère) ;
- une pluviométrie globalement plus faible sur la région provençale avec un minimum sur la zone alpine.

Les performances du modèle régional sont appréciées en comparant les quantiles décennaux des pluies journalières issus des séries d'observations et issus des simulations du modèle régional (figure 11, p. 106). On note une bonne restitution avec des coefficients de Nash élevés (le principe des coefficients de Nash est rappelé dans l'encadré 1, p. 107). Remarquons que les écarts sont le fait du bornage des résidus et que la

méthode régionale pourrait avoir les mêmes performances que celles présentées sur la figure 4 (p. 102), si on avait respecté les résidus locaux.

La régionalisation du modèle de transformation de la pluie en débit

À ce stade du développement de l'étude, le modèle de simulation de pluie peut être activé pour tout pixel de la zone. Selon les hypothèses retenues, cette modélisation ne nécessite que la connaissance de la rétention J , qui caractérise la fonction de production. Les simulations sont effectuées pour différentes valeurs de J . Pour les bassins versants jaugés, nous pouvons activer la règle d'agglomération des pixels pour estimer les quantiles de débit de pointe de crue et les quantiles des débits journaliers. Une valeur unique de J est alors identifiée pour chacun des bassins ; cette valeur minimise les écarts entre les quantiles de débits déduits des chroniques d'observation et les quantiles de débits issus des simulations.

Les valeurs de J de chaque bassin versant sont présentées figure 12 (p. 107). Avec ces valeurs, les quantiles de débits sont correctement estimés (figure 13, p. 107 et tableau 1).

La phase de régionalisation consiste à essayer de mettre en évidence des liaisons entre les valeurs de J et des variables *a priori* explicatives. Trois sources d'information ont été exploitées :

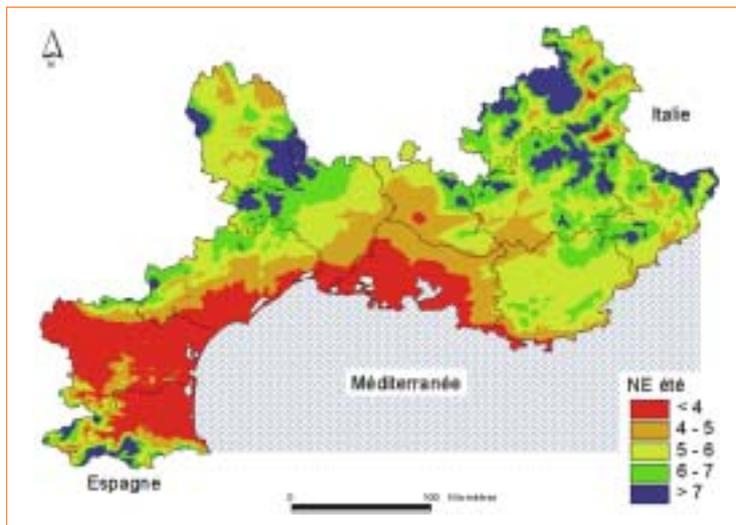
- l'occupation de l'espace tel que disponible dans la base CORINE LAND COVER. Onze classes sont distinguées. Toutefois cinq classes représentent l'essentiel des surfaces ; ce sont les zones urbaines et péri-urbaines, les zones agricoles cultivées, les zones à végétation arbustive ou herbacée, les zones forestières et les zones dégradées sans ou avec peu de végétation ;

- l'atlas des eaux souterraines de la France (BRGM, 1970), qui propose une classification en douze classes des terrains selon leur caractéristique aquifère ;

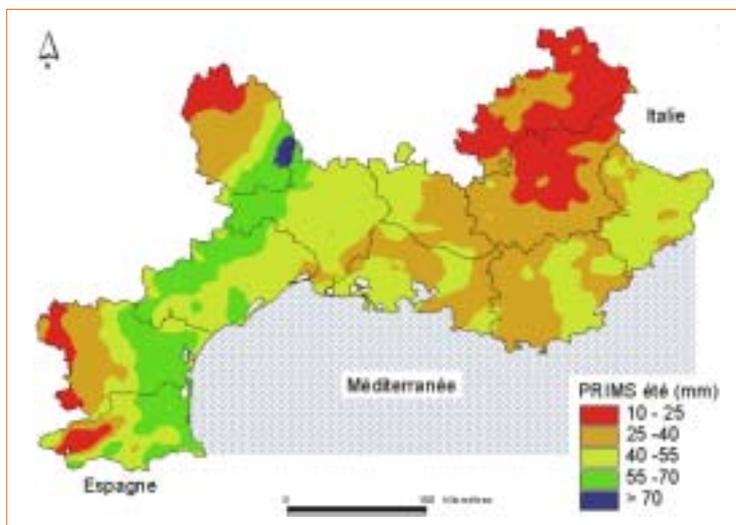
- la base de données altimétriques.

Malgré de réels efforts, cette phase de régionalisation s'est avérée assez décevante. Les coefficients de Nash établis entre les valeurs de J « hydrologique » et celle calculées sur la base d'information géographique n'excèdent pas 30 %. Ce point sera commenté dans le dernier chapitre. Notons simplement que ce genre de constat est

▼ Figure 7 – Cartographie du paramètre N_e pour la saison été.



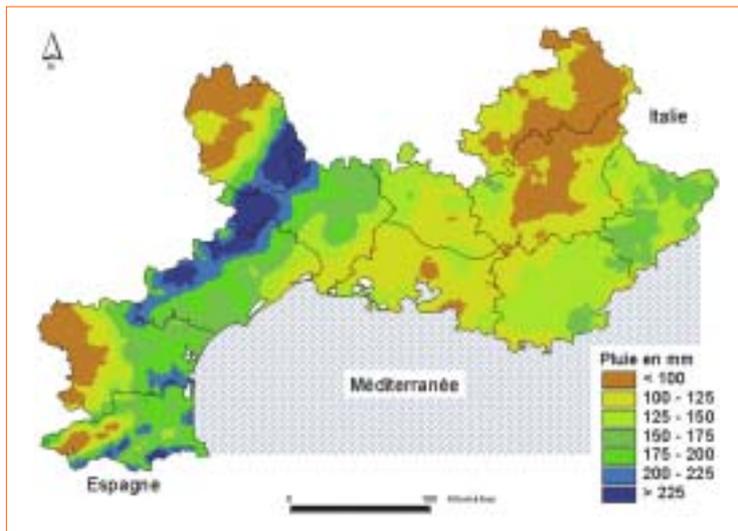
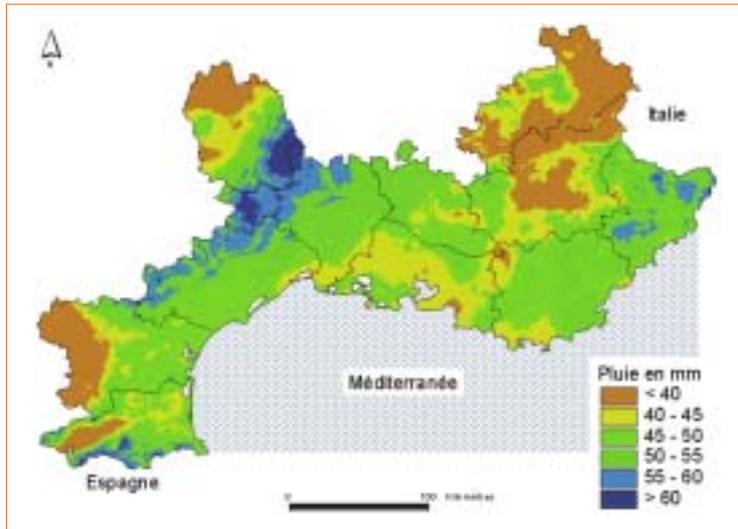
▼ Figure 8 – Cartographie du paramètre PRIMS pour la saison été.



	Période de retour	Hiver	Été
Débit de pointe pseudospécifique (débit (m ³ /s) / Superficie (km ²))	2 ans	91	90
	5 ans	88	90
	10 ans	86	91
Lame journalière (mm)	2 ans	86	81
	5 ans	90	92
	10 ans	92	93

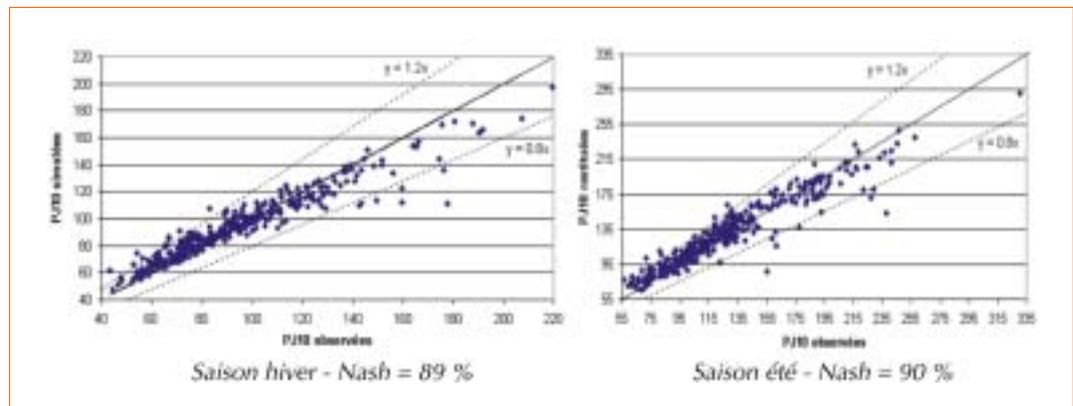
◀ Tableau 1 – Coefficient de Nash en % entre les quantiles de débits déduits des chroniques d'observations et des simulations.

▼ Figure 9 – Cartographie des pluies horaires de fréquence décennale.



▲ Figure 10 – Cartographie des pluies journalières de fréquence décennale.

► Figure 11 – Comparaison des quantiles décennaux des pluies journalières PJ10.



toutefois assez souvent rencontré dans les études de régionalisation, qui se heurtent à des difficultés pour mettre en relation les variables hydrologiques avec des caractéristiques physiques des bassins versants.

Malgré les faibles pourcentages d'explication, une grille des valeurs de J (au km²) a été construite pour chacune des deux saisons.

Il est alors possible de mettre en oeuvre le modèle de simulation des débits pour chaque maille et d'en déduire, une cartographie pixelisée des débits de pointe et des débits moyens en 1, 2... 72 heures et ceci dans une large plage de fréquence (ici limité à des périodes de retour entre 2 et 100 ans). Deux cartographies sont présentées à titre d'illustration, figure 14 (p. 108), pour les quantiles annuels qui sont calculés par multiplication des deux lois saisonnières.

Contrôle des performances du modèle régional

La figure 15 (p. 109) compare les quantiles décennaux des débits de pointe de crue et des débits journaliers, estimés par la méthode régionale. Le coefficient de Nash est de 86 % pour les débits de pointe de crue et de 87 % pour les débits journaliers. Ces valeurs élevées rendent compte que la pluie (implicitement prise en compte dans les modélisations) reste un indicateur privilégié pour les études régionales. Malgré ces valeurs élevées, on remarque une tendance assez marquée à la surestimation des débits obtenus par simulation notamment pour les valeurs faibles de débits. Cette tendance à la surestimation est visible figure 16 (p. 109). Dans 25 % des cas, la surestimation des quantiles décennaux de débit, atteint un ratio de 2 et peut atteindre des valeurs

Encadré 1

Le coefficient de Nash

Le coefficient de Nash est d'utilisation courante par les hydrologues pour apprécier la pertinence des résultats de modélisation. Il renseigne sur les écarts entre les valeurs calculées par le modèle et les valeurs observées. Il s'écrit :

$$\text{Nash} = 100 \left[1 - \frac{\sum_i (Q_{\text{obs},i} - Q_{\text{cal},i})^2}{\sum_i (Q_{\text{obs},i} - \bar{Q}_{\text{obs}})^2} \right]$$

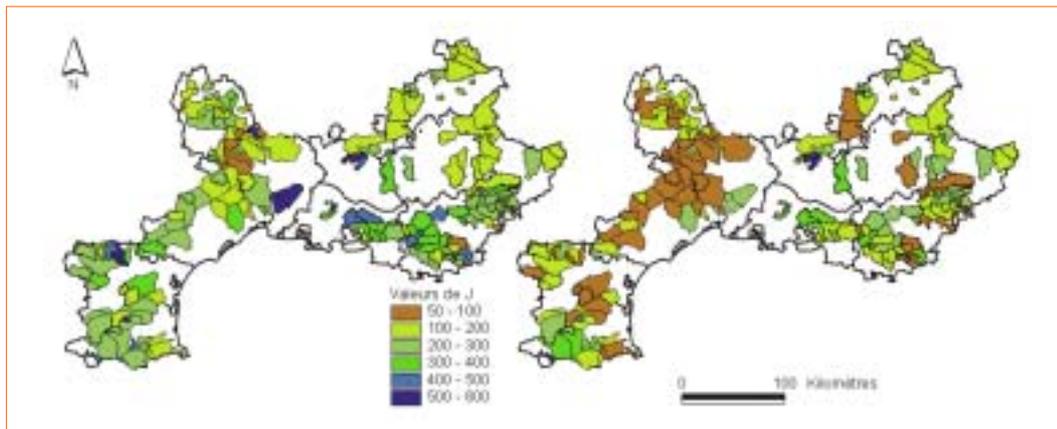
$Q_{\text{cal},i}$: valeur calculée,

$Q_{\text{obs},i}$: valeur observée,

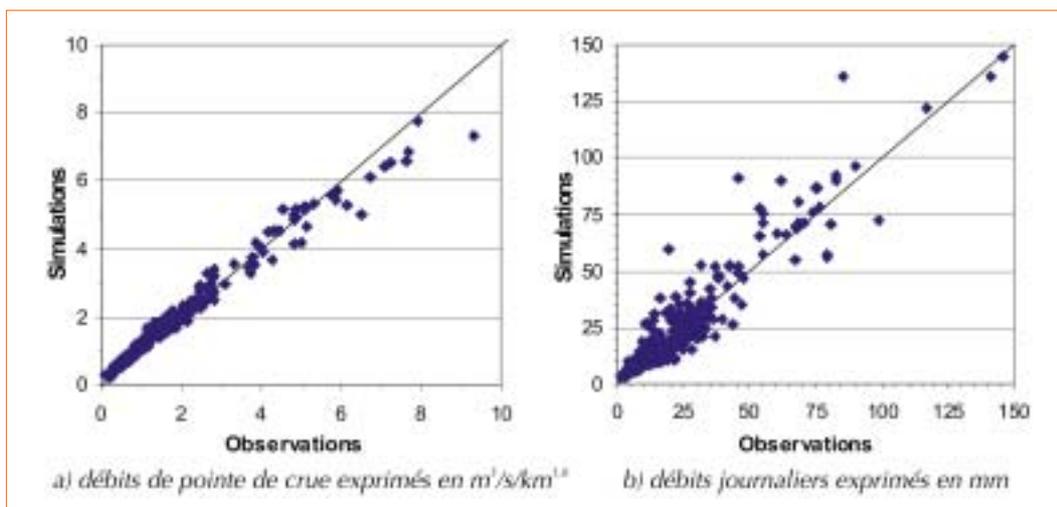
Q_{obs} : moyenne des valeurs observées ($i = 1$ à n).

Le coefficient de Nash varie entre $-\infty$ et 100. Si le modèle est parfait, tous les i valeurs calculées sont égales aux i valeurs observées. Le coefficient de Nash est égal à 100.

Un fort écart entre les valeurs calculées et les valeurs observées se traduit par un coefficient de Nash nettement inférieur à 100. Un modèle qui affecterait à toutes les valeurs calculées, la moyenne des valeurs observées, présenterait un coefficient de Nash de zéro.

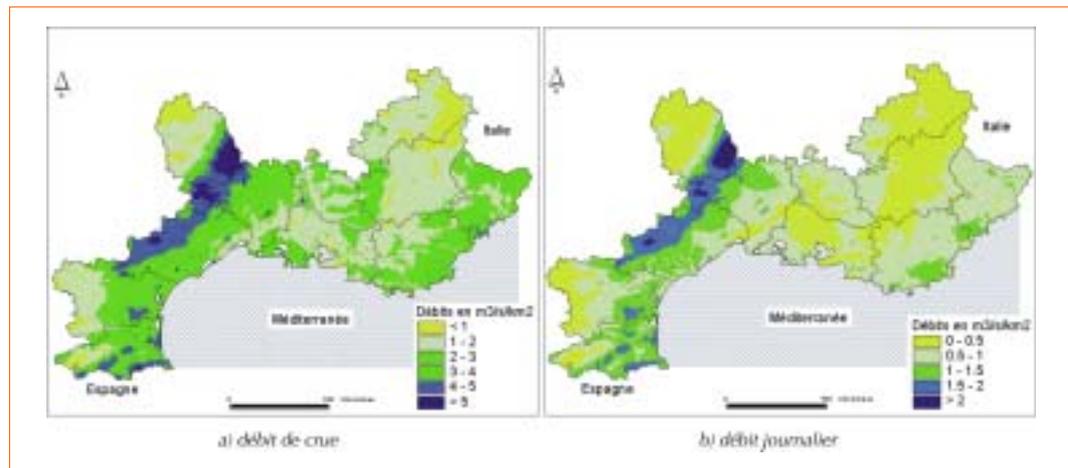


◀ Figure 12 – Cartographie des paramètres J des bassins versants jaugés.



◀ Figure 13 – Comparaison des quantiles décennaux de débits. Saison été.

► Figure 14 –
Cartographie des
quantiles décennaux
des débits pixélisés.



plus importantes pour certains bassins versants, généralement de type karstique.

Le tableau 2 dans lequel sont reportées les proportions de bassins versants dont les quantiles sont compris entre une borne inférieure et une borne supérieure, donne une idée de l'incertitude de la méthode. Dans 75 % des cas, l'estimation régionale est comprise dans la fourchette du double et de la moitié de la valeur déduite de l'observation.

Discussions et perspectives d'évolution

Les objectifs fixés à l'étude ont été atteints : la méthode permet une estimation des quantiles de débit de crue de toutes durées, dans une large plage de fréquence, en tout point du réseau hydrographique de la zone méditerranéenne française. Aux lieu et place des simples approches statistiques qui supportent généralement les études de synthèse, nous avons opté pour une méthodologie qui associe une modélisation de la pluie et une transformation de la pluie en débit.

L'intérêt à nos yeux de la méthode est d'obtenir, dans une démarche unique, une estimation de tous les quantiles de débit. Nous nous sommes ici limités à une extrapolation centennale mais la méthode peut être utilisée pour la détermination des quantiles de fréquence exceptionnelle. La méthode valorise les bases de données hydroclimatologiques et s'appuie sur des critères physiques : relief, occupation de l'espace... pour proposer une formulation régionale.

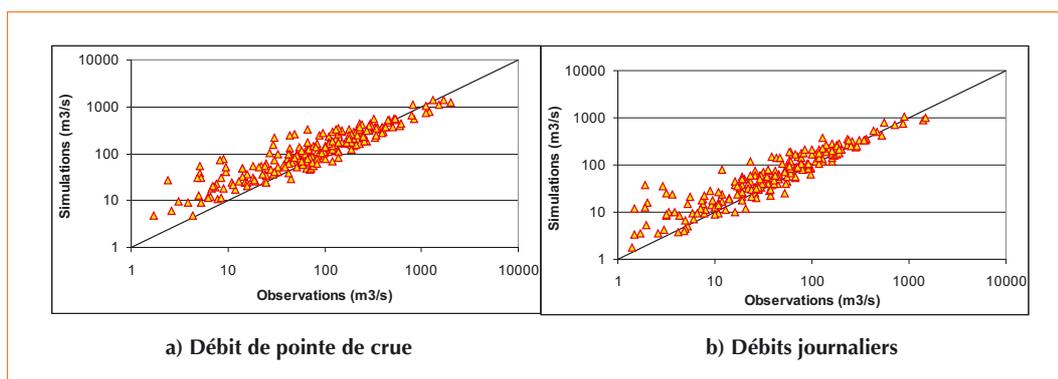
Cependant la méthode reste une approche régionale avec ses avantages et ses inconvénients. Et, en tout état de cause, elle ne doit pas se substituer à une étude hydrologique locale, seule susceptible de prendre en compte les spécificités hydrologiques propres du bassin versant.

Afin de limiter les incertitudes de la méthode, les priorités dans nos perspectives de développement porteront sur la régionalisation du paramètre J de la fonction de production, et sur la formulation de la fonction de transfert statistique.

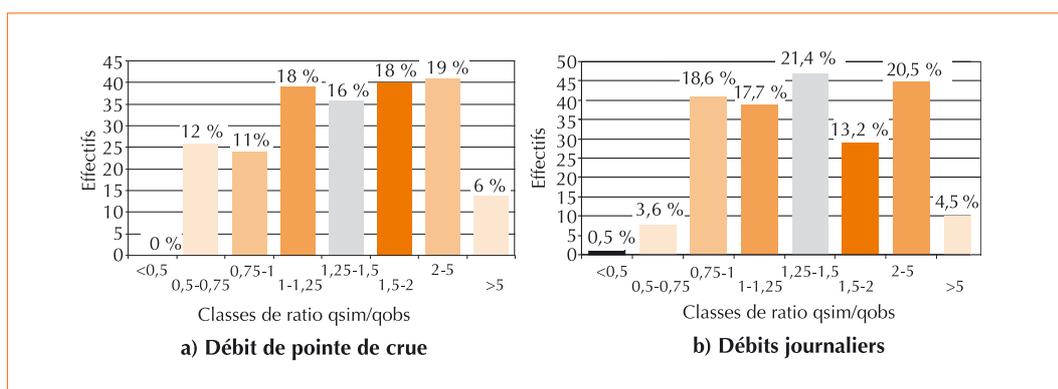
Améliorer la connaissance régionale de J n'est pas *a priori* une opération facile. Il apparaît que nous pourrions présenter une cartographie de J qui respecte plus fidèlement les valeurs locales des bassins versants. Ce type d'approche forcée améliorerait les estimations des quantiles, sans toutefois être obligatoirement pertinente pour les bassins versants non jaugés. Il ne nous semble pas que nous puissions espérer un gain significatif avec l'approche globale actuelle ; les incertitudes météorologiques sont de même ordre de grandeur que les impacts hydrologiques dus à l'occupation de l'espace et aux caractéristiques des terrains.

► Tableau 2 –
Répartition, en classe
de ratio, des écarts
entre les quantiles
issus de la
modélisation et de
ceux déduits des
chroniques
d'observation.

	Proportion de bassin versant	Ratio supérieur	Ratio inférieur
Débits de pointe décennaux	45 %	1,5	0,75
	75 %	2	0,5
	90 %	3	0,5
Débits journaliers décennaux	60 %	1,5	0,75
	75 %	2	0,5
	91 %	3	0,5



◀ Figure 15 – Comparaison des quantiles de débit décennaux obtenus à partir des chroniques observées à ceux issus de la simulation.



◀ Figure 16 – Histogrammes des ratios des quantiles décennaux simulés, qsim sur ceux obtenus à partir des chroniques d'observation, qobs.

Une hypothèse de travail consisterait à approcher au mieux le comportement hydrologique à l'échelle du pixel. Cela reste une opération relativement lourde et délicate car peu de données sont disponibles à cette échelle d'espace et il s'avère aussi nécessaire de disposer de bases de données pertinentes pour l'hydrologie, ce qui constitue en soi un vaste domaine de recherche.

La fonction de transfert statistique intègre l'abattement des pluies avec la surface et l'atténuation hydraulique des crues dans le réseau hydrographique. Dans un avenir proche, l'imagerie radar devra être utilisée pour mieux appréhender l'abattement des pluies en fonction de leurs durées et des superficies affectées. Sans descendre à des échelles d'examen très fines que nécessiteraient des études hydrauliques, la hiérarchisation du réseau hydrographique peut être un élément intéressant pour apprécier l'abattement « hydraulique » et son impact sur les débits de crue.

C'est dans ces voies de recherche que vont porter nos efforts.

Ajoutons aussi que, parallèlement à ces travaux, la méthode est en cours d'extension géographique, pour apprécier ses performances en milieu tempéré et au milieu tropical.

Des voies intéressantes semblent par ailleurs se dessiner en exploitant les bases de données spatiales générées par la méthode. Ainsi, Météo-France et le Cemagref travaillent sur une méthodologie d'alerte en temps réel du risque pluvial et du risque hydrologique. L'échelle de gravité de l'événement se déduit du croisement des bases de données de SHYREG et des champs spatiaux de pluie disponibles en temps réel grâce à l'imagerie radar. Et signalons pour terminer, la possibilité d'exploitation de ces informations fréquentielles spatiales pour la déclaration de l'état de catastrophes naturelles.

□

Remerciements

L'étude a été menée par le Cemagref qui a apporté son expertise en modélisation des pluies et des débits, Météo-France pour le traitement des informations pluviométriques et leur régionalisation et le CETE Méditerranée qui a assuré l'écriture informatique du produit final. La direction de la Prévention des Pollutions et des Risques du ministère de l'Écologie et du Développement durable a cofinancé cette étude et assuré sa coordination. Seule une étroite collaboration entre les différents acteurs publics a permis de mener à bien cette étude qui se concrétise jusqu'à sa phase de transfert vers les services de l'État dans un premier temps et devrait se poursuivre vers la communauté scientifique.

Résumé

SHYREG est une méthode développée pour la connaissance régionale des débits de crue de différentes durées et de différentes fréquences. La méthodologie utilisée associe un simulateur de pluies horaires et une modélisation simple de la pluie en débit. Les quantiles de débits se déduisent directement des distributions de fréquence des longues chroniques de débit qui peuvent être simulées. Cette information est pixélisée au km². L'estimation des quantiles de débits pour un bassin versant de la zone d'étude nécessite l'agglomération de l'information ponctuelle, ce qui nous a conduit à introduire la notion de fonction de transfert statistique (FTS). Il est ainsi possible d'estimer les débits de référence de crue en tout point du réseau hydrographique de la zone d'étude. Sur la région méditerranéenne française, l'approche régionale exploite l'information de plus de 500 postes pluviométriques et de 220 bassins versants. La méthode aboutit à une bonne restitution des quantiles de débits déduits des chroniques d'information, pour les périodes de retour comprises entre 2 et 100 ans.

Abstract

SHYREG is a method developed for the regional knowledge of the flood discharges over different durations and for different return periods. The methodology consists of a hourly rainfall generator associated with a simple rainfall - runoff modelisation. It enables the simulation of long-term discharge data sets. Frequency distribution are drawn from these simulated series, thus allowing the evaluation of the discharge quantiles. This information is mapped with a resolution of 1 km². The estimation of the discharge quantiles for a river basin requires to synthesise this continuous information. This led us to introduce the concept of a Statistical Transfer Function (FTS : Fonction de Transfert Statistique). It is then possible to give an estimation of the reference flood discharges in any point of the hydrographic network of the studied area. On the French Mediterranean Area, this regional methodology is based upon more than 500 raingauges and 220 watersheds. It leads to a good restitution of the discharge quantiles estimated from the observed series for return periods ranging between 2 and 100 years.

Bibliographie

ARNAUD, P., 1997, *Modèle de prédétermination de crues basé sur la simulation - Extension de sa zone de validité, paramétrisation horaire par l'information journalière et couplage des deux pas de temps*, thèse doct. univ. Montpellier II, 286 p.

ARNAUD, P., LAVABRE, J., MASSON, J.-M., 1999, Amélioration des performances d'un modèle stochastique de génération de hyétogrammes horaires : application au pourtour méditerranéen français, *Revue des Sciences de l'Eau*, 12/2.

ARNAUD, P., LAVABRE, J., 2000, La modélisation stochastique des pluies horaires et leur transformation en débits pour la prédétermination des crues, *Revue des Sciences de l'Eau*, 13/4, p. 441-462.

ARNAUD, P., LAVABRE, J., 2002, Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation, *Water Resource Research.*, vol. 38, n° 6, pp. 11-1,11-11.

BRGM, 1970, *Atlas des eaux souterraines de France*, Paris, Éditions BRGM.

CERNESSON, F., 1993, *Modèle simple de prédétermination des crues de fréquences courantes à rares sur petits bassins versants méditerranéens*, thèse doct. univ. Montpellier II.

CERNESSON, F., LAVABRE, J., MASSON, J.-M., 1996, Stochastic model for generating hourly hyetographs, *Atmospheric Research*, vol. 42, n°1-4.

EDIJATNO, E., MICHEL, C., 1989, Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres, *La Houille Blanche*, n°2-1989

FOUCHIER, C., LAVABRE, J., 2002, *Synthèse des débits de crue sur les régions Provence-Alpes-Côte-d'Azur et Languedoc-Roussillon. Phase II : régionalisation du modèle pluie-débit*, Convention n° 57/2000 MATE/Météo France/CETE Méditerranée/ Cemagref, 79 p.

FOUCHIER, C., LAVABRE, J., SOL, B., DESOUCHES, C., 2002, *Synthèse des débits de crue sur les régions Provence-Alpes-Côte-d'Azur et Languedoc-Roussillon. Phase I : la pluviométrie*. Convention n° 57/2000 MATE/Météo France/CETE Méditerranée/ Cemagref, 79 p.

LAVABRE, J., FOUCHIER, C., GREGORIS, Y., FAURE-SOULET, A., 2003, *Mise en œuvre d'un modèle régional pour la prédétermination des crues*, Conférences SIRNAT-forum JPRN, Les journées pour la prévention des risques naturels, Orléans, 7 p.

Météo-France, 2001, *Étude de la pluviométrie des régions Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte-d'Azur. Régionalisation des paramètres*, Rapport interne, 23 p.

Ministère de l'Agriculture, 1980, *La méthode SOCOSE : méthode sommaire d'estimation de la crue décennale sur un petit bassin versant non jaugé*, 38 p.

Ministère de l'Agriculture, 1980, *La méthode CRUPEDIX : méthode d'estimation du débit de crue de fréquence décennale sur un petit bassin versant non jaugé, à partir des précipitations et d'un paramètre régional*, 36 p.

Ministère de l'Environnement, du Territoire et de l'Environnement, 1999, *Plans de prévention des risques naturels, risque inondation. Guide méthodologique*, La Documentation Française, 119 p.

National Engineering Handbook, 1985, *Hydrology*, United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service.

NEPPEL L., BOUVIER C., LAVABRE J., 2003, *Abattement spatial des précipitations en Languedoc-Roussillon*, à paraître, 12 p.