



**HAL**  
open science

## La méthode SHYREG débit-application sur 1605 bassins versants en France métropolitaine

Y. Aubert, P. Arnaud, P. Ribstein, J.A. Fine

### ► To cite this version:

Y. Aubert, P. Arnaud, P. Ribstein, J.A. Fine. La méthode SHYREG débit-application sur 1605 bassins versants en France métropolitaine. *Hydrological Sciences Journal*, 2014, 59 (5), p. 993 - p. 1005. 10.1080/02626667.2014.902061 . hal-01059728

**HAL Id: hal-01059728**

**<https://hal.science/hal-01059728>**

Submitted on 1 Sep 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# La méthode SHYREG débit, application sur 1605 bassins versants en France Métropolitaine

YOANN AUBERT<sup>1</sup>, PATRICK ARNAUD<sup>2</sup>, PIERRE RIBSTEIN<sup>3</sup>, JEAN-ALAIN FINE<sup>1</sup>

1 HYDRIS HYDROLOGIE, 5 avenue du Grand chêne 34270 Saint Mathieu de Trévières, France, [yoann.aubert@hydris-hydrologie.fr](mailto:yoann.aubert@hydris-hydrologie.fr)

2 IRSTEA, 3275 Route Cézanne CS 40061, 13182 Aix-en-Provence cedex 5, France

3 UMR 7619 Sisyphe Université Pierre et Marie Curie (UPMC) 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05

Received 7 Novembre 2012 ; accepted 11 Juin 2013

## Résumé

La méthode SHYREG est une approche développée pour la connaissance régionale de l'aléa pluvial (SHYREG pluie) et hydrologique (SHYREG débit) en tout point du territoire français. Elle est basée sur le couplage d'un générateur stochastique de pluie horaire et d'un modèle hydrologique.

Cet article présente les résultats de la mise en œuvre de la méthode sur 1605 bassins versants répartis sur la France métropolitaine. Sur les fréquences courantes (i.e. périodes de retour inférieures à 10 ans), la méthode restitue correctement les quantiles de débit de crue ajustés à une loi statistique sur les observations. Plusieurs critères sont utilisés pour valider l'extrapolation des débits à des fréquences extrêmes: 1) en la confrontant à de longues chroniques de débits observés, 2) en analysant dans le modèle hydrologique la saturation du réservoir de production synonyme de comportement asymptotique avec les pluies et, 3) en étudiant la stabilité de la méthode à travers les critères statistiques.

**Mots clés** : SHYREG, aléa hydrologique, générateur stochastique, quantile de débit, fréquence rare

## Abstract

The SHYREG method is a flood frequency analysis method that can be applied to any location in the French metropolitan territory for flood risk management. It is based on an hourly stochastic rainfall generator coupled with a simplified distributed rainfall-runoff model.

The article aims to present the validation of flood frequency estimates estimated by SHYREG from common to extreme return periods for a wide range of 1605 French catchments. For return periods up to 10 years, the SHYREG-estimated flood frequency values are consistent with estimates from the Generalized Extreme Value law according to Nash-Sutcliffe criteria. For extreme return periods, validation is based on: 1) consistent 100-yr peak and daily discharges estimated from a 99-year flow observed record for one basin; 2) reasonable modelled saturation of the production store for extreme events; and 3) improved robustness of flood frequency estimates for various calibration periods for SHYREG compared to GEV.

**Keys words** : SHYREG, flood risk, rainfall-runoff, validation, flood frequency analysis

## L'INTRODUCTION

La prédétermination des débits de crue reste un axe de recherche important pour la conception des aménagements des cours d'eau (e.g. digues, évacuateurs de crue de barrages), le dimensionnement des ouvrages de franchissement (e.g. ponts) et la protection des populations et des biens. Cette problématique reste d'actualité au regard des crues du mois de juin 2010 (23 victimes et 2 disparus et 1.2 milliards d'euros de dégâts) et novembre 2011 (4 victimes et 800 millions d'euros de dégâts) dans le département du Var en France (Collombat, 2013, Rouzeau et al., 2010).

La France s'est dotée d'une loi en matière de protection contre les inondations qui impose aux communes d'élaborer un Plan de Prévention des Risques inondation PPRi. Les PPRi sont la base de la cartographie réglementaire des zones inondables. La crue de référence retenue dans le cadre des PPRi est définie par la crue historique ou au moins le débit centennal. La définition du débit centennal est statistique. Elle correspond à la valeur du débit de crue dépassée en moyenne une fois tous les 100 ans dont la probabilité de dépassement est de 1/100 chaque année.

Pour l'étude des débits réglementaires, les hydrologues ont recours le plus souvent à des lois statistiques issues de la théorie des valeurs extrêmes (Coles, 2001, Jenkinson, 1955). Mais ces lois ajustées aux débits observés sont peu adaptées pour l'extrapolation aux débits extrêmes (i.e. pour les périodes de retour supérieures à 10 ans) du fait de la non linéarité des processus.

En France, les chroniques de débit sont en moyenne de l'ordre de 40-50 ans, et seules quelques stations ont plus de 80 ans de données (Renard, 2006). L'hydrologue n'a pas toujours à sa disposition les données suffisantes dont il a besoin pour réaliser son étude. Pour améliorer la fiabilité de son travail il doit accroître la taille de l'échantillon. L'augmentation de la taille des échantillons de débit peut se faire par une approche régionale en regroupant les postes hydrométriques homogènes pour y ajuster une loi statistique régionale (Hosking et Wallis, 1993, Hosking et Wallis, 1997, Ribatet *et al.*, 2007). La recherche des crues historiques permet également d'enrichir la chronique des débits systématiques et d'élargir ainsi la fenêtre temporelle d'analyse. La prise en compte de cette information supplémentaire dans l'estimation des paramètres d'une loi statistique (e.g. : loi GEV) permet de réduire les incertitudes sur l'estimation des quantiles rares (Payrastra et al., 2011, Naulet et al., 2005, Neppel et al., 2011).

Une autre possibilité est de s'appuyer sur l'information des pluies afin d'extrapoler les débits. C'est le principe de la méthode du Gradex (CFGB, 1994) et de ses variantes comme le modèle AGREGEE (Margoum *et al.*, 1995) ou la méthode SPEED (Lang et Lavabre, 2007).

Depuis quelques décennies, les recherches en hydrologie se sont tournées vers des méthodes par simulation, notamment par l'utilisation de générateurs stochastiques de pluie basés sur des processus d'agrégation et par la combinaison de différentes variables aléatoires (durée, intensité, volume des averses) (LeCam, 1961). Les résultats de ces travaux montrent de bons résultats, quel que soit le pas de temps étudié (Rodriguez-Iturbe *et al.*, 1987, Blazkova et Beven, 2004, Onof *et al.*, 2000). Afin de reproduire au mieux les valeurs extrêmes, des études prennent en compte la dépendance entre certaines variables comme la durée et l'intensité des pluies à l'aide des copules (Vandenberghé *et al.*, 2011, Cantet *et al.*, 2011, De Michele et Salvadori, 2003).

C'est à ce type d'approche que s'apparente la méthode SHYREG. La méthode SHYREG est la version régionalisée de la méthode SHYPRE (Arnaud et Lavabre, 2002, Cernesson *et al.*, 1996, Arnaud, 1997, Arnaud et Lavabre, 1999). SHYPRE est l'acronyme de Simulation d'Hydrogrammes pour la PRÉdétermination des crues et SHYREG est l'acronyme de SHYpre REGionalisée.

Cet article décrit rapidement la méthode et ses hypothèses, à travers une revue bibliographique des différentes études réalisées pour sa mise en œuvre. Puis il présente les performances de la méthode appliquée à 1605 bassins versants français, ainsi qu'une réflexion sur son utilisation en extrapolation vers les fréquences rares.

## LA MÉTHODE SHYREG

La méthode SHYREG combine un générateur stochastique de pluie horaire avec un modèle pluie-débit, événementiel et régionalisé au km<sup>2</sup>. À la sortie du modèle hydrologique, on dispose d'hydrogrammes de crue sur lesquels nous analysons certaines caractéristiques (du débit horaire au débit moyen en 72h). Une estimation du débit de pointe est réalisée à partir des formes de crues générées au pas de temps horaire. Les pluies et débits maximaux de différentes durées sont extraits des événements simulés, puis classés pour construire leurs distributions de fréquence empirique. De ces distributions, on déduit les quantiles de pluie et débit de différentes durées.

### Le générateur de pluie horaire

Le principe est de décrire une chronique de pluie horaire par l'intermédiaire de différentes variables aléatoires. Ces variables sont au nombre de 8 (nombre d'événements pluvieux par an, nombre d'averses par événements, durée des averses, volumes des averses, *etc.*). Elles sont toutes associées à une loi de probabilité adaptée qui permet le tirage aléatoire de valeurs nécessaires pour la reconstruction des chroniques de pluies horaires. L'hypothèse d'indépendance des différentes variables descriptives permet le tirage des valeurs des variables indépendamment les unes des autres, et suivant un ordre lié à la description des hyétogrammes.

De plus, lorsque deux variables présentent une dépendance, celle-ci est modélisée par des copules archimédienne (Nelsen, 2006). Les copules permettent de modéliser la dépendance entre deux variables aléatoires en générant des couples de nombres aléatoires dont les valeurs reproduisent cette dépendance. La dépendance entre certaines variables a été mise en évidence et modélisée (Cantet, 2009, Cantet et al., 2011).

Initialement, le calage du générateur de pluie a été réalisé sur 217 postes horaires de référence et contrôlé sur 207 autres postes. Ce calage est effectué pour deux saisons (l'été de juin à novembre et l'hiver de décembre à mai). Ce découpage saisonnier permet de distinguer deux populations d'événements : les événements plutôt orageux, courts et intenses durant l'été et les événements plus longs et moins intenses durant l'hiver. Il est également préférable pour prendre en compte des états hydriques différents.

L'information au pas de temps horaire étant plus rare que l'information au pas de temps journalier, une paramétrisation du générateur de pluie par l'information journalière a été étudiée (Arnaud et al, 2008). Par le biais de corrélations linéaires, on arrive aisément à corrélérer les paramètres les plus importants du générateur de pluie avec des caractéristiques journalières de la pluie. D'autres paramètres sont fixés à des valeurs régionales. Sur la base de la définition d'un événement pluvieux comme étant la succession de pluies journalières de plus de 4 mm et ayant au moins une pluie journalière de plus de 20 mm, les paramètres journaliers nécessaires pour paramétrer le générateur de pluies horaires sont : le nombre moyen d'événements pluvieux par année (caractéristique d'occurrence), la moyenne des durées des événements pluvieux (caractéristique de durée) et la moyenne des pluies journalières maximales des événements pluvieux (caractéristique d'intensité).

L'intérêt de cette paramétrisation par l'information journalière est de disposer d'une information pluviométrique nettement plus dense au pas de temps journalier qu'au pas de temps horaire. De plus, cette paramétrisation est basée sur des caractéristiques moyennes qui garantissent la stabilité de la méthode face aux problèmes d'échantillonnage des observations. Ces 3 paramètres journaliers sont régionalisés sur le territoire français à la résolution du km<sup>2</sup>. Ce travail de régionalisation a été réalisé à partir de l'information extraite de 2812 postes pluviométriques disposant d'au moins 20 années de mesures sur la période 1975-2002.

Grâce à la régionalisation de ces trois paramètres, on peut mettre en œuvre le générateur stochastique de pluie en tout point du territoire français. Une centaine de simulations de 1000 ans sont réalisées, en chacun des 550 000 pixels recouvrant la France, afin d'obtenir une stabilité des quantiles de pluie de fréquence 1000 ans. On extrait des différentes simulations les caractéristiques des événements pluvieux (cumuls de pluie entre 1h et 72h). On les classe empiriquement pour déterminer des quantiles de pluie de différentes durées (Arnaud *et al.*, 2008, Arnaud et Lavabre, 2011).

A titre d'exemple, la Fig.1 (a) montre les quantiles de pluies maximales en 1h de période de retour décennale et (b) les quantiles de pluies maximales journalières de période de retour centennale, estimés au km<sup>2</sup> d'après la méthode SHYREG pluie. Ces cartes traduisent bien les différents régimes pluviographiques. En particulier, la zone des Cévennes et la partie Est de la Corse présentent les plus forts cumuls horaires et journaliers de pluie qui pour cette dernière dépassent 400 mm.

## Le couplage du générateur pluie et d'un modèle hydrologique

Le générateur de pluie est calibré pour simuler la structure temporelle de pluies ponctuelles et non de pluies de bassins qui présentent un signal plus lissé. C'est pourquoi le couplage avec un modèle hydrologique a été mené à la résolution d'un pixel kilométrique sur lequel l'abattement de la pluie peut être négligé. On génère de façon événementielle des scénarii de crue pour des bassins virtuels de 1 km<sup>2</sup> qui nous permettent d'estimer des quantiles de débit de crue spécifique.

Le modèle hydrologique (Fig.2a) est issu de la simplification du modèle GR3H (Michel, 1983), afin de pouvoir l'utiliser au pas d'espace du km<sup>2</sup> et pour faciliter sa régionalisation (Arnaud *et al.*, 2011). La pluie entrant dans le modèle transite d'abord dans un hydrogramme unitaire simple qui la répartit suivant deux pas de temps d'une heure (0.7 au premier pas de temps et 0.3 au second pas de temps) puis dans deux réservoirs. Le premier gère la production et le second le transfert.

Le premier réservoir est caractérisé par sa capacité maximale A (en mm) et son niveau de remplissage initial, S0/A, avant chaque événement. Ce réservoir assure une production non-linéaire entre la pluie qui est stockée dans ce même réservoir et la pluie qui est envoyée dans le réservoir de transfert. La carte de France de la Fig.2 (b) représente les valeurs de la taille du réservoir de production, A. Ces valeurs dépendent du type d'aquifère (karstique, aquifère de grande plaine), de l'altitude et de la pluviométrie locale (Aubert, 2012).

Le niveau de remplissage initial du réservoir de production, noté S0/A, est compris entre 0 et 1. Il est le seul paramètre saisonnier à caler de la méthode SHYREG débit.

Le deuxième réservoir assure un transfert non-linéaire : le débit sortant de ce réservoir est proportionnel à son niveau de remplissage, R, à la puissance 5. On impose une taille identique de ce réservoir sur l'ensemble des pixels (50 mm en été et 100 mm en hiver) (Graff, 2004, Arnaud *et al.*, 2011). On considère que le transfert sur 1 km<sup>2</sup> est le même sur l'ensemble du territoire. L'effet de « taille » du bassin sera pris en compte au moment de l'intégration des quantiles sur le bassin versant. Le taux de remplissage initial du réservoir de transfert, R0/B, avant chaque événement est fixé selon le débit moyen mensuel saisonnier issu de la méthode LOIEAU (Folton *et Lavabre*, 2006).

La méthode LOIEAU a été développée afin d'estimer les débits d'étiage de référence (QMNA5 et module) nécessaires à la mise en place de la Loi sur l'Eau. La méthode est basée sur la régionalisation d'un modèle hydrologique mensuel, permettant la reconstruction de chroniques de débits mensuels à partir desquelles sont extraites les grandeurs statistiques recherchées. La modélisation des débits mensuels est réalisée à l'aide des données SAFRAN de pluie, de neige, d'évapotranspiration et de température et du modèle hydrologique GR2M complété par un module de gestion du stock neigeux (Valery, 2010).

Le calage de la méthode SHYREG débit repose sur le seul paramètre saisonnier de la fonction de production, S0/A, qui devra compenser les hypothèses simplificatrices relatives aux autres paramètres (taille du réservoir de production, A, taille du réservoir B et niveau de remplissage initial de B, R0). Ces choix sont issus d'études de sensibilité du modèle à ses paramètres, qui ont montré que le paramètre de production S0/A est le paramètre le plus sensible pour la génération des crues à petite échelle, et qu'il ne peut être fixé contrairement aux autres.

Pour une valeur de S0/A donnée, la méthode SHYREG simule des événements pluvieux qui sont transformés en événement de crue sur chacun des pixels. Par simple classement des valeurs caractéristiques des différents hydrogrammes simulés, on extrait les distributions de fréquence empirique du débit de pointe et des débits moyens pour différentes durées, pour estimer les quantiles de périodes de retour de 2 à 1000 ans. Ainsi les quantiles de débit multi-durée-fréquence estimés en chaque pixel sont fonction du niveau de remplissage initial du réservoir de production, S0/A.

## L'agglomération des quantiles de débit

L'information débitométrique multi-durée-fréquence disponible au km<sup>2</sup> doit être agrégée et abattue pour déterminer le débit à l'exutoire d'un bassin. En effet, le débit à l'exutoire d'un bassin versant ne peut être la somme des quantiles de débit aux pixels. Il faut tenir compte de l'abattement des pluies et du transfert dans le réseau hydrographique (Fouchier, 2010). Les équations 1 et 2 montrent les formulations utilisées pour déterminer les quantiles de débit de différentes durées à l'exutoire de bassin versant (Aubert, 2012).

Pour les quantiles de débit de durée,  $d \geq \text{journalier}$  :

$$Q(T, d) = \left[ \frac{1}{S} \sum_{i=1}^{i=S} q^i(T, d) \right] \cdot \text{abat}_1 \text{ avec } \text{abat}_1 = \frac{1 + b_1}{1 + K_1 S^{0.5 K_1 (1-S^{-a_1})}} S \quad (1)$$

Pour les quantiles de débits de durée,  $d < \text{journalier}$  :

$$Q(T, d) = Q(T, d = \text{journalier}) + \frac{1}{S} \left[ \sum_{i=1}^{i=S} q^i(T, d) - \sum_{i=1}^{i=S} q^i(T, d = \text{journalier}) \right] \cdot \text{abat}_2 \text{ avec } \text{abat}_2 = \frac{1 + b_2}{1 + K_2 S^{0.5 K_2 (1-S^{-a_2})}} S \quad (2)$$

Avec :

- $\text{abat}_{1,2}$  les fonctions d'abattement des quantiles pour les durées supérieures ou égales à la journée et inférieures à la journée
- $q^i(T, d)$  le quantile de débit de période de retour  $T$  et de durée  $d$ , au pixel  $i$
- $Q(T, d)$  le quantile de débit de période de retour  $T$  et de durée  $d$ , à l'exutoire d'un bassin de taille  $S$
- $S$  : surface du bassin versant comprise entre 2 et 10 000 km<sup>2</sup>,
- les paramètres constants  $a_1=0.01$ ,  $b_1=0.24$ ,  $K_1=5$ ,  $a_2=0.25$ ,  $b_2=10$ ,  $K_2=0.9$

Les fonctions d'abattement ( $\text{abat}_{1,2}$ ) fournissent des coefficients compris entre 0 et 1, décroissants avec la surface. On présente sur la Fig.3 les deux fonctions d'abattement en fonction de la superficie de bassin versant (1 à 10 000 km<sup>2</sup>).

L'utilisation de deux fonctions d'abattement permet de prendre en compte deux phénomènes différents, intervenant pour des durées de débit différentes. La première fonction d'abattement déterminée pour les durées supérieures ou égales à la journée est plutôt associée à l'abattement des pluies dans le bassin versant (équation 1 et Fig.3,  $\text{abat}_1$ ), puisqu'il touche surtout le volume des crues. La seconde fonction d'abattement permet de rajouter un abattement à l'abattement déjà imposé sur les volumes. Cet abattement supplémentaire, appliqué pour les débits de courtes durées, est plutôt associé un abattement de nature hydraulique lié au transfert dans le réseau hydrographique. Cette seconde fonction tend plus vite vers 0 quand la surface du bassin augmente.

Pour déterminer les quantiles de débit à l'exutoire de bassin versant pour des durées inférieures à la journée (e.g : débit de pointe, débit moyen en 12h) l'équation 2 est utilisée (Fig.3,  $\text{abat}_2$ ).

Ainsi, pour les grands bassins (e.g >2000 km<sup>2</sup>), lorsque la fonction  $\text{abat}_2$  tend vers 0, les quantiles de débit de pointe convergent vers les quantiles de débit moyens journaliers.

Ces fonctions, dont les coefficients ont été optimisés sur l'ensemble des bassins étudiés au niveau national, permettent d'estimer, sur des bassins versants jaugés, des quantiles de débit multi-durée-fréquence à leur exutoire et pour une grande gamme de superficies. On étudie dans cet article la restitution des débits pour deux durées : le journalier et l'instantané.

## LE CALAGE DE LA MÉTHODE

### Les données hydrométriques

Le calage du modèle hydrologique consiste à déterminer la valeur du paramètre S0/A saisonnier qui permet à la méthode SHYREG de reproduire au mieux les quantiles dits « observés » de débit de pointe (Qp) et de débit moyen journalier (Qj) de période de retour 2, 5 et 10 ans sur chaque bassin versant jaugé. La banque HYDRO (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>) fournit sur l'ensemble de la France des chroniques de débit à partir desquelles les quantiles de fréquence courante sont estimés.

Les stations retenues ont au moins 10 années de mesures à la fois sur les débits de pointe et les débits moyens journaliers, pour les saisons été et hiver et correspondent à des bassins de superficie de moins de 10 000 km<sup>2</sup> (Organde *et al.*, 2013). Au final, 1605 stations hydrométriques sont utilisées et représentées sur la Fig.4 (a).

La durée moyenne des enregistrements des débits de pointe et moyens journaliers est de 32 ans Fig.4 (b). La chronique de débit où l'enregistrement est le plus important (104 ans) est la Vézère à Montignac (code hydro P4161010).

La moyenne des superficies de bassin est de 585 km<sup>2</sup> Fig.4 (b). La Garonne à Portet-sur-Garonne a la superficie la plus importante (code hydro=O1900010, S=9980 km<sup>2</sup>) et le plus petit bassin est le ruisseau du Vaubarnier à Collobrières (code hydro= Y4617810, S=1.54 km<sup>2</sup>).

Pour chaque station, chaque durée (instantanée et journalière) et chaque saison, on ajuste aux chroniques de débit observé une loi GEV (Generalized Extreme Value) à 3 paramètres à l'aide du maximum de vraisemblance (Coles, 2001) afin d'estimer les quantiles dits « observés » de fréquences courantes (T = 2, 5 et 10 ans). La borne inférieure du coefficient de forme est 0, ce qui équivaut à borner la loi GEV par une loi de Gumbel ; sa borne supérieure est 0.4, pour limiter l'influence des valeurs extrêmes.

Notons cependant que cet ajustement n'est pas utilisé en extrapolation (c'est-à-dire pour des périodes de retour supérieures à 10 ans).

### Le principe du calage du modèle pluie-débit

Le calage du modèle consiste à déterminer la valeur du paramètre saisonnier S0/A qui permet de maximiser le critère de Nash-Sutcliffe (équation 3) (Nash et Sutcliffe, 1970). Pour chaque saison, le critère de performance est estimé à partir des 6 quantiles de débit SHYREG (Qshyreg) en comparaison aux quantiles « observés » issus de l'ajustement de la loi GEV (Qgev) pour les débits de pointe et moyens journaliers de période de retour 2, 5 et 10 ans.

$$\text{Nash - Sutcliffe} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=6} (Q_{\text{gev}_i} - Q_{\text{shyreg}_i})^2}{\sum_{i=1}^{i=6} (Q_{\text{gev}_i} - \bar{Q}_{\text{gev}})^2} \quad (3)$$

Dans cette équation, les quantiles de débit SHYREG sont déterminés en utilisant les paramètres du générateur stochastique de pluie horaire variables à chaque km<sup>2</sup> et le modèle pluie-débit avec une valeur de S0/A identique pour l'ensemble des pixels contenus dans le bassin versant. Dans un premier temps, on fait l'hypothèse que ce paramètre de production S0/A est moyen pour le bassin versant et ne présente pas de variabilité spatiale au sein du bassin.

Pour un bassin, lorsque l'optimum du critère de Nash-Sutcliffe est obtenu pour une valeur de S0/A proche de 0, cela signifie que le bassin a un état hydrique très sec au début de chaque événement pluvieux simulé. Au contraire, lorsque l'optimum du critère de Nash-Sutcliffe est obtenu pour une valeur de S0/A proche de 1, le bassin est considéré comme saturé au début de chaque événement pluvieux simulé.

### **L'analyse du paramètre hydrologique optimisé (S0/A)**

Sur les 1605 bassins versants est déterminée la valeur du paramètre saisonnier S0/A qui maximise les critères de Nash-Sutcliffe entre les quantiles SHYREG débits et les quantiles de débit issus d'un ajustement de loi GEV sur les débits observés (équation 3) pour les périodes de retour 2, 5 et 10 ans. On représente sur la Fig.5 (a) la répartition spatiale du paramètre pluie-débit S0/A pour la saison hiver et sur la Fig.5 (b) les distributions de fréquence des paramètres pluie-débit S0/A pour l'hiver et l'été.

On observe sur la Fig.5 (a) des zones homogènes en terme de paramétrisation du modèle hydrologique : des fortes valeurs de S0/A ( $S0/A > 0.9$ ) pour la partie centrale des Pyrénées, les Alpes du Nord, le ballon d'Alsace et la Vendée, et des faibles valeurs de S0/A ( $S0/A < 0.2$ ) dans les régions de l'Île de France, Picardie et Haute Normandie. On observe ainsi des zones plus ou moins productives lors des crues.

Sur la Fig.5 (b) on remarque que le niveau de remplissage du réservoir de production est plus fort pour la saison hiver. Cela traduit une saturation plus marquée des sols pour cette saison. Cependant, nous avons noté pour les régions montagneuses des valeurs de S0/A plus importantes en été qu'en hiver. Ces bassins sont plus productifs l'été que l'hiver. Cette production plus importante peut s'expliquer par la fonte du manteau neigeux durant l'été.

Les résultats du calage du paramètre du modèle pluie-débit pour la saison hiver montre une émergence de tendance régionale avec notamment des faibles valeurs sur le nord de la France et des fortes valeurs sur les bassins situés en zones montagneuses. Ces résultats permettent de voir que le paramètre à une certaine cohérence hydrologique et spatiale nécessaire pour pouvoir le régionaliser.

Une dizaine de stations présentent des valeurs de S0/A proches d'une des bornes du modèle (i.e.  $S0/A=0$  ou  $S0/A=1$ ). Dans le paragraphe suivant, on analysera ces bassins où le paramètre pluie-débit est proche d'une des bornes du modèle.

## L'estimation des quantiles de débit courant

Pour chacune des 1605 stations et pour chaque saison, un critère de Nash-Sutcliffe est calculé pour les six quantiles de débit de fréquence courante (équation 3). Sur la Fig 6 (a) on représente la répartition spatiale du critère de Nash-Sutcliffe pour la saison hiver. La Fig 6 (b) donne les distributions de fréquence du critère de Nash-Sutcliffe suivant trois gammes de superficie de bassin (petites, moyennes et grandes superficies) afin de montrer l'applicabilité de la méthode sur des tailles de bassin diverses.

L'examen de la Fig 6 (a) montre que la méthode reproduit correctement les quantiles de débit courant déterminés par une loi GEV (i.e. les débits de pointe et journaliers de période de retour 2, 5 et 10 ans). Ce constat est encourageant pour une méthode calée par un seul paramètre, car l'échantillon de bassins est très hétérogène. En effet, on trouve des bassins à influence méditerranéenne comme l'Hérault et le Vidourle, des bassins à influence pluvio-nivale comme la Durance, l'Ubaye, le Buech et les Gaves ou encore des bassins où la nappe réagit avec la rivière comme la Somme et l'Essonne.

Cependant, on note des régions où le critère de Nash-Sutcliffe est inférieur à 50%. La première zone correspond au Bassin Parisien ainsi que la Seine-Maritime, l'Eure et le Calvados. La seconde zone est située sur la façade Est de la France avec le Doubs et le Jura. Sur ces deux zones, les bassins sont situés sur des aquifères karstiques.

Le fonctionnement karstique est difficile à reproduire par un modèle hydrologique car son comportement se situe entre les écoulements de surface et les échanges souterrains. On ne trouve pas de superpositions des zones saturées et non saturées telles qu'on les observe dans les aquifères classiques (Bakalowicz, 2008). Le fonctionnement karstique est complexe, les systèmes de surface peuvent échanger de l'eau avec les bassins versants voisins par l'intermédiaire d'écoulements localisés (Le Moine *et al.*, 2008). Suivant le bassin que l'on étudie, on peut avoir des pertes en eau ou des apports. La dynamique du bassin s'en trouve bouleversée et les frontières topographiques ne sont plus respectées.

Or dans l'approche SHYREG débit, comme l'abattement des quantiles est fonction de la superficie topographique du bassin versant, il est alors difficile d'appliquer la méthode sans connaissance de la surface réelle de la zone alimentant le karst. Pour ces bassins particuliers, une étude hydrologique approfondie est alors nécessaire pour déterminer leur superficie réelle d'alimentation mais aussi aborder une modélisation hydrologique différente.

Sur la Fig 6 (b), on a tracé les distributions de fréquence du critère de Nash-Sutcliffe pour 3 gammes de superficies et pour chaque saison (été et hiver). On observe que la méthode reproduit mieux les quantiles « observés » pour les plus grands bassins versants : plus de 80% de l'échantillon a un critère de Nash-Sutcliffe supérieur à 80%. Pour les deux autres gammes de superficies seulement 60% des échantillons de bassins ont un critère de Nash-Sutcliffe supérieur à 80%. Les résultats ne montrent pas de différence entre les saisons. La méthode arrive bien à reproduire les quantiles de débit quelles que soient la position géographique et la superficie du bassin notamment grâce à une bonne optimisation des fonctions de production et d'abattement, mais également grâce à une bonne représentation de la variabilité de la pluie apportée par la base SHYREG pluie. En effet, la base de pluie SHYREG reproduit bien toutes les pluies sous différents climats (méditerranéen, alpin, continental, océanique) grâce à une bonne appréhension des phénomènes observés et leur modélisation adéquate (Arnaud et Lavabre, 2011). Ce point est important car la méthode s'appuie sur l'information pluviométrique pour extrapoler les débits.

## LA DISCUSSION SUR L'APPLICABILITÉ DE LA MÉTHODE AUX FRÉQUENCES RARES

La méthode fournit, sur l'ensemble des bassins, des quantiles de débit multi-durée pour les fréquences courantes (jusqu'à 10 ans) et les fréquences rares (50 et 100 ans) à extrêmes (1000 ans). Les résultats pour les fréquences courantes sont positifs et montrent que la méthode est capable de se caler avec un seul paramètre pour restituer les quantiles courants de différentes durées. Sur plus de 1200 bassins versants, les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe sont supérieures à 80%. La qualité d'estimation des quantiles de débit de fréquence rare est analysée dans cette partie. Dans le cas particulier de l'extrapolation des débits, à des fréquences où il existe peu d'information, trois critères sont étudiés afin de juger du comportement de la méthode vers ces périodes de retour :

- la confrontation à une chronique de débit observé
- l'étude de la saturation du modèle hydrologique
- la stabilité de la méthode SHYREG débit

### La confrontation à une chronique de débit observé de 99 ans

En moyenne, les chroniques de débit moyen journalier et de pointe observés ne dépassent pas les 50 ans. Seuls quelques bassins versants ont plus de 90 ans d'observations.

C'est le cas du bassin versant du Gave d'Ossau à Oloron-Sainte-Marie (488 km<sup>2</sup>) situé dans les Pyrénées Atlantiques pour lequel on dispose de débits observés remontant jusqu'en 1912, soit 99 ans d'observations. Plus de la moitié du bassin versant est à une altitude supérieure à 1464 m et présente de fortes pentes (la pente moyenne est de 20%). Le Gave a un régime hydrologique de type pluvio-nival avec 26% de l'écoulement annuel qui résulte de la fonte de neige (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>). Le débit de pointe maximum de la chronique est de 360 m<sup>3</sup>/s enregistré le 28 novembre 1974.

Sur la Fig 7 on compare l'extrapolation des débits pour les fréquences rares par la méthode SHYREG débit avec un ajustement de loi statistique (loi GEV). Pour les distributions de débit instantané, les quantiles de débit SHYREG s'ajustent bien au corps de la distribution empirique jusqu'à la période de retour 100 ans (Fig 7). Les quantiles issus de la loi GEV (314 m<sup>3</sup>/s pour T=100 ans) restent en dessous des quantiles SHYREG (410 m<sup>3</sup>/s pour T=100 ans). Au final, la méthode attribue au débit de pointe du plus fort événement (28 novembre 1974) une fréquence de 100 ans.

Bien que cela ne soit qu'un exemple sur une station, on voit que le comportement de l'extrapolation de l'approche SHYREG débit conduit généralement à une extrapolation hyper-exponentielle. Ce comportement est lié à la saturation progressive du modèle hydrologique vers les fréquences rares qui conduit à un comportement progressivement asymptotique à la distribution des pluies. Cependant ce comportement n'est pas lié à des hypothèses fréquentielles comme la méthode du Gradex (Lang et Lavabre, 2007) mais à la saturation des réservoirs servant à modéliser la relation pluie-débit. C'est ce point que l'on va étudier dans le paragraphe suivant.

## L'étude de la saturation du modèle hydrologique

Pour l'étude des fréquences rares à extrêmes, nous nous sommes intéressés à la saturation du modèle pluie-débit. L'objectif de cette étude est de déterminer pour quelle période de retour le modèle atteint la saturation, synonyme d'un comportement asymptotique à celui des pluies. Pour cela, on analyse la saturation du réservoir de production, A.

Le réservoir de production a une capacité plus importante que le réservoir de transfert dont la capacité au pixel est fixée à 50 mm en été et 100 mm en hiver. Ce dernier, en plus d'avoir une capacité plus faible, est déjà rempli en fonction du débit de base issu de la méthode LOIEAU. Le rôle de ce réservoir étant de modéliser le transfert, il se vidange rapidement ne lui permettant pas de retenir longtemps l'eau.

On examine donc uniquement à la saturation du réservoir A (Fig 2 (a)) dont la valeur au pixel a été imposée en fonction de l'hydrogéologie, de la pluviométrie locale et de l'altitude (Fig 2 (b)) (Aubert, 2012). Pour chaque événement que l'on simule via le générateur de pluie, on obtient, à la fin de l'événement, le niveau dans le réservoir A, noté Sf. On dispose alors de la distribution de fréquence de la variable Sf/A sur chaque pixel constituant le bassin. On détermine le taux final Sf/A pour un bassin, en calculant la moyenne des quantiles Sf/A présents dans le bassin pour une période de retour T donnée.

On considère que lorsque Sf/A atteint 90%, le bassin arrive à saturation. En effet lorsque Sf/A atteint ce seuil de 90%, 81% de la pluie entrante dans le modèle passe directement vers le réservoir de transfert (la quantité de pluie P transférée est de  $(Sf/A)^2 \cdot P = 0,81 \cdot P$ ).

Pour chaque période de retour et pour les deux saisons est calculée le nombre de bassins versants qui atteignent la saturation (i.e. Sf/A moyen du bassin supérieur à 90%). La Fig 8 représente les distributions de fréquence du pourcentage de bassins versants arrivant à saturation.

Le pourcentage de bassins atteignant la saturation augmente avec la période de retour. Ce résultat est logique puisque les événements pluvieux simulés sont de plus en plus forts en termes de cumul de pluie et d'intensité, ce qui entraîne une saturation progressive du réservoir A. Pour la période de retour 1000 ans, 90% de l'échantillon de bassins a atteint la saturation quelle que soit la saison.

Ces résultats sont un peu différents de ceux proposés par la méthode du Gradex fréquemment utilisée en France (Lang et Lavabre, 2007), puisqu'elle préconise une saturation complète du bassin entre les périodes de retour 10 ans et 50 ans. Or entre ces deux périodes de retour seulement un tiers et la moitié de l'échantillon de bassin ont atteint la saturation (Fig 8).

Sur la Fig 9 est représentée, la répartition spatiale de Sf/A pour la période de retour 1000 ans. Cette carte montre que la majorité des bassins ont atteint la saturation et que seuls les bassins versants de l'Ile de France, la Picardie, la Champagne Ardenne et l'Haute Normandie n'atteignent pas la saturation : Sf/A reste inférieur à 90% pour la période de retour 1000 ans. Ces bassins sont difficilement saturables. Pour les Cévennes, les Pyrénées-Orientales et le ballon d'Alsace, Sf/A atteint 100% pour T=1000 ans.

## La stabilité de la méthode SHYREG

Dans cette partie est analysée la stabilité du modèle SHYREG en extrapolation selon la méthodologie développée dans le cadre du projet EXTRAFLO (<https://extraflo.cemagref.fr>) La stabilité est définie comme la capacité d'une méthode à fournir des estimations de quantiles de débit à des fréquences rares et extrêmes qui sont peu sensibles au nombre d'années d'observations servant au calage de la méthode. La stabilité est étudiée à travers le critère  $SPAN_T$  (Garavaglia et al., 2011, Renard et al., 2013).

Les chroniques des débits observés qui disposent de 40 ans d'observation (soit 432 stations hydrométriques) sont découpées en deux périodes de 20 ans, notée C1 et C2. On cale la méthode SHYREG et la loi GEV sur ces deux périodes de calage. L'écart relatif,  $SPAN_T$ , entre les quantiles issus des deux calages pour les périodes de retour 10, 100 et 1000 ans est estimé suivant l'équation 4 :

$$SPAN_T = 2 \cdot \frac{|Q(C2, T) - Q(C1, T)|}{Q(C2, T) + Q(C1, T)} \quad (4)$$

Avec :

$-Q(C_i, T)$  le quantile de débit de pointe de période de retour  $T=10, 100$  et  $1000$  ans estimé avec l'échantillon  $i=1$  ou  $2$ .

Pour chaque station hydrométrique et chaque période de retour, on détermine le critère  $SPAN_T$  pour la méthode SHYREG et pour l'ajustement statistique GEV. Lorsque le critère  $SPAN_T$  est nul, cela signifie que la méthode fournit la même valeur du quantile pour les deux périodes de calibration. Inversement lorsque  $SPAN_T$  devient très grand, la méthode étudiée n'est pas robuste car jugée trop sensible à la période de calibration utilisée.

On classe les valeurs du critère  $SPAN_T$  de façon à comparer les distributions de fréquence pour les deux méthodes SHYREG et GEV. La méthode la plus robuste est celle qui présente la courbe la plus proche de l'axe des abscisses. La Fig 10 présente les distributions de fréquence du critère  $SPAN_T$  pour les périodes de retour 10, 100 et 1000 ans pour la méthode SHYREG et la distribution GEV pour les durées instantanées.

La comparaison des distributions en Fig 10 montre que la méthode SHYREG a de meilleurs scores  $SPAN_T$  que la loi GEV pour l'ensemble des périodes de retour et qu'elle est donc moins sensible aux périodes de calage. Elle estime les quantiles de débit décennaux, centennaux et millenaires avec un écart de moins de 20% sur près de 80% des stations hydrométriques, entre deux calages de 20 ans. Alors que cet écart moyen est respectivement de 25%, 45% et 80 % pour les périodes de retour de 10, 100 et 1000 ans avec la loi GEV.

Les distributions du critère  $SPAN_T$  restent proches pour les 3 périodes de retour avec la méthode SHYREG alors qu'avec une loi GEV les écarts augmentent nettement avec la période de retour.

## LA CONCLUSION ET LES PERSPECTIVES

La méthode SHYREG permet de disposer de quantiles de débit de crue multi-durée-fréquence grâce au calage d'un seul paramètre saisonnier,  $S0/A$ , dans le modèle pluie-débit. Ce calage saisonnier permet de tenir compte d'un état hydrique moyen du bassin versant et d'une pluviométrie variables avec la saison.

Sur la plupart des types de bassins versants rencontrés en France (méditerranéens, pluvio-nivaux et influencés par les nappes) la méthode SHYREG débit a reproduit correctement les quantiles de débit de crue de pointe et moyens journaliers pour les périodes de retour 2, 5 et 10 ans. Ces résultats ne dépendent ni de la saison ni de la taille des bassins.

Pour juger du comportement de la méthode sur les fréquences rares et extrêmes où le nombre d'observations est limité, une méthodologie multicritère a été mise en œuvre. On conclut :

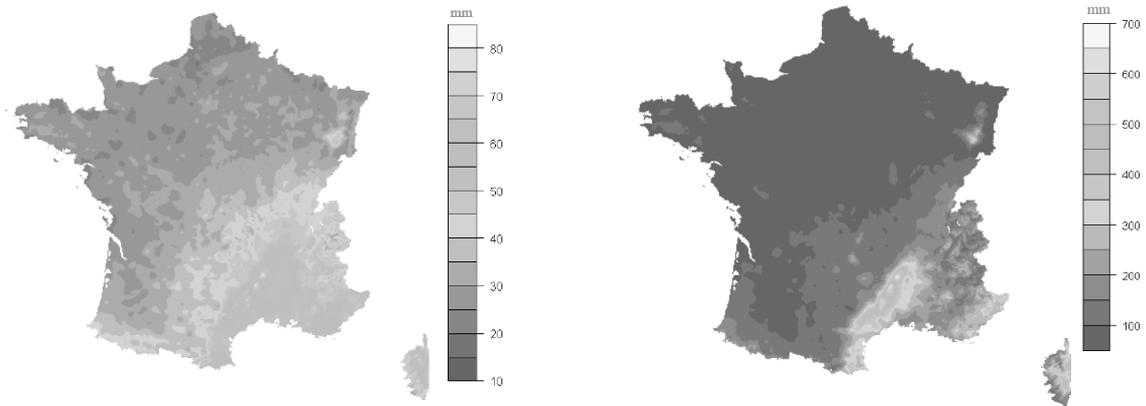
- à une bonne adéquation entre les débits observés et les quantiles de débit SHYREG pour les périodes de retour 50 et 100 ans dans le cas d'une longue chronique de débit observé (exemple du Gave d'Ossau),
- à une saturation progressive du réservoir de production dans le modèle pluie-débit montrant un comportement asymptotique vis-à-vis des pluies,
- à une stabilité de la méthode dans l'estimation des quantiles de fréquences courantes à rares,
- à une meilleure stabilité qu'un ajustement statistique GEV sur les débits observés,

Cependant, la mise en place de la méthode est limitée lorsque l'on travaille sur des bassins karstiques. L'abattement des quantiles de débit se basant sur la superficie topographique et non pas sur l'aire d'alimentation du karst, les résultats peuvent diverger des observations (e.g : les bassins de la Loue, du Doubs et du Commerce). Une des perspectives serait d'étudier ces zones de façon plus précise en délimitant les aires d'alimentation du karst mais aussi d'avoir une modélisation hydrologique différente.

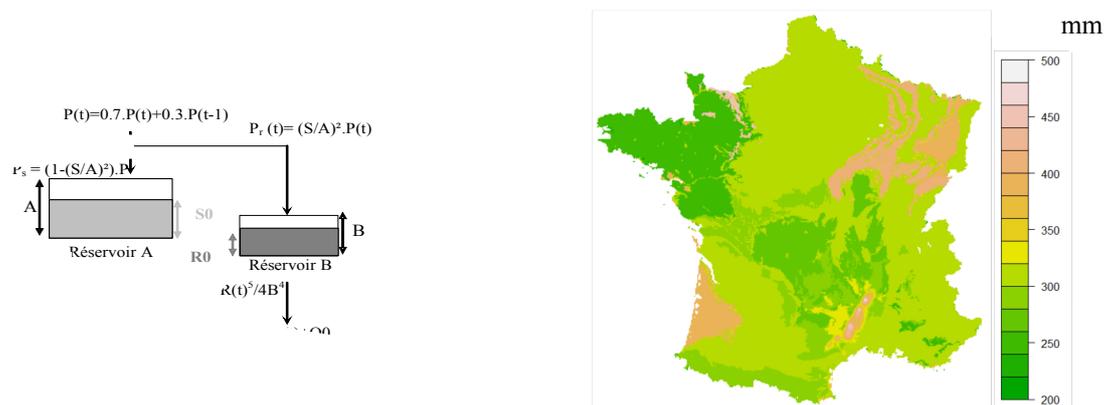
La méthode ne prend pas en compte la présence d'ouvrages hydrauliques ou le laminage des crues spécifiques à certains bassins versants. Il faudrait alors recenser l'ensemble de ces ouvrages afin de distinguer ceux qui servent à l'appui des étiages (le barrage de Serre-Ponçon sur la Durance) ou bien à l'écrêtement des crues (les barrages écrêteurs de crue sur le Vidourle, le Gardon et la Cèze).

Pour une application régionale de la méthode SHYREG débit, le seul paramètre saisonnier du modèle pluie-débit a été régionalisé (Organde *et al.*, 2013). Ainsi en activant le générateur stochastique de pluie couplé au modèle hydrologique, on peut produire des cartes de quantiles de débit multi-durée-fréquence sur tout le territoire français et avoir une connaissance hydrologique sur des bassins non-jaugés avec la même méthode.

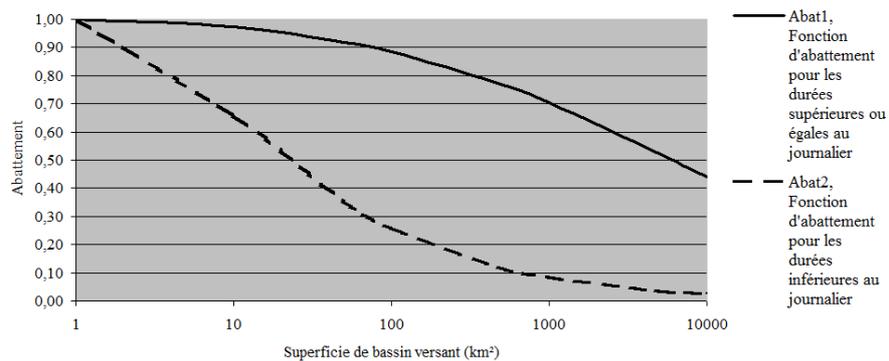
## RÉFÉRENCES



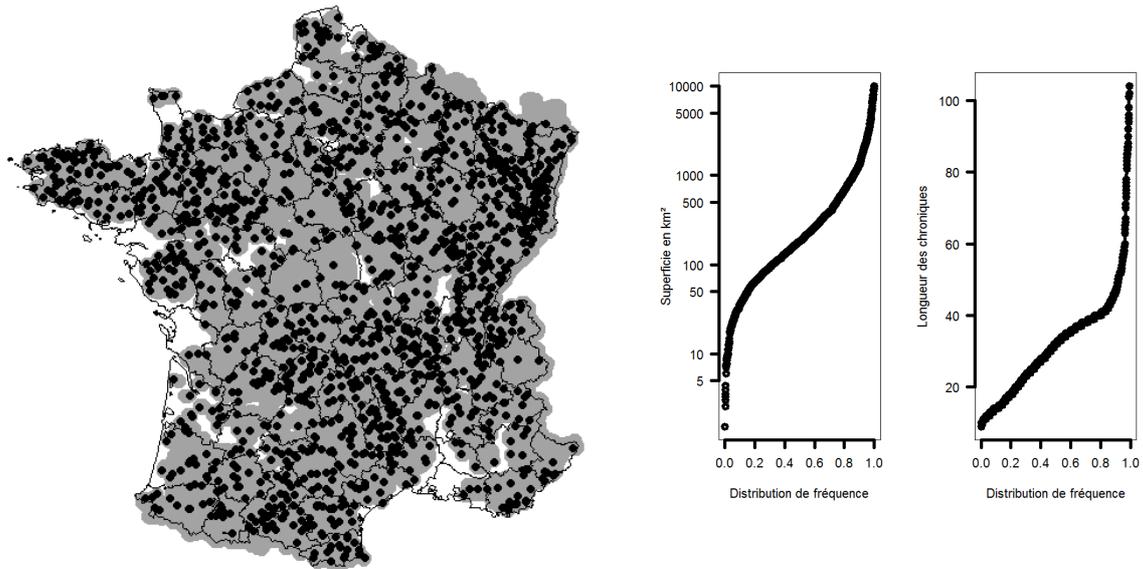
**Fig. 1** (a) carte de France du quantile de pluie décennal de cumul 1h et (b) carte de France du quantile de pluie journalier centennal avec la méthode SHYREG pluie



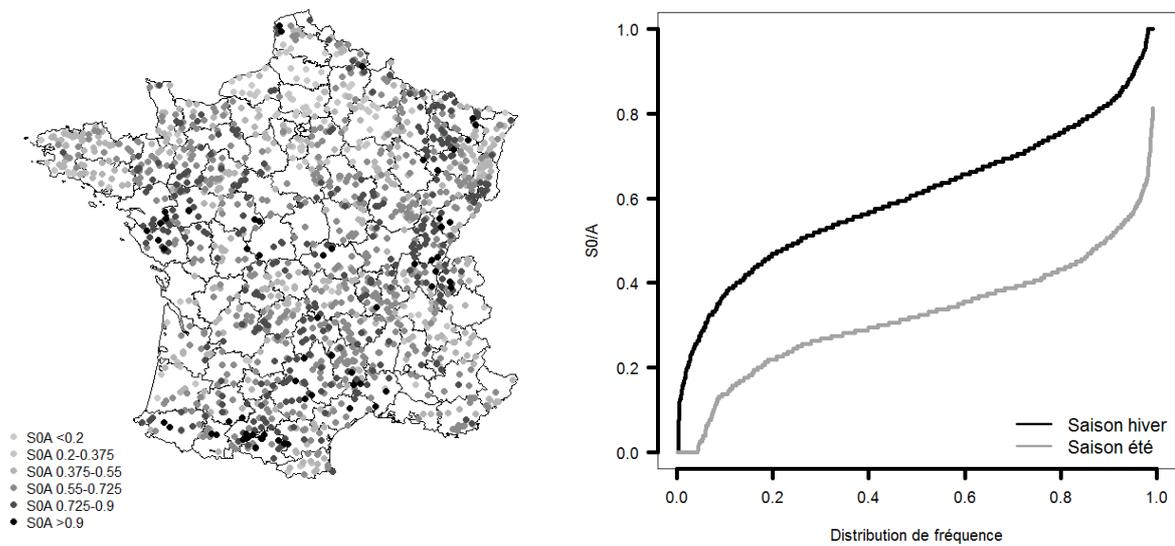
**Fig. 2** (a) Structure du modèle hydrologique GR au pixel (b) Carte de France des valeurs de taille du réservoir de production A en mm (Aubert, 2012).



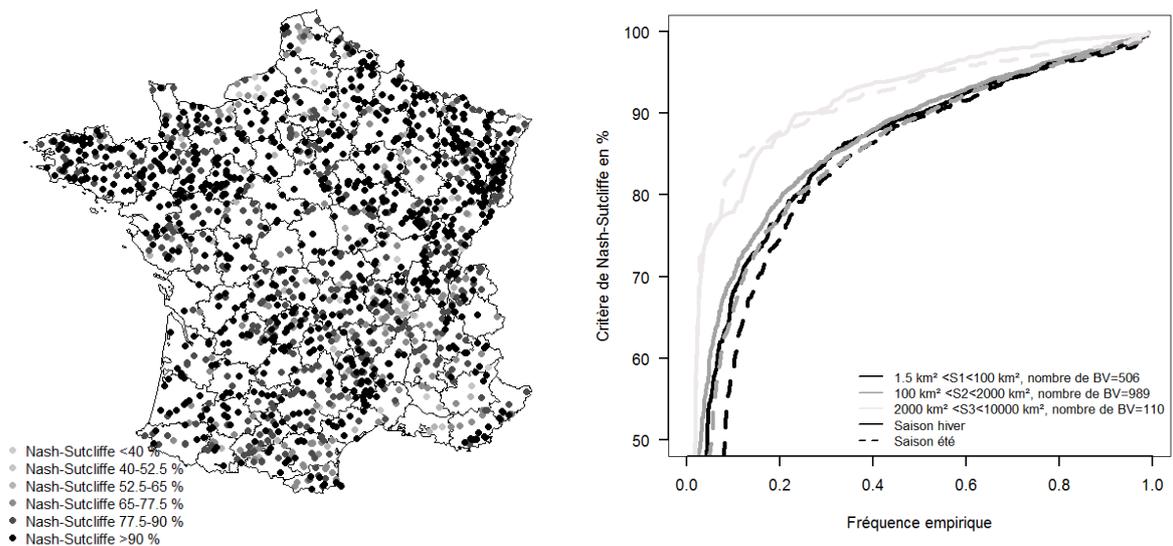
**Fig. 3** Les fonctions d'abattement ( $abat_{1,2}$ ) des quantiles de débit pour les durées supérieures ou égales à la journée et pour les durées inférieures à la journée.



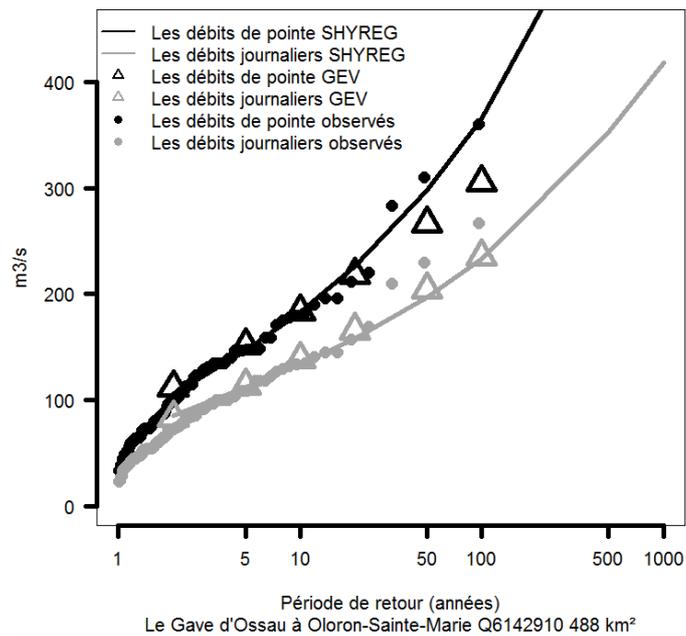
**Fig. 4 (a)** Couverture spatiale des 1605 bassins versants en gris clair et leurs stations hydrométriques en rouge **(b)** Distribution de fréquence des 1605 superficies des bassins versants et des 1605 longueurs des chroniques de débits observées de pointe



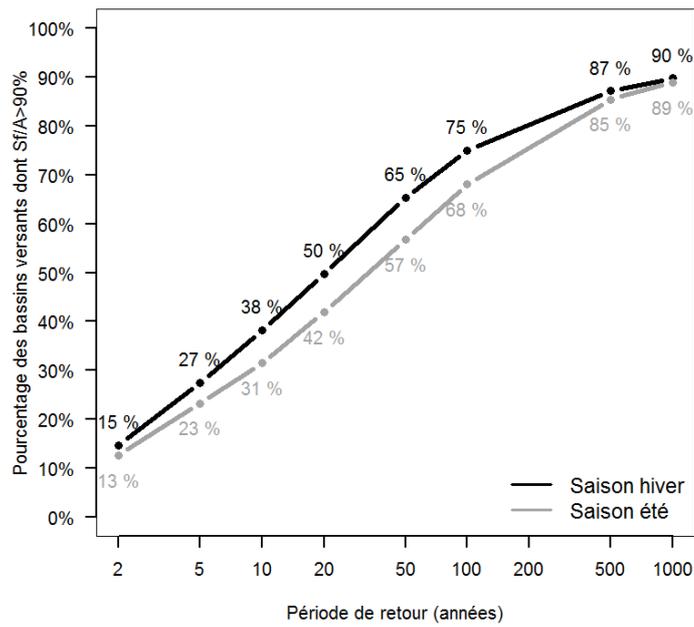
**Fig. 5 (a)** Répartition géographique du paramètre  $S_0/A$  hiver pour les 1605 bassins versants étudiés **(b)** Distribution de fréquence du paramètre  $S_0/A$  des 1605 bassins versants, pour les saisons été et hiver



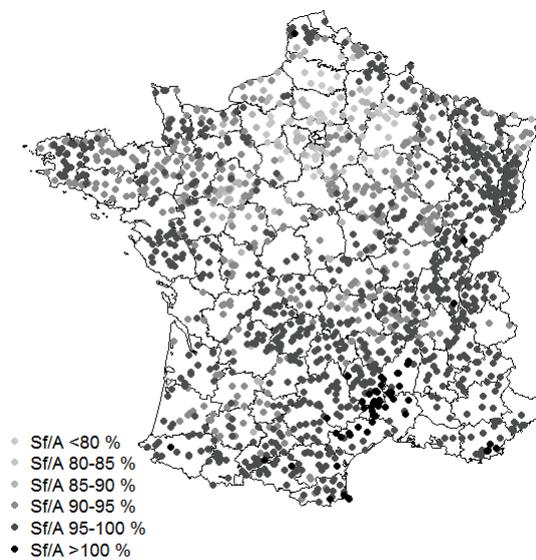
**Fig. 6 (a)** Répartition géographique des valeurs du critère de Nash-Sutcliffe pour la saison hiver **(b)** Distribution de fréquence du critère de Nash pour les 1605 bassins versants, pour les saisons été et hiver et pour trois gammes de superficies



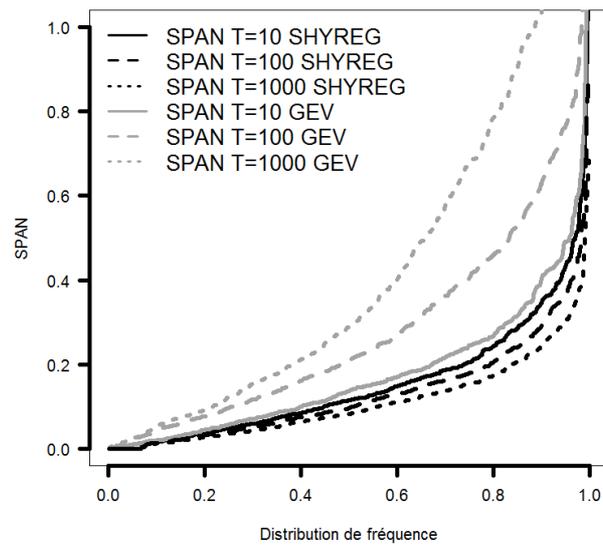
**Fig. 7** Distribution de fréquence des débits SHYREG et d'un ajustement de loi statistique (GEV) sur de le Gave d'Ossau à Oloron-Sainte-Marie (code hydro Q6142910, surface=488 km<sup>2</sup>)



**Fig. 8** Distribution de fréquence du pourcentage de bassins dont le taux final de remplissage du réservoir de production,  $Sf$  est supérieur à 90%



**Fig. 9** Saturation finale  $Sf/A$  du réservoir de production pour chacun des 1605 bassins versants, pour la période de retour 1000 ans et pour l'hiver.



**Fig. 10** Distribution de fréquence du critère  $SPAN_T$  pour les périodes de retour 10, 100 et 1000 ans pour les débits pointe.