



NOTICE UTILISATEUR

BASES DE DONNEES SHYREG-DEBIT

Méthode – Performances – Limites

Contributeurs :

Patrick ARNAUD – Irstea - Aix-en-Provence (Présentation de la méthode, performances et limites)

Yann EGLIN – Irstea - Antony (Résumé)

Bruno JANET – SCHAPI – Toulouse (Relevé de conclusion du collège d'Expert)

Olivier PAYRASTRE – IFSTTAR – Nantes (participation aux limites et conclusion)

Pour mieux
affirmer
ses missions,
le Cemagref
devient Irstea



www.irstea.fr

Collège d'expert ayant participé au débat sur les limites d'utilisation de la méthode était formé des personnes suivantes : IRSTEA Aix : Catherine Fouchier, Paul Royet, Yoann Aubert, Patrick Arnaud / IRSTEA Lyon : Michel Lang (en audio) / IRSTEA Antony : Vazken Andreassian, Yann Eglin / IFSTTAR : Olivier Payrastre, Eric Gaume / CETE Med : Patrick Fourmigué / EDF : Rémi Garçon, Emmanuel Paquet / LTHE : Anne Catherine Favre (en audio) / LSCE : Philippe Naveau / Météo France : Jean-Michel Soubeyroux / Safège : Pierre Rigaudière / DREAL Auvergne : Lionel Berthet / STEGGHB : Jean-Marc Kahan / BRM Sabine Baillarguet / SCHAPI : Céline de Saint-Aubin , Bruno Janet.

Table des matières

Présentation sommaire de la méthode SHYREG	6
Contexte	6
Historique sur les méthodes SHYPRE et SHYREG.	7
La base SHYREG-pluie	8
Calage de SHYREG-débit	10
Régionalisation de SHYREG-débit	12
Base SHYREG-débit	13
Evaluation des performances de la méthode SHYREG	16
Restitution des quantiles courants en calage local	16
Restitution des quantiles courants en calage régional	18
Procédures de calage/validation	19
Calcul de critères de justesse et de robustesse (ANR Extraflo)	21
Conclusion sur les performances	24
Limites d'utilisation	25
Limites liées à la taille des bassins versants	25
Bassins influencés par les barrages	26
Bassins influencés par la neige.	27
Les zones karstiques	28
Les zones urbaines	30
Zones d'expansion des crues	30
Statut des données	31
Points supplémentaires abordés par le collège d'expert	31
Conclusion	32
Références bibliographiques	34

RESUME

A PROPOS DES BASE DE DONNEES SHYREG ET LEUR UTILISATION POUR LA CARTOGRAPHIE DI

Le Contexte

L'approche inédite de la Directive inondation et des nouvelles orientations de la politique française en matière de réduction des conséquences négatives potentielles des inondations a conduit la DGPR à se rapprocher du domaine de la recherche et en particulier des organismes qui développent des méthodes abouties et intégrées de détermination de l'aléa.

Dans le cadre de ses activités de recherche et d'appui aux politiques publiques, Irstea a mis en œuvre la méthode SHYREG afin d'estimer des quantiles de débits de crue sur l'ensemble du territoire métropolitain. L'aboutissement de ce travail est une base de données informatique des débits de crue estimés pour différentes durées et pour différentes périodes de retour (entre 2 et 1000 ans) en tout point du réseau hydrographique.

Qu'est ce que la méthode SHYREG

La méthode SHYREG est une méthode d'estimation de l'aléa hydrologique, basée sur la régionalisation (prise en compte homogénéisée des caractéristiques locales) de paramètres de modèle (générateur de pluie et modélisation hydrologique). Cette régionalisation implique la prise en compte de variables locales pouvant influencer le régime hydrologique naturel de surface et consécutif à une précipitation.

Par contre, la présence d'éléments perturbateurs au ruissellement de surface comme des ouvrages de type barrages, le karst, l'influence de la fonte nivale ou d'un bassin versant particulièrement urbain peut faire baisser la fiabilité de la donnée.

Sous quelles formes se présentent les données SHYREG ?

Il faut distinguer deux types de données abouties pour SHYREG :

- La base de données SHYREG-Débit bassin versant : cette base contient les quantiles de crues estimés par la méthode SHYREG à l'exutoire des bassins versants de calcul. Il s'agit des quantiles des débits pour un certain nombre de durées (pointe et de 1 à 72 h) et de périodes de retour ($T = 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1000$) calculés aux exutoires de cours d'eau utiles à la prévision des crues (exutoires dits « SCHAPI ») et fournis sur la France métropolitaine. De cette base peuvent être déduit les hydrogrammes de crues mono fréquences (crues de projet)
- La base de données SHYREG-Débit Pixel : Cette base correspond aux débits de pointe cumulés le long du réseau hydrographique (pour les bassins versants $> 5 \text{ km}^2$) pour les périodes de retour 10, 30, 100, 300, 1000 ans et représentés sous forme d'information géographique selon un maillage du territoire (pixel de $50 \times 50 \text{ m}$), sur la France métropolitaine.

Pourquoi utiliser la méthode SHYREG ?

Ce type de méthode permet de s'affranchir des biais de la statistique et des méthodes d'échantillonnage en particulier dans l'observation (ou la non-observation) de valeurs extrêmes dans les séries ponctuelles (notamment courtes) de pluie ou de débit. Une telle méthode permet de générer artificiellement des séries très longues de données pluviométriques et de connaître leurs résultantes hydrologiques en prenant en compte les spécificités locales (mais « régionalisées ») du sol, de son occupation, de la topographie, du contexte hydrométéorologique....

En outre, cette méthode s'avère très utile dans les bassins versants non jaugés (sans données hydrologiques) et là où la variabilité spatiale des pluies peut être forte (en cas de forts gradients altimétriques ou dans les régions méditerranéennes). La prise en compte de ces gradients, plutôt que l'utilisation d'une série observée sur un site plus ou moins proche de la zone étudiée donne des résultats bien meilleurs.

Limites d'utilisation de la méthode et précaution à prendre avec la donnée

Comme toute méthode, les estimations fournies par la méthode SHYREG sont soumises à un certain nombre d'incertitudes. La méthode SHYREG a été calée sur des bassins versants jugées « non influencés », c'est-à-dire correspondant à des fonctionnements dits « naturels ». Or certains bassins présentent des fonctionnements pouvant être contraints par différentes configurations mettant en défaut la méthode. Par exemple, les superficies des bassins versants étudiés varient entre 5 et 5000 km², et il est conseillé de limiter l'application de la méthode à des bassins versants dans cette gamme de superficie.

De plus, dans sa version actuelle, la méthode repose sur une approche régionale globale. Elle ne prend pas en compte certaines caractéristiques très spécifiques des bassins versants: bassins versants karstiques, très urbains, influencés par des aménagements, bassins versants avec des champs d'expansion des crues significatifs ou dans le cas d'une forte influence nivale... L'application pour de tels bassins versants risque d'être incorrecte.

Pour signaler ces zones particulières pour lesquelles les quantiles SHYREG ont tout de même été calculés, un indice de confiance est proposé pour qualifier le degré d'applicabilité de la méthode. Il est important que l'utilisateur soit sensibilisé par l'alerte donnée par cet indice de confiance dans le cas où les spécificités locales rendent les résultats inappropriés.

Cette incertitude est d'autant plus grande que l'on s'intéresse aux périodes de retour élevées. Il convient alors d'être prudent dans l'utilisation des quantiles pour ces périodes de retour. Ces quantiles restent une estimation régionale de l'aléa hydrologique, en prenant en compte au mieux (calage) les informations pluviométriques disponibles et les spécificités des bassins versants jaugés dans un voisinage proche.

C'est pourquoi, en aucun cas, l'approche ne se substitue à une étude hydrologique proprement dite qui prendrait en compte les spécificités des bassins versants, de l'occupation de l'espace, du réseau hydrographique ... et le savoir faire de l'hydrologue. Ceci est particulièrement vrai dans le cadre de l'élaboration d'une cartographie PPR.

Cependant, même si des voies d'amélioration sont entrevues, la méthode présente actuellement des performances qui restent largement acceptables pour une utilisation opérationnelle, en particulier pour pallier au manque d'approches opérationnelles pour cartographier à grande échelle un événement rare pour lequel les méthodes classiques montrent leurs limites en termes d'efficacité.

SHYREG propose en plus une estimation homogène et cohérente (issue d'une seule régionalisation) de l'ensemble des caractéristiques statistiques de l'aléa hydro-météorologique (IDF, débit de pointe, volumes de crues,...) nécessaires à l'évaluation des risques hydrologiques.

Retour d'expérience de l'utilisation de SHYREG dans le cadre de la DI

Sachant que des pistes d'améliorations méthodologiques pour prendre en compte des comportements des bassins singuliers sont à l'étude, il est important, dans le cadre de cette utilisation à grande échelle pour la DI, qu'un retour d'expérience soit effectué. Il est ainsi demandé aux services utilisateurs de la donnée et notamment aux bureaux d'études de remplir ce tableau d'analyse hydrologique au droit des points stratégiques de calage des données (stations sur les cours d'eau à cartographier ou point « habituel » d'évaluation des débits dans le cas de bassins non jaugés). Il est également demandé de fournir à Irstea le chapitre consacré à l'analyse hydrologique du rapport d'étude. Les modalités de fourniture sont précisées dans la licence de mise à disposition des données.

Statut et diffusion de la donnée

La diffusion des données SHYREG au sein des services de l'Etat, est régie par une convention de mise à disposition de la base signée entre la DGPR et Irstea. Cette convention définit la propriété des données, leur mode de diffusion, les responsabilités liées à leur usage, les retours attendus pour faire évoluer la qualité de la base, et fait référence à cette notice pour préciser les limitations liées à son usage.

La mise à disposition par les services de l'Etat à un tiers (bureaux d'études...) est régie par une licence de mise à disposition qui précise également ces mêmes retours attendus de la part des utilisateurs.

PRESENTATION SOMMAIRE DE LA METHODE SHYREG

Dans le cadre de ses missions de recherche et d'appui aux politiques publiques, Irstea (ex Cemagref), avec l'aide de financements du ministère de l'écologie, a développé une méthode de cartographie de l'aléa hydrologique, la méthode SHYREG débit.

L'application de cette méthode permet l'élaboration d'une base de données, nommée base SHYREG-débit, qui fournit les quantiles de débits de crues (débit de pointe et les débits moyens sur 1, 2, 3, 4, 6, 12, 24, 48 et 72 heures) pour des périodes de retour de 2 à 1000 ans, sur l'ensemble du territoire de France métropolitaine, à la résolution kilométrique.

Le présent document s'adresse aux services de l'état qui bénéficieront de l'usage de cette base de données pour diverses applications liées à la prévention des risques de crues (cartographie des zones inondables, mise en place de PPRI, dimensionnement d'ouvrages hydrauliques,...).

Cette notice pour but de décrire synthétiquement le principe de la méthode SHYREG et ses limites, afin de guider l'utilisateur vers des usages appropriés des bases de données SHYREG-débit.

CONTEXTE

La détermination d'aléa hydrologique consiste à associer une grandeur hydrologique à sa période de retour. Cette détermination est réalisée par l'analyse statistique des observations disponibles sur un bassin versant donné. Les méthodes employées sont alors multiples et passent très souvent par l'ajustement de lois de probabilités théoriques (issues de la théorie des valeurs extrêmes) sur les distributions de fréquences empiriques des valeurs observées. La non-linéarité des processus hydrologiques, liée à la saturation progressive des bassins versants, a conduit certaines méthodes à s'appuyer sur la connaissance des pluies pour extrapoler les distributions de fréquences des débits (méthode du Gradex et ses dérivées). C'est le cas aussi des méthodes par simulation de processus qui tentent de modéliser le signal de pluie et la relation pluie-débit, afin de simuler des scénarios de crues d'où sont tirées les distributions de fréquence des débits maximums. C'est le cas de la méthode **SHYPRE** qui associe un générateur de pluies horaires à un modèle hydrologique.

Dans le cas très fréquent d'une demande de connaissance sur l'aléa hydrologique sur des bassins non-jaugés, des méthodes de transposition de l'information sont nécessaires. Dans ce cas, l'estimation de l'aléa hydrologique en site non-jaugé peut passer soit par l'interpolation directe de l'aléa estimé sur les bassins jaugés (interpolation des quantiles de crues), soit par l'interpolation des paramètres des modèles/méthodes (statistiques ou non) pour pouvoir les appliquer en sites non-jaugés. C'est le cas de la méthode **SHYREG** qui vise à régionaliser les paramètres nécessaires à la mise en œuvre de la méthode.

La méthode SHYPRE a initialement été développée pour simuler des scénarios de crues sur un bassin versant donné (Arnaud and Lavabre 2002). Elle associe un générateur stochastique de pluies horaires à une modélisation simple de la pluie en débit (Cernesson 1993; Arnaud 1997). La méthode génère ainsi une infinité d'hydrogrammes de crue, d'où l'on peut déduire les quantiles de débits maximums et moyens sur différentes durées, et ceci pour différentes périodes de retour. Ce qui implique :

- la connaissance locale des pluies horaires sur le bassin pour caler le générateur de pluie,
- la connaissance des débits à l'exutoire du bassin pour le calage d'un modèle hydrologique.

L'extrapolation vers les événements exceptionnels repose sur deux hypothèses :

1. le générateur de pluie est susceptible de fonctionner parfaitement sur l'ensemble de la plage de fréquence des pluies. Cette hypothèse a été vérifiée par les travaux ultérieurs qui montrent que les pluies exceptionnelles simulées par le générateur sont d'un ordre de grandeur pertinent et que l'ordre de grandeur des périodes de retour des événements exceptionnels observés peut être considéré comme correct (Arnaud and Lavabre 1999; Arnaud and Lavabre 1999).
2. le paramétrage du modèle de transformation de la pluie en débit, effectué sur des événements courants est applicable pour la modélisation des événements exceptionnels et rend bien compte de l'abatement des pluies sur le bassin versant. Des travaux récents ont permis d'apporter une réponse satisfaisante sur ce point (Aubert 2011). La conclusion des travaux de comparaison d'approche de prédétermination de l'ANR Extraflo (<https://extraflo.cemagref.fr/>) montre par ailleurs la justesse de la méthode SHYPRE dans l'estimation des quantiles de crue.

La méthode SHYREG a été développée à la suite de SHYPRE et repose sur les mêmes hypothèses, et elle a pour objectif la connaissance régionale des débits de crue extrêmes. Ce qui a demandé :

1. **La régionalisation du générateur de pluies horaires, sur la base de caractéristiques de pluies journalières.** Ce travail a abouti à la cartographie des quantiles de pluies en France Métropolitaine (Arnaud, Lavabre et al. 2006; Arnaud, Lavabre et al. 2008) et dans les DOM. Le travail en milieu tropical humide (La Réunion, Les Antilles) nous a permis de bien contrôler les performances du modèle pour des événements courants sous ces climats mais exceptionnels en Métropole (Arnaud, Fine et al. 2006).
2. **La régionalisation du modèle hydrologique.** On choisit de travailler au pixel de 1 km² pour pouvoir générer des quantiles de débits spécifiques qui seront ensuite agglomérés à l'échelle des bassins versants. Ce passage au pixel, imposé par la nature ponctuelle des pluies horaires modélisées par le générateur de pluies, nous permet de simplifier le modèle hydrologique et de reporter toute la variabilité du comportement hydrologique des bassins versant sur un seul paramètre (l'état initial moyen en début de crue du réservoir de production, qui est assimilable à un coefficient d'écoulement non linéaire). Les problèmes d'abatement des pluies et de routage hydrologique ne sont donc pas abordés dans un premier temps car le travail de modélisation s'effectue sur des pixels de 1 km², identifiés à des bassins versants virtuels. SHYREG génère donc, dans un premier temps, des débits spécifiques géo-référencés obtenus par la pluviométrie locale et un paramètre hydrologique local.
3. **L'agrégation de l'information sur les bassins.** Cette information pixellisée est ensuite utilisée pour estimer les quantiles de débits d'un bassin versant donné, par le biais d'une Fonction de Transfert

Statistique (FTS). Cette fonction prend en compte de façon globale, l'abattement des pluies et l'abattement hydraulique opérants sur des bassins versants de différentes tailles. La FTS est une fonction de la superficie du bassin versant, qui est paramétrée de façon unique sur le territoire pour une durée de quantiles donnée.

La méthode SHYREG est donc une version régionalisée de la méthode SHYPRE. Elle s'appuie fortement sur la connaissance de la pluviométrie pour estimer les quantiles de crues courants à extrêmes. Cette pluviométrie, la base SHYREG-pluie, est estimée régionalement suite au travail de cartographie des paramètres d'un générateur de pluies horaires de SHYPRE. Ce travail, synthétisé dans le paragraphe suivant, est présenté en détail dans un guide Méthodologique (Arnaud and Lavabre 2010).

LA BASE SHYREG-PLUIE

Nous rappelons rapidement les grands principes de la mise en œuvre de la base SHYREG-pluie. L'élaboration de la base SHYREG-pluie est passée par différentes étapes, représentées sur la Figure 1:

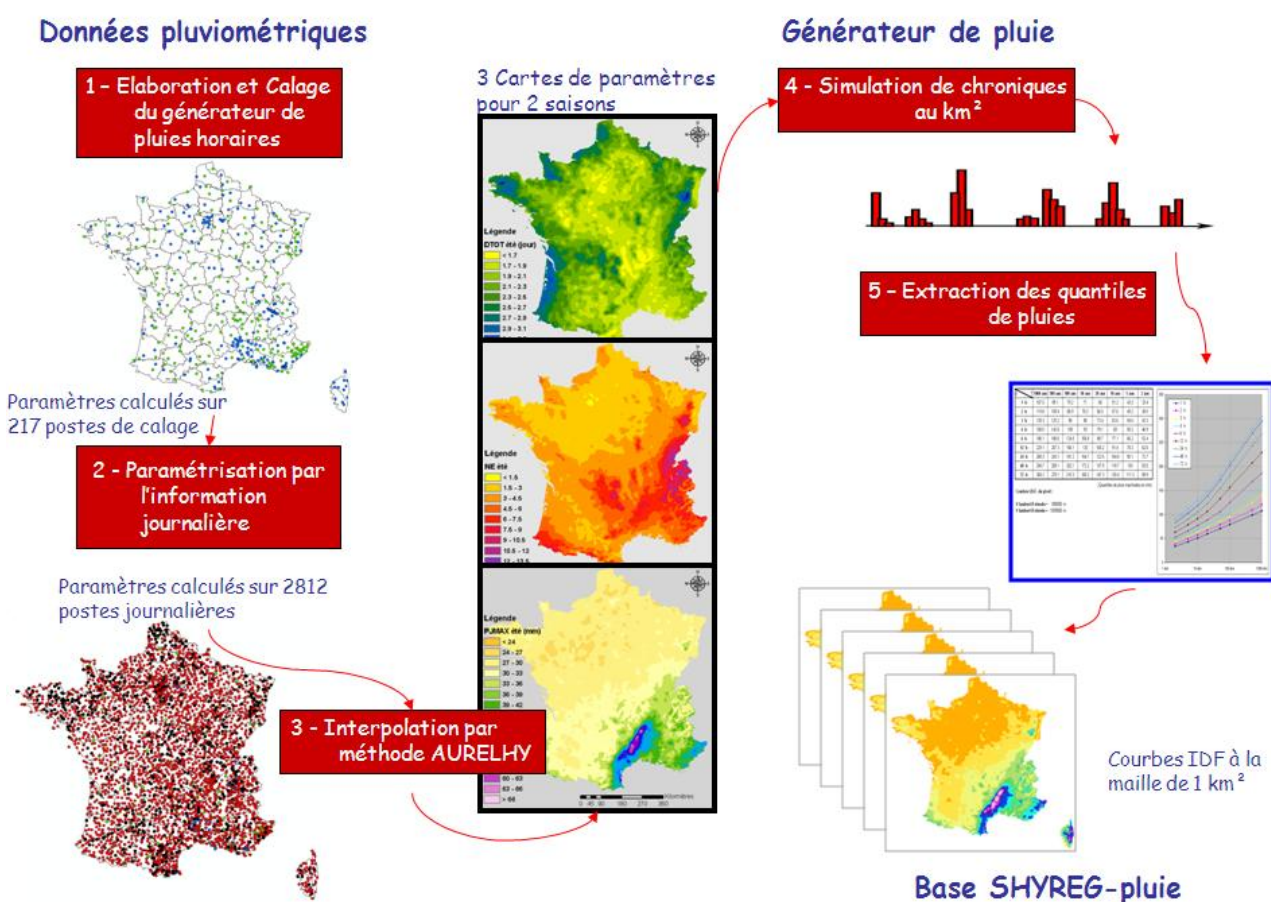


Figure 1 : Principe de l'élaboration de la base SHYREG-pluie

1. **Le calage d'un générateur de pluie.** Le principe est de décrire les chroniques des pluies horaires par l'intermédiaire de différentes variables aléatoires. Ces variables sont au nombre de 8 (nombre d'événement pluvieux par an, nombre d'averse par événements, durée des averses, volumes de averses, etc...). Elles sont toutes associées à une loi de probabilité adaptée qui permet le tirage aléatoire de valeurs, nécessaires pour simuler des chroniques de pluies horaires (Cernesson, Lavabre et al. 1996). La dépendance entre certaines variables a été mise en évidence et modélisée (Cantet 2009). Le calage du modèle 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).
2. **La paramétrisation du générateur par une information journalière.** 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 caractéristiques journalières sont : le nombre d'événement pluvieux par année, la moyenne des durées des événement pluvieux et la moyenne des pluies journalières maximales des événements pluvieux. 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 robustesse de la méthode face aux problèmes d'échantillonnage des observations.
3. **La régionalisation des paramètres journaliers :** les trois paramètres journaliers permettant de mettre en œuvre le générateur de pluie horaire ont été déterminés sur 2812 chroniques de pluies journalières observées sur la période 1977-2002. Ces trois paramètres caractérisant l'occurrence, la durée et l'intensité des pluies, ont alors été régionalisés à une maille de 1x1 km en utilisant une méthode de type AURELHY (Benichou and Le Breton 1987) par Météo-France (Sol and Desouches 2005).
4. **La simulation de chroniques de pluies :** à partir des 3 paramètres journaliers régionalisés sur une maille de 1 x 1 km, on génère au pas de temps horaire un échantillon d'événements pluvieux indépendants équivalant à un échantillon de plusieurs milliers d'années d'observation.
5. **Extraction des quantiles de pluies (courbes IDF) :** On analyse les événements pluvieux comme des observations en extrayant les valeurs de pluies maximales de différentes durées. Ces valeurs sont ensuite classées pour déterminer des distributions empiriques d'où sont extraits directement les quantiles empiriques de pluies de différentes durées, sans ajustement de lois. On obtient ainsi une base de données de courbes IDF à 1km², représentant la pluie ponctuelle.

La régionalisation du générateur de pluie permet son utilisation sur l'ensemble du territoire d'étude. Elle fournit une information pixellisée robuste et pertinente de l'aléa pluvial, prenant en compte l'information pluviométrique régionale et une information topographique. Cette base de données SHYREG-pluie servira de donnée d'entrée pour la constitution de la base SHYREG-débit.

Le calage de la méthode SHYREG-débit consiste à choisir une paramétrisation du modèle hydrologique qui permette de retrouver au mieux la distribution de fréquence des débits observés aux stations jaugées. Différentes modélisations ont été testées dans diverses études (Fouchier and Lavabre 2002; Arnaud 2005; Graff 2005; Aubert 2011). Dans ce paragraphe on expose la méthode choisie dans le cadre de la mise en œuvre de la base nationale associée à cette notice. Le principe du calage et la version de la modélisation retenue sont présentés schématiquement sur la Figure 2.

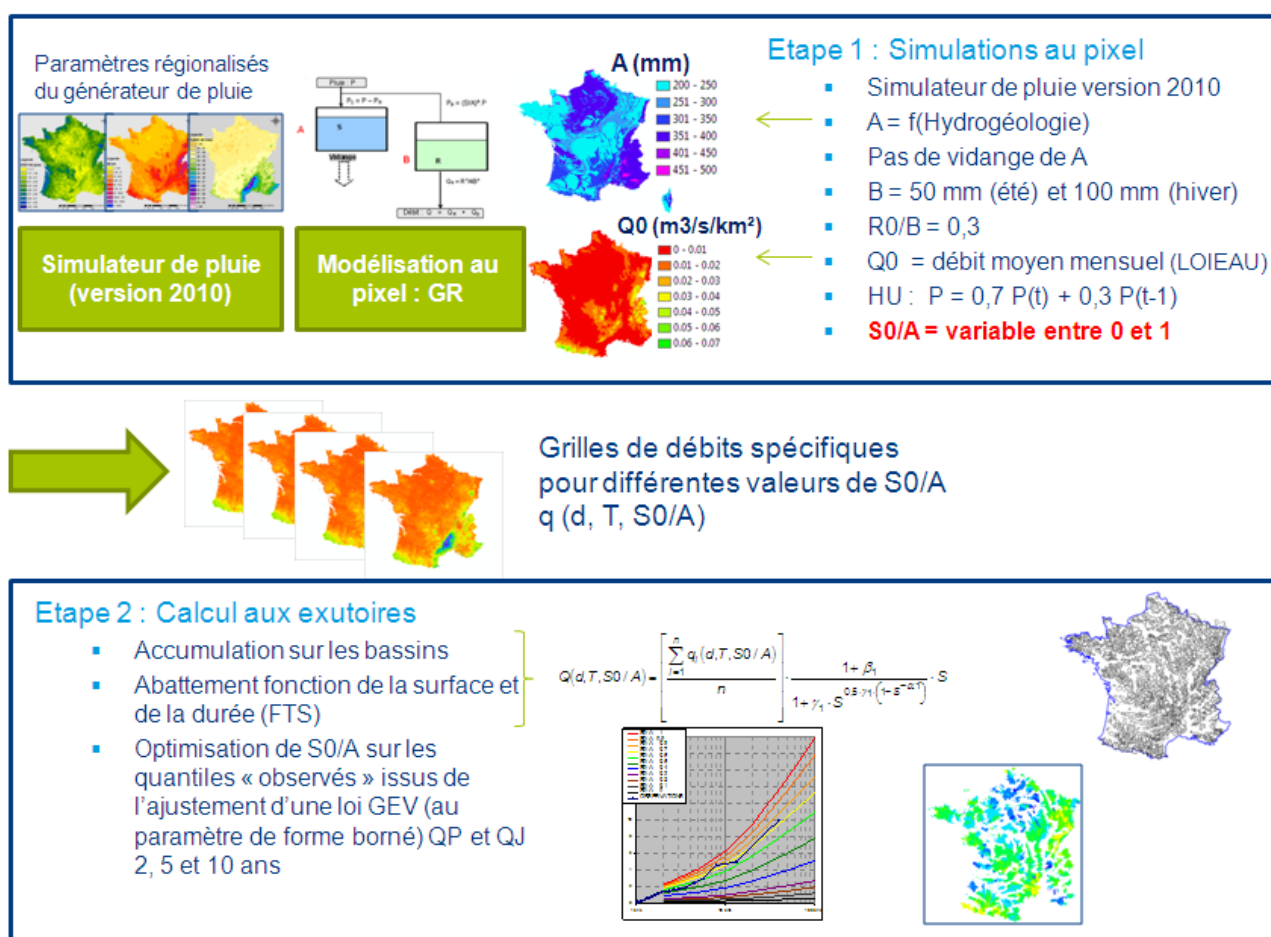


Figure 2 : Principe du calage de la méthode SHYREG-débit

1. **La première étape consiste à générer des quantiles de crue à la maille du pixel.** Pour cela, des simulations sont faites à l'échelle du pixel, pour différentes valeurs de l'unique paramètre qu'il faudra régionaliser : $S0/A$. Ces simulations consistent à générer, à chaque pixel de la zone étudiée, des événements de pluies horaires qui sont transformés en événements de crues par un modèle hydrologique du type GR (Edijatno and Michel 1989). Ce modèle a préalablement été simplifié parce qu'il est utilisé à une maille kilométrique, mais aussi pour faciliter sa régionalisation. Ce modèle est composé de 2 réservoirs (A le réservoir de production et B, le réservoir de transfert) et d'un hydrogramme unitaire. Les paramètres de ces opérateurs sont fixés, sauf le niveau de remplissage initial du premier réservoir. L'hydrogramme unitaire répartit la pluie horaire sur deux pas de temps suivant la répartition 70% au pas de temps de la pluie et 30% au pas de temps suivant. La taille du réservoir A est imposée par l'hydrogéologie (Aubert 2011). La taille du réservoir B est imposée à 50 mm pour les événements d'été et à 100 mm pour les événements d'hiver, et son niveau de remplissage initial est imposé à 30% de la capacité de B. Le niveau de remplissage du

réservoir A (S0) est donc le seul paramètre variable (entre 0 et 100% de la capacité de A) et des simulations sont réalisées pour différentes valeurs de ce paramètre. Au final, pour chaque valeur de S0/A et à chaque pixel on peut simuler des événements de crue d'où sont extraits de façon empirique les quantiles de crue : $q_i(d, T, S0/A)$. A l'ensemble des débits générés, on rajoute un débit de base (dit Q0) qui correspond à l'estimation du débit mensuel moyen fourni de façon régionale par la méthode LOIEAU (Folton and Lavabre 2006; Folton and Lavabre 2007). La variabilité spatiale des débits, pour une même durée, une même période de retour et une même valeur de S0/A, est assurée par la pluviométrie (variabilité des paramètres du générateur) et à moindre échelle aussi à la variabilité de A et de Q0. La notion de durée caractéristique du bassin versant a été, sinon éludée sur cette modélisation au km², tout au moins considérée comme identique pour tous les pixels. Le paramétrage régional ne porte donc que sur le rendement des pluies.

2. La seconde étape consiste à calculer les quantiles de crues aux exutoires des bassins jaugés et à optimiser la valeur du paramètre S0/A. C'est l'étape proprement dite de calage de la méthode. Le choix des bassins versants de calage a été effectué pour ne retenir que les bassins non influencés, jugés « fiables » en hautes eaux par les gestionnaires, présentant une chronique d'observation suffisamment longue (10 ans de données au minimum) et pour lesquels on dispose d'un contour du bassin versant (Hydris 2009). Pour chaque bassin versant, un ajustement des débits de pointe et des débits journaliers maximums annuels a été réalisé par une loi de probabilité GEV dont le paramètre de forme a été borné (valeur devant être inférieure à 0,4). Cet ajustement est utilisé pour obtenir les quantiles de crue courants (T = 2, 5 et 10 ans), qui serviront au calage de la méthode. Ainsi, pour chaque bassin versant et pour chaque valeur de S0/A, on cumule les débits des pixels contenus dans le bassin. Ces débits sont ensuite réduits par une fonction de la surface et de la durée. Cette fonction nommée FTS⁽¹⁾ (Fonction de Transfert Statistique) permet de prendre en compte à la fois l'abattement des pluies avec la surface, mais aussi un abattement hydraulique. On obtient pour chaque bassin versant les débits $Q(d, T, S0/A)$. Le calage de la méthode consiste donc à trouver la valeur de S0/A appropriée pour respecter les quantiles de période de retour 2, 5 et 10 ans des débits de pointe et des débits journaliers. Pour chaque bassin on trouve donc la valeur du paramètre S0/A qui minimise les écarts entre les 6 quantiles issus des observations et les 6 mêmes quantiles fournis par la méthode SHYREG-débit.

Ainsi, pour chaque bassin versant jaugé, la méthode SHYREG-débit peut-être calée en optimisant un seul paramètre. C'est sur ce paramètre que va porter la régionalisation nécessaire pour pouvoir appliquer la méthode en tout point du réseau hydrographique (milieu non jaugé).

¹ La FTS crée une réduction des débits cumulés sur les bassins versants, en fonction de la surface du bassin. Elle s'exprime par les relations suivantes :

Pour $d \geq 24$ h

$$Q(d, T, S0/A) = \left[\frac{\sum_{i=1}^n q_i(d, T, S0/A)}{n} \right] \cdot \frac{1 + \beta_1}{1 + \gamma_1 \cdot S^{0,5 \cdot \gamma_1 (1 - S^{-\alpha_1})}} \cdot S$$

Pour $d < 24$ h

$$Q(d, T, S0/A) = Q(24h, T, S0/A) + \left[\frac{\sum_{i=1}^n q_i(d, T, S0/A)}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n q_i(24h, T, S0/A)}{n} \right] \cdot \frac{1 + \beta_2}{1 + \gamma_2 \cdot S^{0,5 \cdot \gamma_2 (1 - S^{-\alpha_2})}} \cdot S$$

Avec :

- n : le nombre de pixels de 1 km² contenus dans le bassin versant
- S : surface du bassin versant (km²)
- Q(d, T, S0/A) : débit moyen de durée d et de période de retour T, calculé à l'exutoire du bassin versant par la FTS (d=0 pour le débit de pointe), pour une valeur de S0/A.
- qi(d, T, S0/A) : débit moyen de durée d et de période de retour T, simulé sur un pixel du bassin versant (d=0 pour le débit de pointe), pour une valeur de S0/A.

La régionalisation de SHYREG-débit repose sur la cartographie du paramètre $S0/A$. La méthode choisie repose sur la recherche de régressions entre le paramètre optimisé sur chaque bassin versant de calage et des variables environnementales, puis sur l'interpolation spatiale des résidus à ces régressions (Hydris 2009). Cette méthode est décrite par la Figure 3.

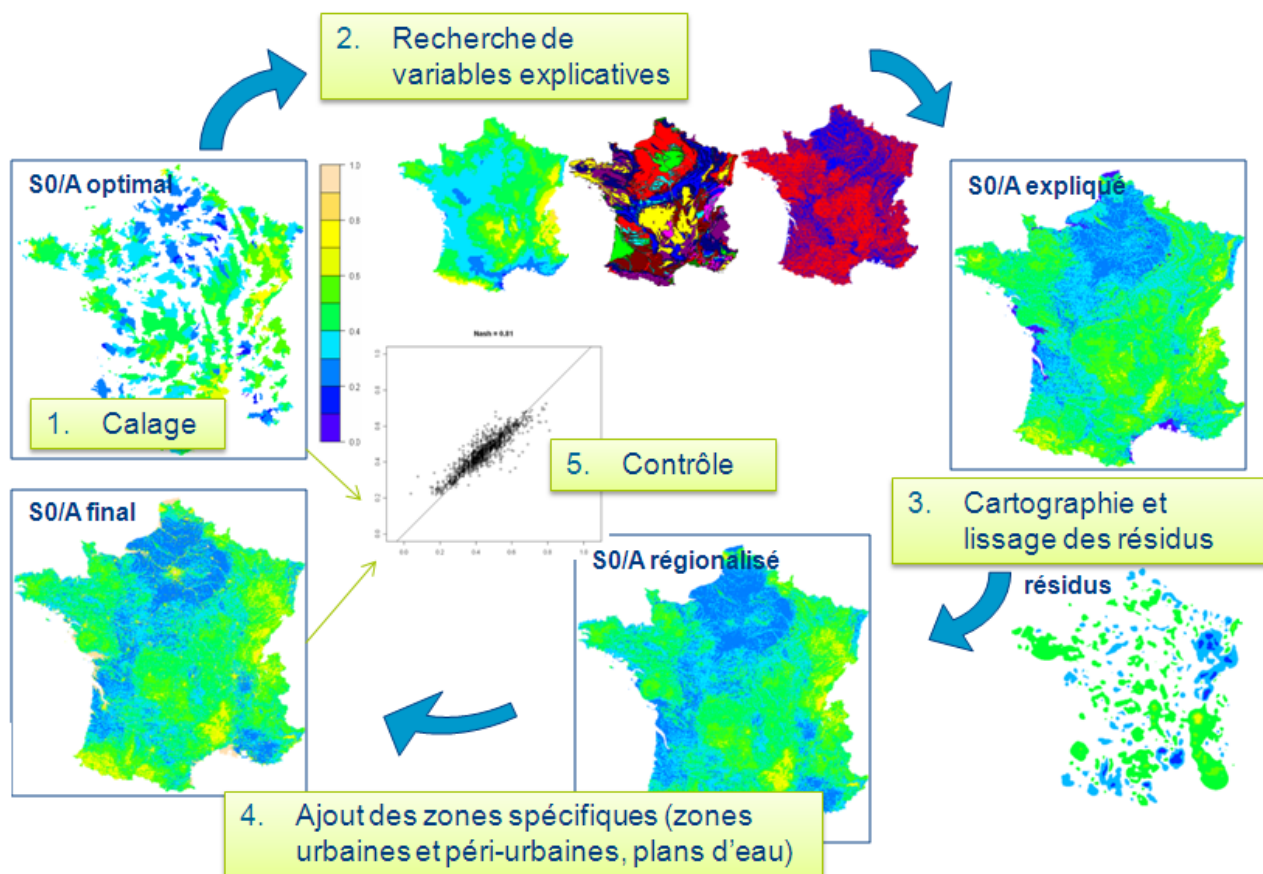


Figure 3 : Principe de la régionalisation du paramètre du modèle hydrologique.

Elle passe par plusieurs étapes :

- 1. Détermination des valeurs du paramètre optimal.** Cette valeur est issue de l'étape de calage présentée au paragraphe précédent. Dans ce cas, le paramètre est considéré comme constant pour l'ensemble des pixels d'un même bassin versant.
- 2. La recherche de variables explicatives** consiste à trouver des corrélations entre les valeurs optimales du paramètre à régionaliser et des valeurs de variables environnementales moyennées sur les bassins versants. Dans le cas de la régionalisation du paramètre $S0/A$, les variables permettant d'expliquer la variabilité du paramètre sont la densité du réseau de drainage, l'hydrogéologie et une variable de bilan hydrique. Bien que les corrélations trouvées soient faibles,

avec un coefficient de corrélation multiple (r^2) de 0,28, on détermine une carte du paramètre dite « S0/A expliqué ».

3. **Cartographie des résidus.** Les corrélations trouvées précédemment permettent d'expliquer une variabilité relativement faible du paramètre. Les résidus à cette corrélation sont alors calculés pour chaque bassin versant. Ces résidus sont alors cartographiés en attribuant à chaque pixel de la zone, la valeur du résidu du bassin le plus petit présent sur ce pixel (cas de bassins emboîtés). Une interpolation simple du type IDW (inverse de la distance au carré) est réalisée pour prendre en compte les tendances régionales à la surestimation ou la sous-estimation. On obtient alors une carte dite des « résidus » qui peut éventuellement être lissée. La carte dite « S0/A régionalisée » est alors la somme des cartes « S0/A expliqué » et « résidus ».
4. **Intégration de zones spécifiques.** A partir de l'information issue de la base de données d'occupation des sols (Corine Land Cover), on a défini des pixels dont la valeur du paramètre est imposée. Ces pixels de 1 km² sont ceux concernés majoritairement par la présence de zones urbaines, périurbaines et plans d'eau que l'on considère comme fortement ou totalement imperméable. Sur ces pixels la valeur de S0/A est alors imposée dès l'étape d'optimisation.
5. **Le contrôle** consiste à vérifier la concordance entre les valeurs optimales du paramètre et celles fournies par la régionalisation. A noter que la présence de bassins emboîtés ne nous permet pas de retrouver exactement les valeurs des paramètres optimums même en prenant en compte les résidus.

Différentes procédures de régionalisation ont été testées, notamment en travaillant sur des sous-échantillons de calage et de validation. Ces procédures ont été comparées pour retenir celle qui conduisait à la meilleure restitution des quantiles de crues sur les échantillons de validation. C'est cette procédure qui a ensuite été appliquée sur l'échantillon complet de bassins jaugés.

BASE SHYREG-DEBIT

L'élaboration des bases de données SHYREG-débit est schématisée sur la Figure 4.

La régionalisation du paramètre S0/A permet de mettre en œuvre la méthode sur l'ensemble des pixels de la zone d'étude. On obtient ainsi une base de données de débits spécifiques associés à la méthode. **Cette base de données doit alors être impérativement associée à la procédure d'agglomération et d'abattement issue de la méthode SHYREG** (c'est-à-dire par la FTS). La procédure d'agglomération et d'abattement (par le FTS) est alors réalisée en tout point du territoire en utilisant les directions d'écoulement, nécessaires pour déterminer numériquement le contour de tout bassin versant. Cependant, en l'absence des directions d'écoulement, le contour du bassin versant peut suffire pour intégrer les quantiles de débits.

Pour la mise en œuvre nationale de la base SHYREG-débit, nous avons utilisé les directions d'écoulement à un pas de 50 m, fournies par le SCHAPI. Cette base des directions d'écoulement a été travaillée pour retrouver le réseau hydrographique de la BD Carthage et les bassins des stations hydrométriques. Elle peut être considérée comme une base de référence nationale pour la délimitation des bassins versants topographiques. Un calcul automatique de contours de bassin versant a d'ailleurs été réalisé et a conduit à

l'élaboration d'une base « bassins versants » de près de 140 000 contours de bassins associés à des tronçons hydrographiques (Hydris, 2012).

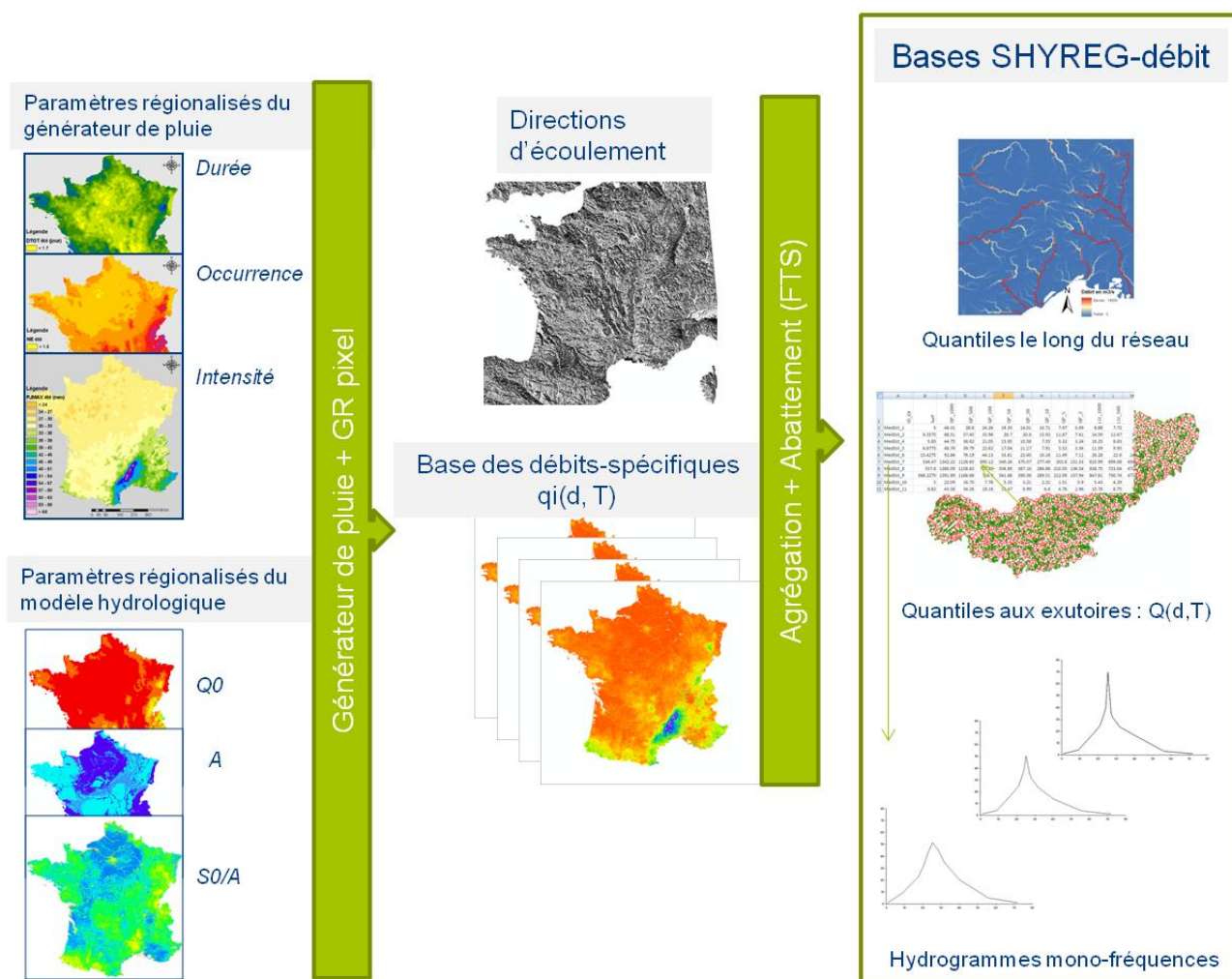


Figure 4 : Création des bases de données SHYREG-débit.

En partant de ces données, les quantiles SHYREG-débit ont été calculés suivant trois formats.

- Une base de quantiles de débit de pointe, de période de retour 10, 30, 100, 300 et 1000 ans, en tout point du réseau hydrographique selon un pas d'espace de 50 m, et pour tous pixels drainés par plus de 5 km².
- Une base de quantiles de débits de différentes durées (de la pointe à 72 heures), pour les périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500 et 1000 ans, sur tous les 140 000 exutoires de la base « bassins versants » du SCHAPI.
- Une base de crue de projet mono-fréquence pour les périodes de retour 10, 100 et 1000 ans sur les 140 000 exutoires de la base « bassins versants » du SCHAPI. Ces hydrogrammes de crues sont construits de façon à respecter les quantiles de crues SHYREG fournis aux mêmes exutoires.

Les bases SHYREG-débit sont donc le résultat de l'application de la méthode SHYREG sur le territoire national. C'est une approche régionale qui résulte de l'utilisation d'une information hydro-météorologique la plus exhaustive possible, disponible sur les bases de données nationales. Elle intègre la variabilité spatiale des statistiques sur les pluies. C'est une approche qui présente aussi l'avantage d'être homogène

sur l'ensemble du territoire et qui propose, en une seule régionalisation, l'estimation de l'ensemble des caractéristiques des crues (pointe, volume, durée, pour toutes périodes de retour). La liste bibliographique jointe permet d'obtenir plus d'information sur la méthode.

EVALUATION DES PERFORMANCES DE LA METHODE SHYREG

La méthode SHYREG-débit est une méthode régionale d'estimation des quantiles de crue. La méthode a fait l'objet d'évaluations de ses performances à travers diverses études qui sont synthétisées dans les paragraphes suivants.

Des études propres aux développements de la méthode et des études de comparaison avec d'autres méthodes de prédétermination dans le cadre du projet ANR Extraflo (<https://extraflo.cemagref.fr/>).

Les études propres à la mise en place de la méthode SHYREG-débit sur le territoire national s'appuient sur un jeu de données de 1290 bassins versants, jugés non influencés par les gestionnaires (information. banques HYDRO), non spécifiques (non karstiques par exemple) et présentant au minimum 10 ans de données et de surfaces inférieures à 2000 km² (Hydris 2009).

Dans le cadre du projet Extraflo, la base de données des bassins versants étudiés est variable en fonction des tests effectués (de 508 stations à 1172 stations).

Les paragraphes suivants présentent de façon synthétique les résultats obtenus lors du calage et de la mise en œuvre de la méthode SHYREG.

RESTITUTION DES QUANTILES COURANTS EN CALAGE LOCAL

La première étape de la mise en œuvre de la base a été de caler l'unique paramètre du modèle hydrologique (S0/A) sur chaque bassin versant. L'objectif est de voir si la méthode SHYREG calée avec un seul paramètre arrive à restituer les quantiles courants de crues (sur lesquels on se cale).

Ces quantiles courants sont les quantiles de débits de pointe et de débits journaliers de période de retour 2, 5 et 10 ans estimés par l'ajustement d'une loi GEV (dont le paramètre de forme ne peut être supérieur à 0,4). Les graphiques de la Figure 5 et le Tableau 1 présentent la restitution de la méthode. Pour supprimer l'effet de surface qui permet d'expliquer une forte partie de la variabilité des débits, les résultats sont aussi calculés sur les débits pseudo-spécifiques (division par la quantité $S^{0,8}$ où S est la surface du bassin).

Dans les résultats présentés, rappelons que la méthode est mise en œuvre sur l'ensemble des pixels du bassin versant avec les paramètres régionalisés du générateur de pluie, les paramètres régionalisés de Q0 et A, et avec la valeur optimisée du paramètre S0/A.

	Débit de pointe			Débit journalier		
NASH	2 ans	5 ans	10 ans	2 ans	5 ans	10 ans
Débit	0,99	0,99	0,99	0,93	0,97	0,97
Débit pseudo-spécifique	0,97	0,99	0,99	0,89	0,95	0,95

Tableau 1 : Restitution des quantiles de crues courants par la méthode SHYREG, en mode local (calage).

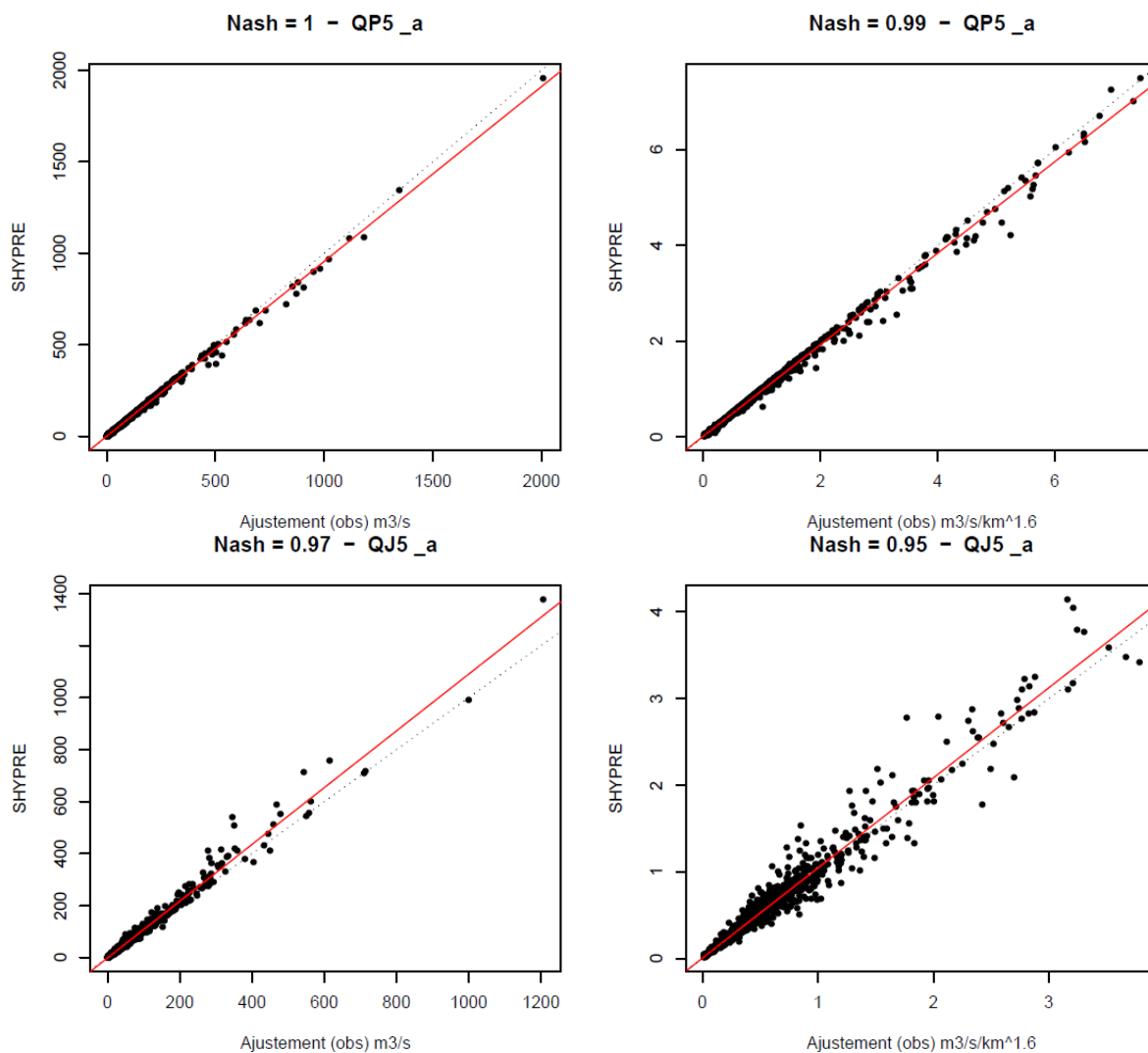


Figure 5 : Restitution des quantiles de crues en mode local (calage), pour le débit de pointe quinquennal (en haut) et le débit journalier quinquennal (en bas) : à gauche les débits exprimés en m3/s et à droite les débits pseudo-spécifiques.

La méthode arrive à très bien reproduire les quantiles de crue courants (débits de pointe et débits journaliers) sur les bassins jaugés, en ne calant qu'un seul paramètre représentant la production des bassins.

La régionalisation de la méthode passe par la cartographie du paramètre $S0/A$. La présence de bassins emboîtés ne permet pas d'associer chaque pixel des bassins à leur valeur optimisée. En effet dans le cas des bassins emboîtés, certains pixels appartiennent à deux (voire plus) bassins et sont donc associés à des valeurs de paramètres optimaux pouvant être différents. Dans ce cas le choix a été fait d'attribuer à chaque pixel la valeur du paramètre du bassin le plus petit, auquel ce pixel appartient. La procédure de régionalisation conduit en plus à introduire une variabilité du paramètre à l'intérieur d'un bassin qui peut finalement éloigner le paramètre $S0/A$ de sa valeur optimale.

Dans ce cas, la régionalisation du paramètre $S0/A$ ne garantit pas de retrouver la valeur du paramètre optimal et donc de retrouver les quantiles de crue obtenus en calage local. Les graphiques de la Figure 6 et du Tableau 2 présentent les performances de la méthode dans sa restitution des quantiles de crues courants obtenus sur les bassins jaugés par la méthode totalement régionalisée.

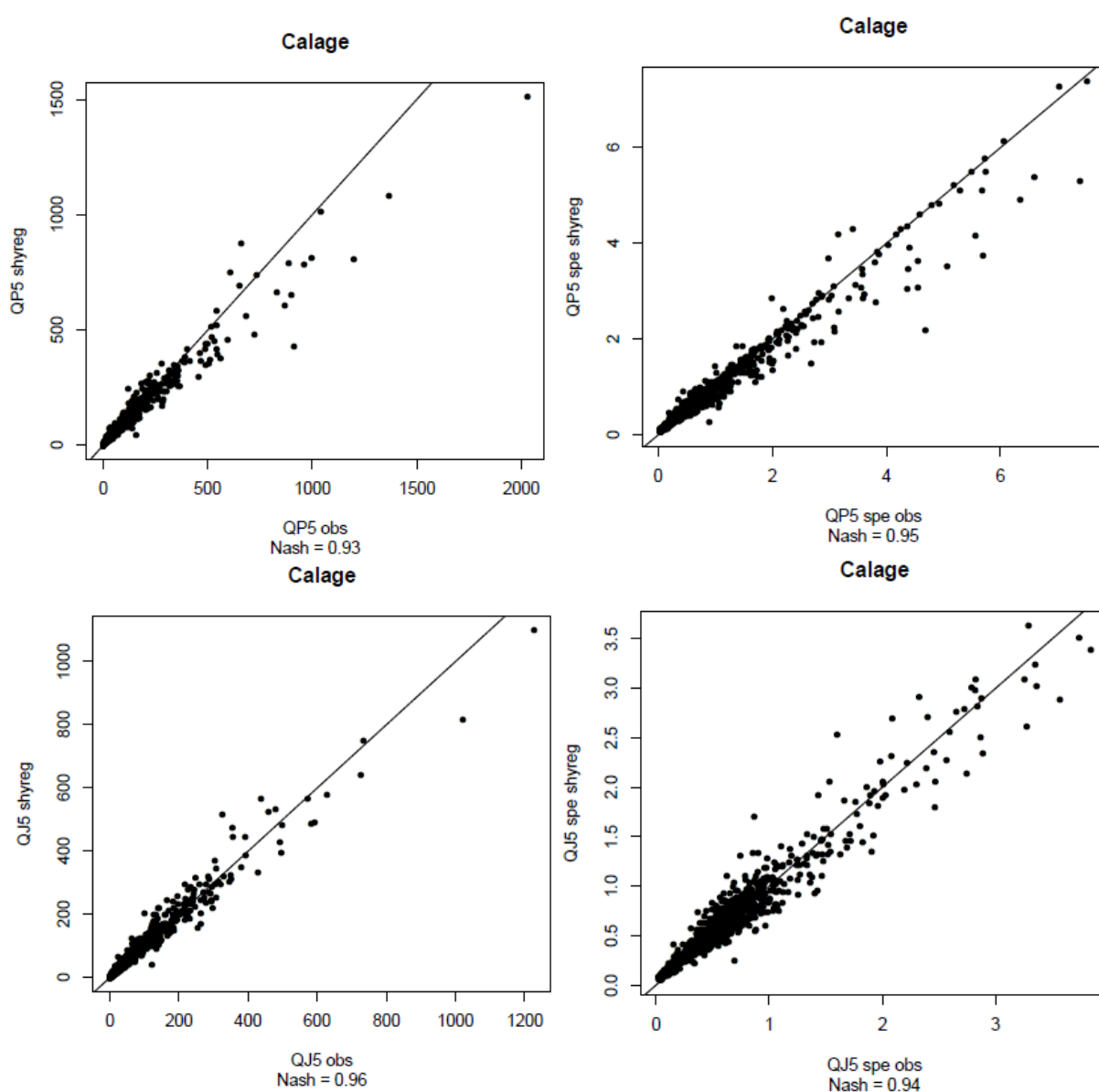


Figure 6 : Restitution des quantiles de crues en **mode régionalisé**, pour le débit de pointe quinquennal (en haut) et le débit journalier quinquennal (en bas) : à gauche les débits exprimés en m³/s et à droite les débits pseudo-spécifiques.

	Débit de pointe			Débit journalier		
NASH	2 ans	5 ans	10 ans	2 ans	5 ans	10 ans
Débit	0,92	0,93	0,94	0,94	0,96	0,96
Débit spécifique pseudo-	0,92	0,95	0,95	0,90	0,94	0,94

Tableau 2 : Restitution des quantiles de crues courant par la méthode SHYREG, en mode régional.

On observe une bonne restitution des quantiles de crues des débits de pointe et des débits journaliers de période de retour 2, 5 et 10 ans. Rappelons que les quantiles dits « observés » sont en fait des quantiles issus de l'ajustement local d'une loi de probabilité (la loi GEV « bornée »).

Cependant, afin de juger de la pertinence des résultats de la méthode SHYREG, il faut compléter l'analyse par des procédures de calage / validation et par la comparaison avec d'autres approches. C'est l'objet des paragraphes suivants.

PROCEDURES DE CALAGE/VALIDATION

Afin de juger des performances de la méthode, les 1290 bassins étudiés ont été répartis en deux groupes : un échantillon utilisé pour le calage de la méthode (recherche du paramètre $S0/A$ optimum puis régionalisation de ce paramètre) et un échantillon utilisé pour la validation de la méthode (bassins non utilisés lors du calage et de la régionalisation).

Deux découpages ont été réalisés :

- « **50/50** » : 50% des bassins choisis au hasard sont utilisés pour le calage et les 50% restant servent à contrôler la méthode.
- « **GB/PB** » : les bassins les plus grands sont choisis pour le calage (872 bassins de surface $> 100\text{km}^2$) et les bassins les plus petits (418 bassins restant de surface $< 100\text{km}^2$) sont gardés pour la validation.

Le paragraphe suivant présente les performances de la méthode SHYREG sur des échantillons de calage et de validation. Afin de relativiser les résultats obtenus, une comparaison à la méthode CRUPEDIX a été réalisée, cette méthode étant actuellement la seule méthode régionale disponible en ingénierie en France.

On applique la formulation de la méthode CRUPEDIX pour fournir un élément de comparaison à la méthode SHYREG. La méthode CRUPEDIX initialement établie pour les débits de pointe décennaux (QP10) est appliquée ici sur les débits de pointe, mais aussi sur les débits journaliers décennaux (QJ10). On procède alors à un recalage des coefficients de la formule, dans les deux cas.

On ajuste les coefficients a, b, c et d de la relation suivante, sur les bassins de calage : $Q = a \cdot R \cdot \left(\frac{PJ10}{d} \right)^b \cdot S^c$

Où

- R est le coefficient régional de la méthode CRUPEDIX (carte de valeurs comprises entre 0,13 et 1,75)
- S est la surface du bassin versant
- PJ10 est la pluie journalière décennale (ici fournie par la méthode SHYREG Pluie)

Le recalage des coefficients de la formule est indispensable pour deux raisons : tout d'abord pour un besoin de réactualisation, car l'étude Crupedix a été menée initialement sur un échantillon de bassins plus réduit que dans cette étude, et d'autre part parce que les quantiles de pluies journalières sont estimés par une autre méthode (SHYREG).

Les tableaux suivants comparent les critères de Nash obtenus en application une formulation du type Crupedix et en application la méthode SHYREG. On note respectivement QP10 et QJ10 les débits de pointe et les débits journaliers décennaux, et QPS10 et QJS10 les débits pseudo-spécifiques de pointes et journaliers pour la période de retour 10 ans.

On constate que la méthode SHYREG conduit à des résultats nettement meilleurs que la formulation Crupedix. La formulation Crupedix n'est pas adaptée pour expliquer la variabilité des débits journaliers pseudo-spécifiques, même après recalage des coefficients.

Découpage	Variable	CRUPEDIX		SHYPRE	
		Calage	Validation	Calage	Validation
50/50	QP10 ans	0.88	0.86	0.92	0.89
	QPS10 ans	0.69	0.58	0.88	0.77
	QJ10 ans	0.87	0.85	0.93	0.92
	QJS 10 ans	-0.15	-0.66	0.88	0.81

Lorsque l'on s'intéresse au découpage « GB/PB », on constate que les résultats en validation sont très mauvais pour la méthode Crupedix.

Découpage	Variable	CRUPEDIX		SHYPRE	
		Calage	Validation	Calage	Validation
GB/PB	QP10 ans	0.85	0.36	0.91	0.69
	QPS10 ans	0.71	-0.11	0.88	0.57
	QJ10 ans	0.83	-1.3	0.92	0.78
	QJS 10 ans	0.35	-4.2	0.86	0.74

Des résultats équivalents sont trouvés en multipliant les échantillonnages de calage / validation (Hydris 2009; Organde, Arnaud et al. 2012).

Malgré un recalage des coefficients de la formule de Crupedix, les résultats sont moins bons que ceux obtenus par SHYREG. Une nouvelle régionalisation du coefficient R est sûrement nécessaire. Cependant, la formulation ne semble par adaptée pour les débits journaliers. La descente d'échelle semble aussi difficilement appréhendée par une formulation simple telle que celle de la méthode Crupedix. On voit aussi l'inconvénient que représente une approche de ce type pour estimer les débits de toutes durées et toutes fréquences. En effet, un recalage des coefficients (et du paramètre régional R) serait sûrement nécessaire pour chaque durée et chaque période de retour.

La méthode SHYREG présente un intérêt important, elle permet de fournir des résultats corrects pour toutes durées de débits, à partir de la régionalisation d'un seul paramètre.

CALCUL DE CRITERES DE JUSTESSE ET DE ROBUSTESSE (ANR EXTRAFLO)

Dans le cadre du projet ANR Extraflo (<https://extraflo.cemagref.fr/>), différentes méthodes de prédétermination sont comparées, parmi lesquelles la méthode SHYREG. Des critères de justesse et de robustesse ont été établis par les acteurs du projet et appliqués aux différentes méthodes testées dans différentes configurations et sur différents échantillons de calage et de validation.

Les résultats de ce projet sont en cours de publication et certains sont disponibles sur le site du projet. Afin d'argumenter sur les performances de la méthode SHYREG-débit, voici quelques résultats produits par la méthode SHYREG.

Le principe du projet est de tester différentes méthodes de prédétermination utilisées dans des situations différentes. Ces mises en situation sont liées à des échantillonnages réalisés sur les données, afin de contraindre l'utilisation de certaines observations pour le calage des méthodes et d'autres pour leur validation.

Suivant la nature des méthodes, les échantillonnages peuvent être différents comme le schématise la Figure 7.

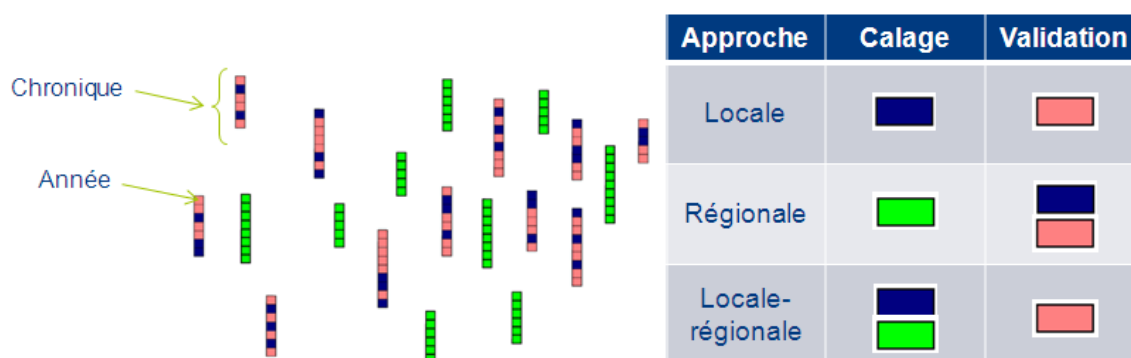


Figure 7 : Principe des décompositions en fonction de la nature des méthodes.

La méthode SHYREG-débit a participé à l'ensemble des actions du projet ARN EXTRAFLO, que ce soit pour l'étude des méthodes locales, régionales ou locale-régionales, aussi bien pour la prédétermination des quantiles de pluies que pour la prédétermination des quantiles de débits. Concernant la partie « débit », pour la méthode SHYREG-débit, les calages ont été faits de la manière suivante :

- Calage local : sur chaque bassin versant, le paramètre $S0/A$ est calé avec une partie des années de la chronique de débit disponible. A partir de ces années, on extrait les débits maximums annuels qui vont servir à caler une loi GEV pour déterminer les quantiles 2, 5 et 10 ans. Ces quantiles servent alors à caler le paramètre $S0/A$. On en déduit une distribution de fréquences fournies par la méthode, qui est alors comparée aux observations issues des années de validation.
- Calage régional : sur chaque bassin de l'échantillon de calage, on cale le paramètre $S0/A$ de la même façon que précédemment, mais avec l'ensemble des données de la chronique. La procédure de régionalisation du paramètre $S0/A$ est alors réalisée pour déterminer les valeurs de ce paramètre pour les bassins de validation. On compare alors les distributions de fréquences fournies par la méthode aux observations issues des stations de validation.
- Calage local-régional : c'est la même procédure que pour le calage local qui est utilisée pour la méthode SHYREG. Dans cette action, c'est l'échantillonnage qui change.

Les critères d'évaluation des méthodes ont été définis par les acteurs du projet (Renard, Kochanek et al. 2012). Ils concernent la « justesse » et la « robustesse » des méthodes.

La justesse d'une méthode de prédétermination est liée à sa capacité à attribuer aux observations des probabilités d'apparition justes. Pour cela, on s'intéresse à deux critères, dont la détermination est illustrée par la Figure 8 :

- **Le critère NT** qui correspond aux nombres de réalisations qui dépassent un seuil (ce seuil étant associé à une période de retour). La distribution théorique de ce nombre de dépassement d'un seuil est associée à une loi Binomiale de paramètres n (nombre d'années d'observations) et $1/T$ (fréquence annuelle de succès).
- **Le critère FF** qui correspond à la fréquence donnée par un modèle à la plus forte valeur observée en n années d'observation. La distribution théorique de cette variable est associée à une loi puissance de paramètre n (nombre d'années d'observation).

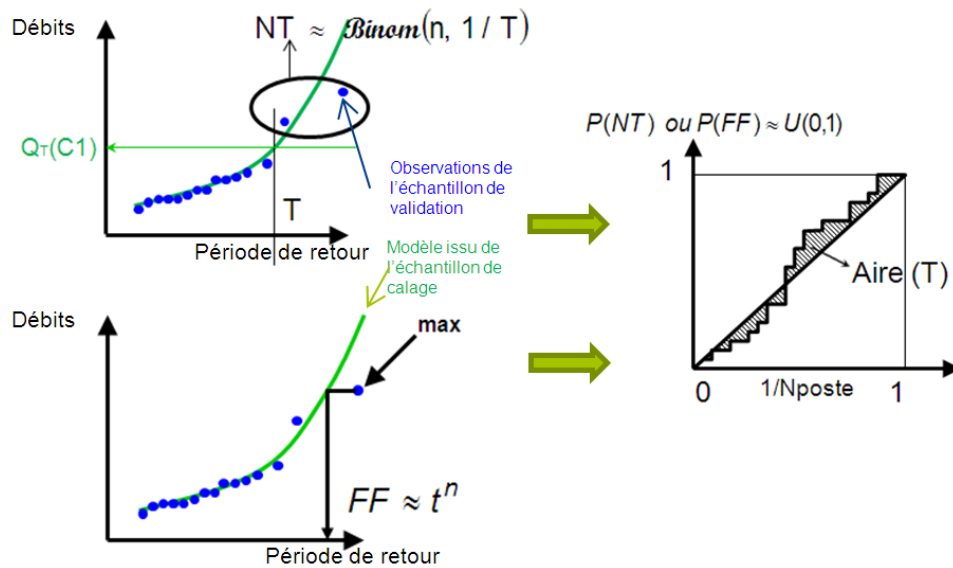
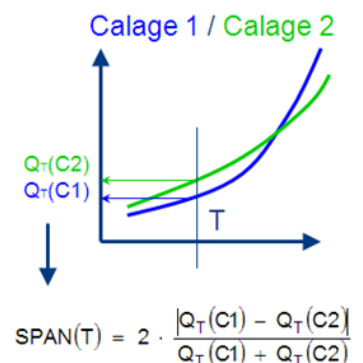


Figure 8 : Principe du calcul des critères de justesse NT et FF.

Si les modèles sont justes, les distributions de fréquences qu'ils proposent (courbes vertes sur la Figure 8) conduisent à des valeurs des variables NT et FF qui doivent respectées leur distribution théorique. Pour chaque station du jeu de validation on calcule alors ces variables NT et FF (à partir des points bleus correspondant aux valeurs observées sur l'échantillon de validation). Par inversion des lois de probabilités théoriques de ces variables (Binomiale pour NT et puissance pour FF) on obtient leur probabilité d'apparition ($P(NT)$ et $P(FF)$) qui doit alors suivre une loi uniforme, si le modèle est juste.

On juge alors de la justesse des méthodes par l'écart qui existe entre la probabilité observée et théorique des variables NT et FF (écart à la bissectrice comme le représente le graphique de droite de la Figure 8).

La robustesse d'une méthode de prédétermination est liée à sa capacité à produire des résultats proches, lorsqu'elle est calée sur des échantillons différents. Pour juger de la robustesse des méthodes, elles ont été calées sur deux échantillons de données et fournissent ainsi deux estimations possibles de quantiles pour une même station. On calcule alors, pour différentes périodes de retour, les écarts relatifs entre les quantiles suivant la formulation SPAN présentée sur la figure ci-contre. La distribution de fréquence des valeurs de la variable SPAN doit alors être proche de l'axe des abscisses, pour les méthodes les plus robustes.



La Figure 9 présente une synthèse des résultats obtenus pour des méthodes locales d'estimation des quantiles de débit. On présente ici les critères calculés sur les échantillons de validation. Les critères sont normés de façon à ce qu'ils soient optimaux pour une valeur de 1 et les plus mauvais pour une valeur de 0. Plus les courbes sont excentrées, meilleur est le modèle.

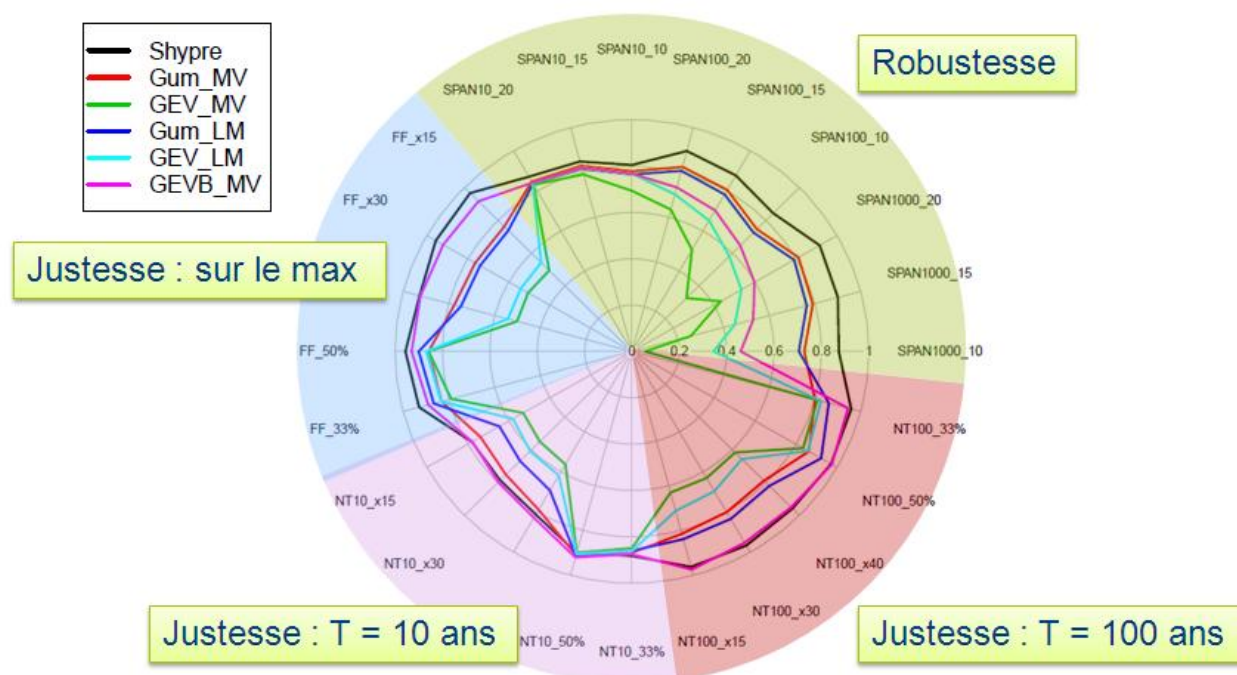


Figure 9 : Exemple de résultats du projet ARN Extraflo de comparaison de méthode de prédétermination de crue : critères de justesse et de robustesse des méthodes locales d'estimation des débits : méthode SHYREG et ajustement de lois (GEV et Gumbel) par différentes méthodes (MV =maximum de vraisemblance et LM = L-moments).

On retrouve les critères définis dans le projet:

- NT10 : jugeant de la justesse de la valeur décennale
- NT 100 : jugeant de la justesse de la valeur centennale
- FF : jugeant de la justesse de l'estimation de la période de retour de la valeur maximale observée.
- SPAN : jugeant de la robustesse du quantile 10 ans (SPAN10), 100 ans (SPAN100) et 1000 ans (SPAN1000).

Les autres indices trouvés sur le graphique correspondent aux échantillonnages (Calage/Validation) effectués, et non précisés ici.

Dans l'ensemble, la méthode SHYREG montre les meilleures valeurs pour le critère de robustesse. Ces critères sont particulièrement insensibles à la période de retour, alors que pour les méthodes d'ajustement statistique (loi de Gumbel ou GEV), la robustesse devient très mauvaise pour les grandes périodes de retour, en particulier pour les lois à trois paramètres (GEV).

En termes de justesse, la méthode SHYREG présente aussi de meilleurs résultats que les ajustements de loi de probabilité, sur les échantillons de validation.

Dans sa version locale, la méthode SHYPRE présente donc des performances meilleures que les méthodes d'ajustement classiquement utilisées en hydrologie, pour estimer les valeurs extrêmes.

Des travaux similaires sont en cours pour effectuer une comparaison des méthodes dans leur version régionale.

Les premiers résultats montrent les points suivants :

- Quelle que soit la méthode régionale d'estimation des débits de crues étudiée, elle est nettement moins juste que dans sa version locale.
- Il en ressort une tendance à ne pas reproduire suffisamment la variabilité spatiale des débits.
- Une analyse fine des critères de justesse montre que les méthodes d'ajustement de lois sur les débits de crue conduisent à estimer certaines valeurs maximales comme « impossibles » (probabilité de 1 pour la fréquence du FF), alors que la méthode SHYREG ne le fait pas. Ce point est probablement lié à l'utilisation, par la méthode, de l'information des pluies pour extrapoler les distributions des débits.
- La méthode SHYREG reste nettement plus robuste que les méthodes régionales basées sur l'ajustement de lois de probabilité.

CONCLUSION SUR LES PERFORMANCES

La méthode SHYREG est une méthode régionale d'estimation de l'aléa hydrologique, basée sur la régionalisation de paramètres de modèle (générateur pluie et modélisation hydrologique). L'objectif de régionalisation de l'approche nécessite de faire des hypothèses sur la modélisation pour réduire le nombre de paramètres à régionaliser, et réduire aussi les problèmes d'équifinalité.

Ce point peut être un problème si les simplifications conduisent à une méthode jugée « fausse ». Les résultats de la méthode SHYREG en mode local montrent bien que malgré les simplifications liées à l'approche, la méthode est capable de bien se caler avec peu de paramètre et produire des résultats justes.

La simplification permet aussi d'augmenter la robustesse de l'approche. C'est sûrement le point fort de la méthode qui montre des qualités indéniables de robustesse. Cette qualité est liée à la fois à la faible paramétrisation de l'approche et à une paramétrisation fondée sur des valeurs moyennes (pour le générateur de pluie) ou calée sur des valeurs courantes (pour le modèle hydrologique).

La régionalisation de l'approche essaie de s'appuyer au maximum sur une information fournie par des descripteurs climatiques et environnementaux. Elle s'appuie aussi sur une information qui se veut la plus homogène et exhaustive possible. Dans la mise en œuvre de l'approche, l'ensemble des données hydro-climatologiques disponibles dans les banques de données nationales, a été exploité. Des améliorations dans la régionalisation du modèle hydrologique sont cependant attendues. Par exemple à travers des travaux de recherche sur une fonction de transfert et d'abattement (FTS) ne dépendant pas que de la surface du bassin, sur la prise en compte de données hydrologiques issues d'études locales, sur des méthodes de régionalisation plus adaptées à la notion de dépendance amont-aval, etc...

Des voies d'amélioration de la méthode sont bien sûr attendues. Cependant, actuellement la méthode présente des performances qui restent largement acceptables pour une utilisation opérationnelle, en particulier pour pallier au manque d'approches opérationnelles récentes sur le territoire national. Elles proposent en plus une estimation homogène et cohérente (issue d'une seule régionalisation) de l'ensemble des caractéristiques statistiques de l'aléa hydro-météorologique (IDF, débit de pointe, volumes de crues,...) nécessaires à l'évaluation des risques hydrologiques.

Il convient toutefois d'avoir conscience des configurations dans lesquels la méthode ne peut être utilisée.

LIMITES D'UTILISATION

La méthode SHYREG a été calée sur des bassins versants jugées « non influencés », c'est-à-dire correspondant à des fonctionnements dits « naturels ». C'est aussi une méthode régionalisée, ce qui implique parfois des simplifications nécessaires pour transposer la méthode. La variabilité spatiale des processus peut alors être plus ou moins bien restituée sur des bassins versants non-jaugés sur lesquels on ne dispose par d'information suffisante pour prendre en compte la réalité des phénomènes.

Certains bassins peuvent donc présenter des fonctionnements pouvant être contraints par différentes configurations mettant en défaut la méthode. Ce sont ces configurations qui vont être présentées ici et qui font l'objet de mises en garde sur la non applicabilité de la méthode.

Les limites répertoriées ici ont été présentées et débattues lors d'une journée ayant réunie un collège d'expert (le 11 décembre 2012). Les relevés de décisions principales issues de cette réunion sont repris ici.

Dans la continuité de cette journée ayant mis en évidence certaines limites, un travail va être initié sur des indices de confiance, permettant d'alerter sur les incertitudes associées aux quantiles de crues proposés par la méthode.

Le collège d'expert ayant participé au débat sur les limites d'utilisation de la méthode était formé des personnes suivantes : IRSTEA Aix : Catherine Fouchier, Paul Royet, Yoann Aubert, Patrick Arnaud / IRSTEA Lyon : Michel Lang (en audio) / IRSTEA Antony : Vazken Andreassian, Yann Eglin / IFSTTAR : Olivier Payrastre, Eric Gaume / CETE Med : Patrick Fourmigué / EDF : Rémi Garçon, Emmanuel Paquet / LTHE : Anne Catherine Favre (en audio) / LSCE : Philippe Naveau / Météo France : Jean-Michel Soubeyroux / Safège : Pierre Rigaudière / DREAL Auvergne : Lionel Berthet / STEGGHB : Jean-Marc Kahan / BRM Sabine Baillarguet / SCHAPI : Céline de Saint-Aubin, Bruno Janet.

LIMITES LIEES A LA TAILLE DES BASSINS VERSANTS

Pour faciliter l'utilisation de la méthode SHYREG-débit, les débits ont été pré-calculés le long du réseau hydrographique, lui-même estimé par un traitement automatique du MNT, et sur une couche pré-établie de bassins versants (base de bassins versants fournie par le SCHAPI).

Ce sont les bassins versant topographiques qui ont été tracés. Malgré un contrôle manuel de cette opération automatisée, des erreurs restent possibles, notamment dans les zones de relief peu marqué. Il est demandé à l'utilisateur de vérifier la cohérence de la superficie du bassin versant.

Les bassins versants topographiques ne correspondent pas forcément aux bassins versants hydrogéologiques. Notamment en zone karstique. Sur ces zones, les estimations de débit proposées doivent être considérées avec beaucoup de prudence.

La méthode SHYREG pourrait fournir des quantiles de crues pour des bassins versants de très petite taille. Cependant, on estime le domaine de validité de la méthode pour des tailles de bassins versants de 5 à 5000 km².

En deçà de 5 km², la disponibilité des données de calage ne permet pas d'appréhender la variabilité des processus. Ce constat est propre à toutes méthodes voulant estimer des quantiles de crues sur des petits bassins versants. On s'appuie alors sur des hypothèses d'homogénéité qui sont d'autant plus fausses, que

l'on descend vers des surfaces petites. **Il est donc demandé de ne pas chercher à estimer des quantiles de crues pour des bassins de taille inférieure à 5 km², par un simple rapport d'affinité de surface, sans avoir conscience que l'on fait une hypothèse forte sur l'homogénéité spatiale des processus.**

La limite supérieure de 5000 km² est liée au fait qu'au-delà de cette surface, on dispose généralement d'informations suffisantes pour faire des études hydrologiques locales préférables à une estimation régionale. De plus, pour les plus grands bassins, des particularités hydrauliques peuvent influencer les processus, comme le stockage en zones d'expansion des crues, la présence de digues, ouvrages de régulation, etc... qui ne sont pas pris en compte par la méthode.

La méthode a cependant été appliquée sur des bassins versants de tailles supérieures à 5000 km² pour caler la méthode et vérifier qu'elle ne fournit pas des résultats aberrants. Suite au travail de thèse de Yoann Aubert (2011), une reformulation de la FTS a permis d'améliorer l'application de la méthode sur les plus grands bassins français.

Relevé de conclusion du collège d'expert : « Pour le calage de la méthode, il n'y a que peu de bassins de moins de 10 km², plus le bassin est petit plus la spécificité du sol et du sous-sol est importante. Il y a un risque de comportement très spécifique sur un trop petit bassin éventuellement typé, du point de vue de la géologie par exemple. Cependant, le problème est le même avec toutes les autres méthodes.

Ne pas mettre de limite basse d'utilisation, mais mettre un commentaire pour indiquer que la méthode n'a pas été validée pour les petites surfaces de bassins versants et que des performances moindres de la méthode sont à attendre dans ce cas.

Pour les grands bassins, il y a un certain lissage, mais il faut faire attention au laminage hydraulique. Peu de bassins de plus de 2000 km² ont été utilisés pour le calage et l'échantillon est insuffisant pour caler les fonctions d'abatement. Cependant, le problème est le même avec toutes les autres méthodes.

Ne pas mettre de limite haute d'utilisation, mais mettre un commentaire pour indiquer que la méthode n'a pas été validée pour les grandes surfaces de bassins versants et que des performances moindres de la méthode sont à attendre dans ce cas. »

BASSINS INFLUENCES PAR LES BARRAGES

Les estimations de débits proposées par la méthode ne tiennent pas compte de la présence d'ouvrages hydrauliques. La méthode fournit des débits dits « naturels » résultant de la transformation de la pluie en débit sans interaction avec des ouvrages hydrauliques. Pour cela, le calage de la méthode (et donc des paramètres représentant la relation pluie-débit) a été réalisé uniquement sur des bassins versants jaugés « naturels ».

Afin de mettre en garde l'utilisateur que ces débits « naturels » ne tiennent pas compte de la présence d'ouvrages, nous avons calculé un indice de confiance lié à la présence des ouvrages principaux pouvant influencer les débits de crues (Caruso, 2012).

A partir des informations recueillies sur la base SIOUH (Système d'Information sur les OUvrages Hydrauliques), près de 800 grands barrages (80% des barrages de classe A, 50% des barrages de classe B et 30% des barrages de classe C) ont pu être positionnés sur le réseau hydrographique, afin de calculer la surface de bassin qu'ils contrôlent ⁽²⁾. On peut alors calculer le long du réseau hydrographique le

² Une grande quantité d'ouvrages n'a pas pu être prise en compte du fait de l'impossibilité de les localiser avec précision. La fonction des barrages n'a pas pu être extraite de façon automatique ce qui ne nous a pas permis d'ôter par exemple les barrages au fil de l'eau pouvant être considéré comme neutre face aux crues. Les capacités des barrages n'ont pas non plus pu être exploitées par manque de renseignements.

pourcentage de la surface amont qui est contrôlée par un ou plusieurs barrages (valeur comprise entre 0 pour un cours d'eau non influencé et 100% juste à l'aval de l'ouvrage), comme le présente le graphe de gauche de la Figure 10.

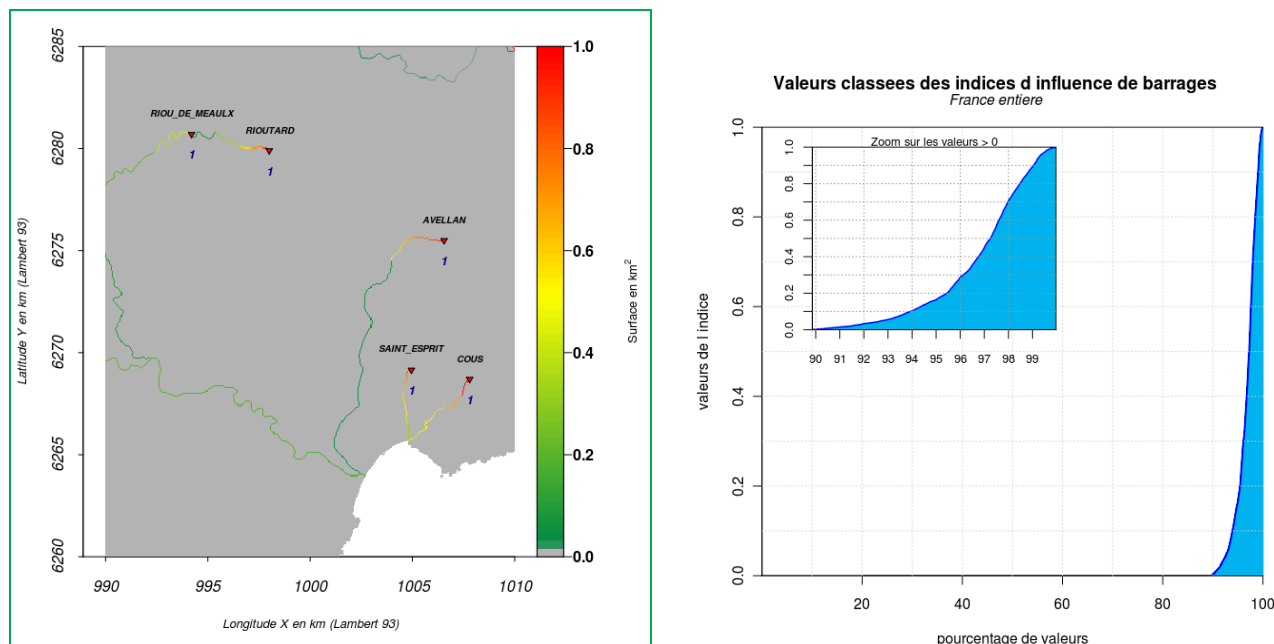


Figure 10 : Evolution de l'indice lié à la présence de barrage et distribution de ces valeurs prises sur le réseau hydrographique.

L'analyse de cet indice (compris entre 0 et 1), montre que 90 % du réseau hydrographique des bassins de plus de 5 km² n'a pas la présence d'un grand barrage (Figure 10). Sur les 10% du réseau ayant la présence d'un barrage, seulement 20 % du réseau est associé à une surface amont influencée à plus de 50% par un barrage (indice à 0,5).

Ces premiers travaux sur l'indice de confiance associé à la présence d'ouvrages hydrauliques comme les barrages se sont heurté à la non exhaustivité des informations disponibles dans la BD SIOUH, et pourront être amélioré ultérieurement.

Relevé de conclusion du collège d'expert : « La méthode ne prend pas en compte l'influence des barrages. Celle-ci varie suivant la capacité et le mode de gestion du barrage, et également le type de barrage (de retenue, au fil de l'eau ou en dérivation, ...). Il est à noter cependant que l'influence est souvent réduite pour les fortes durées de retour. Un travail est commencé pour identifier, en chaque point du réseau hydrographique, le pourcentage du bassin amont concerné par un barrage, en ne conservant que les barrages de classe A, B ou C. Ce travail n'est pas terminé.

Très peu de zones sont concernées par des barrages de dérivation (une vingtaine en France ?)

Finalisation du travail du pourcentage du bassin influencé par un barrage.

Besoin d'un travail complémentaire localement. »

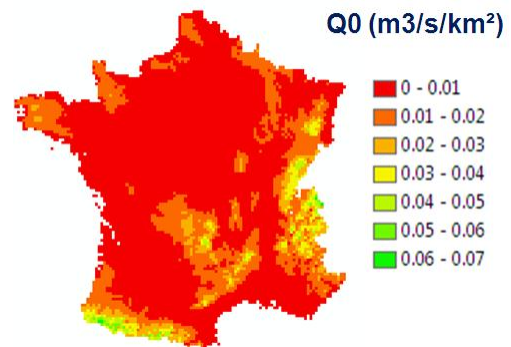
BASSINS INFLUENCES PAR LA NEIGE.

Les quantiles SHYREG ne sont pas adaptés aux bassins versants dont les débits de crues sont fortement influencés par la fonte nivale.

Deux points s'y opposent :

- Les quantiles de pluies fournis par la régionalisation du générateur de pluie sont uniquement associés à la modélisation des précipitations liquides. Il n'y a aucune prise en compte de la neige dans les quantiles de pluies des bassins versants à régime pluvio-nival.
- La modélisation hydrologique est calée suivant la même méthode que pour les bassins associés aux régimes pluviaux. On ne prend pas en compte la modélisation de la fonte de neige dans cette approche.

Seule la prise en compte d'un débit de base (Q_0), plus fort sur les régions montagneuses, à un lien avec la prise en compte des écoulements issus de la fonte de neige. Cependant, l'influence de ce débit de base reste négligeable dans l'estimation des crues extrêmes.



Un indice de confiance va être calculé et associé à la localisation des bassins pouvant avoir une composante nivale forte, et nécessitant la mise en garde sur les valeurs des quantiles produits par la méthode SHYREG.

Cet indice pourra être calculé/associé aux estimations du débit de base (par exemple ratios Q_{J2}/Q_0 faibles) ou au calcul de l'altitude moyenne du bassin versant.

Relevé de conclusion du collège d'expert : « Les problèmes de fonte de neige ne sont pas pris en compte pour le moment dans la méthode. Il ne faut donc pas appliquer la méthode aux bassins dont les fortes crues sont dominées par la fonte nivale ou glacière. Par contre, il est difficile de savoir quelles zones sont concernées par manque de stations. Il serait intéressant de connaître le pourcentage de précipitations solides, c'est à dire la quantification du degré nivale du bassin (fraction des précipitations solides dans le total précipité). Les plus forts quantiles de débits sont souvent liés à la pluie même dans des secteurs où la fonte nivale joue un rôle important. Les secteurs sous influence forte de fonte nivale pourraient être retirés de la base nationale.

Il est nécessaire d'affiner la manière d'exclure les zones soumises à de la fonte nivale pour en enlever ni trop ni pas assez. »

LES ZONES KARSTIQUES

La méthode n'est pas adaptée aux bassins versants fortement influencés par la présence de zones karstiques.

En effet, outre le fait qu'en zone karstique on ne connaisse pas toujours la surface réelle du bassin versant (qui reste topographique pour la méthode), l'alimentation du karst reste régit par des fonctionnements par seuils ou des fonctionnements retardés, très spécifiques, qui ne sont pas modélisés par la méthode.

L'analyse et la comparaison des cartes hydrogéologiques et des cartes d'indice de densité de drainage montrent généralement une bonne corrélation, comme le présente la Figure 11.

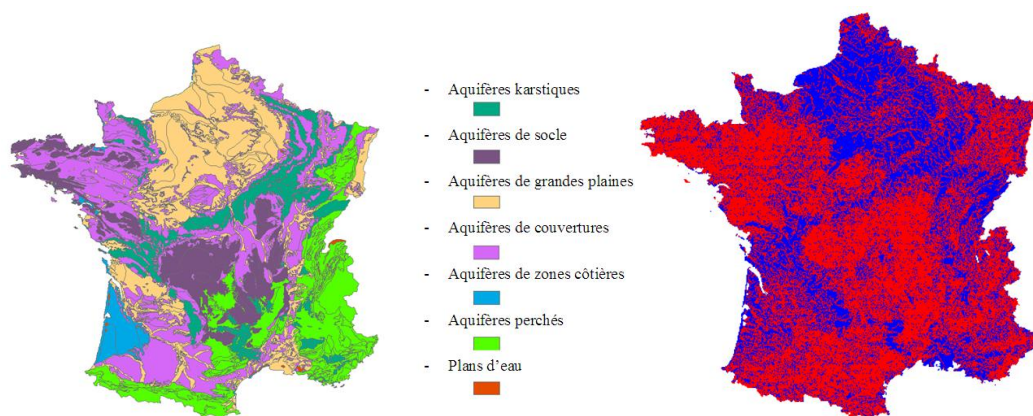
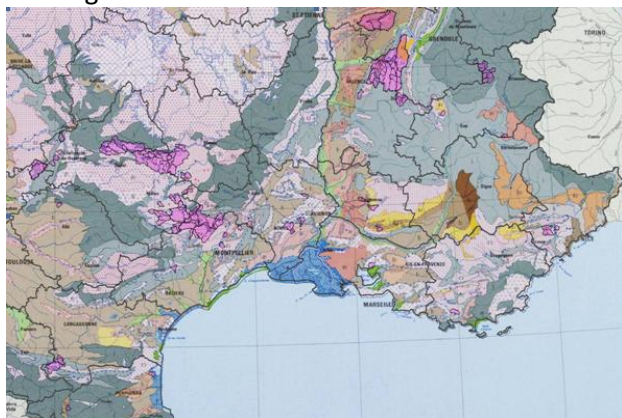


Figure 11 : Carte de grandes classes hydrogéologiques (issue d'une carte détaillée du BRGM) et cartographie d'un indice de densité de drainage (zones peu drainées en bleu et zones drainées en rouge).

A partir de cette constatation, on peut envisager de calculer un indice de confiance lié à la présence de karst, soit directement à partir d'une carte hydrogéologique, soit à partir d'indice de densité de drainage.

Par exemple, les cartes de la Figure 12 montrent les bassins versants caractérisés par des indices de drainage inférieurs à un certain seuil (50% et 70%).

Drainage à 50 %



Drainage à 70 %

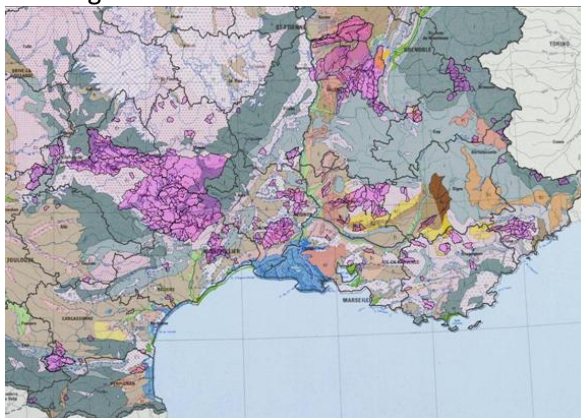


Figure 12 : Bassins versants dont l'indice de drainage est inférieur à 50% (à droite) et inférieur à 70% (à gauche)

Cet indice sur la présence de zones faiblement drainées (et donc potentiellement karstique) est intégré dans le calcul d'un indice de confiance lié aux quantiles SHYREG.

Relevé de conclusion du collège d'expert : « Le karst n'est pas pris en compte actuellement dans la méthode. Un indice basé sur la densité de drainage en surface donne une bonne indication des zones karstiques.

Il est utile de mieux délimiter les zones fortement karstiques et une fonction d'abattement pour améliorer la méthode pourrait être étudiée. Un code de confiance sera associé à la présence de karst. »

LES ZONES URBAINES

Les bassins versants présentant une forte composante urbaine ne sont pas particulièrement mal traités par la méthode SHYREG. En effet, afin de prendre en compte la partie ruissellement sur des secteurs fortement imperméabilisés, on a imposé des valeurs au paramètre $S0/A$.

A partir de l'exploitation de la base d'occupation des sols (Corine Land Cover), on a calculé pour chaque pixel kilométrique sur lesquels la méthode est mise en œuvre, la classe d'occupation du sol majoritaire. On a alors imposé pour certaines classes des valeurs pour le paramètre $S0/A$ qui garantissent un fort ruissellement :

- Pixels dits « zones urbaines » : $S0/A = 0,9$
- Pixels dits « zones péri-urbaines » : $S0/A = 0,7$
- Pixels dits « plan d'eau » : $S0/A = 1$ et $B = 300$ mm. Ce paramétrage de B permet de considérer le pixel comme très productif en terme de volume et moins en débit de pointe.

En zone urbaine, la valeur de $S0/A$ permet de gérer des débits fortement liés à la pluviométrie locale, comme le font certaines méthodes opérationnelles (comme la formule rationnelle).

Relevé de conclusion du collège d'expert : « Le SHYREG n'est pas conçu pour estimer des débits sur de tout petits bassins (de l'ordre du km^2), et de plus totalement urbanisés. Pour cela, il faudrait revoir la fonction de transfert (souvent plus rapide du fait de l'imperméabilisation) et donc la fonction d'abattement et ajuster la fonction de production. SHYREG est trop faible en pointes de crue, même si les estimations des volumes des crues semblent correctes.

Ne pas utiliser SHYREG tel quel en zones totalement urbaines. »

ZONES D'EXPANSION DES CRUES

Les bassins versants utilisés pour mettre en œuvre la méthode et sa régionalisation, sont de taille inférieure à 2000 km^2 . Dans cette gamme de surface, il y a moins de chance d'avoir des bassins qui présentent des champs d'expansion des crues. Cependant, les débits calculés en tout point peuvent être fortement biaisés dans le cas de changements morphométriques brutaux. En effet, la méthode ne prend pas en compte les particularités hydrauliques spécifiques, telles que les zones naturelles d'expansion des crues.

Ces facteurs, qui peuvent impacter sensiblement les débits de crue (et particulièrement les débits de pointe) doivent être systématiquement analysés.

Il est envisageable de calculer un indice de confiance basé sur une estimation des zones plates, par traitement d'un MNT, même peu précis.

Relevé de conclusion du collège d'expert : « Il est possible de faire un calcul de pentes qui donne les potentialités de laminage. Cependant le résultat obtenu nécessite une expertise. **Un avertissement devra être donné à l'utilisateur. »**

STATUT DES DONNEES

La diffusion des données SHYREG-débit vers les services déconcentrés de l'état, est régie par une convention de mise à disposition de la base à la DGPR, et sa diffusion moyennant une licence.

Cette convention définit la propriété des données, leur mode de diffusion, les responsabilités liées à leur usage, les retours attendus pour faire évoluer la qualité de la base et fait référence à cette notice pour préciser les limitations liées à son usage.

Relevé de conclusion du collège d'expert : « L'ensemble des membres présents considère qu'il est important que ces données soient publiques, et puissent donc être utilisées librement par les services de l'Etat, les collectivités, mais également les bureaux d'études. Le statut de la base devra être précisé par l'IRSTEA. La possibilité de la mise à disposition des données à des stations via la banque hydro doit être étudiée. Dans ce cas, il faut réfléchir à la coexistence avec les quantiles calculés avec Gumbel et actuellement disponibles »

POINTS SUPPLEMENTAIRES ABORDES PAR LE COLLEGE D'EXPERT

« Bassins versants jaugés : La détermination des quantiles de débits avec uniquement les données locales est possible, mais peut être souvent améliorée par la prise en compte des données historiques et régionales. Il est donc utile de communiquer les valeurs de SHYREG local et de SHYREG régional comme premières estimations des quantiles locaux. Il est important de réaliser une étude complète et de ne pas prendre directement la valeur SHYREG. Il serait également important que ces deux types de données soient publiques. »

Remarque : La méthode SHYREG local correspond à la mise en œuvre de la méthode sur un bassin versant jaugé, et correspond donc aux valeurs trouvées lors du calage de la méthode (Figure 5). Ces valeurs de quantiles présentent une qualité supérieure à la version régionalisée, qui introduit des incertitudes liées à la régionalisation de la méthode (voir Figure 6). Ces résultats ont aussi été montrés dans le projet ANR Extraflo. La méthode SHYREG local est meilleure que l'utilisation d'une loi de probabilité pour estimer les quantiles de crues extrêmes.

« Changement climatique : Une fréquence de 1/1000 correspond à 1 chance sur 1000 d'avoir un événement dans l'année.

Comme les autres méthodes, SHYREG ne prend pas en compte les effets du changement climatique et suppose la stationnarité du climat. »

« Fréquences utilisables : SHYREG a été calé sur des fréquences variant entre 2 et 10 ans. Une validation en extrapolation est réalisée par les tests effectués dans le cadre du projet ANR Extraflo. Les méthodes s'appuyant sur la pluie comme SHYREG donnent des résultats plus robustes et plus fiables que les autres pour les extrapolations d'après les tests conduits dans le projet Extraflo.

Au delà de 1000 ans, SHYREG est à utiliser comme toute autre méthode. Toutes les méthodes rencontrent le même problème pour valider leur comportement asymptotique dans le domaine des crues extrêmes du

fait du faible échantillonnage de crues décennales observées avec précision. Pour maîtriser les conséquences de l'usage de valeurs de débits plus rares, l'utilisateur est donc réduit à appréhender correctement les éléments techniques conditionnant ce comportement asymptotique et à les apprécier avec recul. Cependant, une communication automatique à partir des données de SHYREG au delà de 1000 ans devient périlleuse. »

« Extension à la Corse et à l'Outremer : Elle est possible, et le calendrier à définir suivant les besoins exprimés. »

« Utilisation pour la Directive Inondation : Elle est possible et déjà utilisée. Une étude locale complémentaire est cependant souhaitable pour les phases 2 et 3 de l'application de la directive. »

« Utilisation pour des PPRI : La base peut être utilisée, mais pas toute seule. Une étude locale est indispensable. »

« Utilisation pour les CAT NAT : La base peut être utilisée pour fixer un ordre de grandeur, mais il faut tenir compte des incertitudes. Compte tenu des durées de retour, les données doivent également être utilisées. De plus quel accès sera possible en dehors des stations ? »

*« Amélioration de la méthode : La base peut évoluer dans l'avenir. Il s'agit d'une V1. Les principales pistes :
- Affiner les indices de confiance
- Améliorations méthodologiques pour prendre en compte des comportements de bassins plus singuliers (urbains, karstiques,...) ou des biais géographiques de la méthode (régionalisation de certains paramètres)
- Pour cela, un club utilisateur serait apprécié et les retours terrain utiles.
- La prise en compte des retours des utilisateurs et des données locales hors banque hydro serait un plus. »*

CONCLUSION

De façon générale :

- Il n'y a pas actuellement de méthodes de référence imposées pour évaluer l'aléa hydrologique. Cependant, les recherches semblent préconiser l'utilisation de méthodes prenant en compte l'information régionale pour s'affranchir des biais d'échantillonnage, en particulier dans l'observation (ou la non-observation) de valeurs extrêmes dans les séries ponctuelles (notamment courtes), de même que les méthodes s'appuyant sur la connaissance des pluies pour proposer une extrapolation vers les valeurs extrêmes
- La variabilité spatiale des pluies peut être forte sur certaines régions (forts gradients altimétriques et régions méditerranéennes). L'usage de méthodes régionalisées en sites non jaugés est alors préférable pour prendre en compte ces gradients, plutôt que l'utilisation d'une série observée sur un site plus ou moins proche de la zone étudiée.

Concernant la méthode SHYREG :

La méthode SHYREG débits mobilise d'une part une description de la pluviométrie (SHYREG pluie), et d'autre part une information sur les débits issue des séries hydrométriques. Elle est calée à partir des quantiles 2ans, 5 ans et 10 ans estimés aux stations.

Comme toute méthode, les estimations fournies par la méthode SHYREG sont entachées d'incertitudes. Ces incertitudes sont d'autant plus grandes que l'on s'intéresse aux périodes de retour élevées. Il convient alors d'être prudent dans l'utilisation des quantiles pour des périodes de retour élevées. Ces quantiles restent une estimation régionale de l'aléa hydrologique, prenant en compte les informations pluviométriques et hydrométriques disponibles, ainsi que les spécificités des bassins versants jaugés dans un voisinage proche. Cependant, la méthode ne mobilise pas d'informations sur les crues anciennes (historiques/paléohistoriques).

Il existe plusieurs versions de la méthode. La base nationale diffusée correspond à la version régionalisée SHYREG, qui présente l'avantage de fournir un résultat sur l'ensemble des bassins versants. Toutefois le travail de régionalisation se traduit par une dégradation des performances de la méthode par rapport à la version calée localement sur les sites jaugés.

La version régionalisée diffusée dans la base nationale, peut être considérée comme un outil de synthèse nationale, bien plus performant que les outils antérieurs existants (Crupedix par exemple). Comme tout outil de synthèse, il repose sur des simplifications et ne peut rendre parfaitement compte de la variabilité spatiale, notamment aux petites échelles (petits cours d'eau) ou dans des cas particuliers (bassins influencés, karstiques, ou à régime nival)

Les performances en extrapolation (périodes de retour supérieures à 100 ans) ont pu être testées dans le cadre du projet EXTRAFLUO. Cette évaluation a mis en évidence des qualités de robustesse et de stabilité très intéressantes des approches SHYREG, par rapport à d'autres méthodes comparables.

Il ne faut cependant pas oublier que l'approche reste une approche régionale avec ses avantages et ses inconvénients. Certes, l'utilisateur dispose très rapidement d'une estimation des débits. Mais ce n'est qu'un ordre de grandeur qui reste juste en moyenne sur une région. Dans certains cas des spécificités locales peuvent rendre ces résultats inappropriés. C'est d'ailleurs le rôle que doit jouer l'indice de confiance fourni avec la méthode.

En aucun cas, l'approche ne se substitue à une étude hydrologique proprement dite qui prendrait en compte les spécificités des bassins versants, de l'occupation de l'espace, du réseau hydrographique ... et le savoir faire de l'hydrologue.

Les superficies des bassins versants étudiés varient entre 5 et 5000 km². Il est conseillé de limiter l'application de la méthode à des bassins versants dans cette gamme de superficie. Dans sa version actuelle, la méthode repose sur une approche régionale globale. Elle ne prend pas en compte les éventuelles spécificités des bassins versants : bassins versants karstiques, bassins versants influencés par des aménagements, bassins versants avec des champs d'expansion des crues significatifs...

L'application pour de tels bassins versants risque d'être particulièrement incorrecte.

Pour signaler ces zones particulières pour lesquelles les quantiles SHYREG ont été calculés, un indice de confiance est proposé pour qualifier le degré d'applicabilité de la méthode.

En termes de recommandations, on peut distinguer deux cas :

Pour les bassins jaugés, la base nationale SHYREG ne fournit pas les quantiles optimums. Les résultats de la méthode SHYREG calée localement sont préférables et fournissent une bonne estimation de l'aléa hydrologique. Ces résultats sont surtout intéressants en extrapolation (pour les périodes de retour de 100 à 1000 ans) en raison des qualités de robustesse de la méthode. Toutefois une étude locale s'avère indispensable pour plusieurs raisons essentielles:

- L'application d'autres méthodes peut permettre de mobiliser des sources de données qui ne sont pas prises en compte par SHYREG: données historiques et paléohistoriques disponibles à la fois localement mais également dans le cadre d'analyses régionales.
- Un recalage de la méthode SHYREG peut être effectué car la méthode n'a pas été calée de façon exhaustive sur l'ensemble des bassins jaugés.
- Pour les quantiles courants (<10 ans) une simple analyse de la série locale (si elle est suffisamment longue) peut apporter un gain de précision.

Pour les bassins non jaugés, la base nationale SHYREG fournit un bon ordre de grandeur des quantiles et s'avère meilleure en extrapolation que les méthodes régionales mobilisant les seules séries hydrométriques. Là encore, des approches mobilisant des sources de données non prises en compte dans SHYREG peuvent le cas échéant apporter un complément d'information intéressant. Il peut être recommandé, lorsque cela est possible, de valoriser en complément les informations disponibles sur les crues exceptionnelles du site d'étude et/ou de sites voisins comparables.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Arnaud, P. (1997). Modèle de prédétermination de crues basé sur la simulation. Extension de sa zone de validité, paramétrisation du modèle horaire par l'information journalière et couplage des deux pas de temps. . Thèse de l'Université Montpellier II. : 258 p. + annexes.
- Arnaud, P. (2005). Simplification de gr3h pour la prédétermination des crues. Application sur des petits bassins versants. Note interne.: 26 p.
- Arnaud, P., J.-A. Fine, et al. (2006). "An hourly rainfall generation model adapted to all types of climate." Atmospheric Research **85**(2): 230-242.
- Arnaud, P. and J. Lavabre (1999). Nouvelle approche de la prédétermination des pluies extrêmes. Compte Rendu à l'Académie des Sciences, Sciences de la Terre et des planètes, Géosciences de surface, hydrologie-hydrogéologie. A. d. Sciences. **328**: 615-620.
- Arnaud, P. and J. Lavabre (1999). "Using a stochastic model for generating hourly hyetographs to study extreme rainfalls." Hydrological Sciences Journal **44**((3)): 433-446.
- Arnaud, P. and J. Lavabre (2002). "Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation." Water Resource Research **38**(6).
- Arnaud, p. and J. Lavabre (2010). Estimation de l'aléa pluvial en France métropolitaine. Editions QUAE, Editions QUAE: 158 pages.
- Arnaud, P., J. Lavabre, et al. (2006). "Cartographie de l'aléa pluviographique de la France " La houille blanche **5**: 102-111.
- Arnaud, P., J. Lavabre, et al. (2008). "Regionalization of an hourly rainfall model in French territory for rainfall risk estimation." Hydrological Sciences Journal **53**(1): 21p.
- Aubert, Y. (2011). "Estimation des valeurs extrêmes de débit par la méthode SHYREG : réflexions sur l'équifinalité dans la modélisation de la transformation pluie en débit. ." Thèse doctorat Université Paris VI **317 pages**.
- Benichou, P. and O. Le Breton (1987). "Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques." La Météorologie 7ème série(19): 23-34.
- Cantet, P. (2009). Impacts du changement climatique sur les pluies extrêmes par l'utilisation d'un générateur stochastique de pluies. Montpellier, Université de Montpellier II: 230 p.
- Cernesson, F. (1993). Modèle simple de prédétermination des crues de fréquences courante à rare sur petits bassins versants méditerranéens. Thèse de doctorat de l'Université Montpellier II: 240 p + annexes.

- Cernesson, F., J. Lavabre, et al. (1996). "Stochastic model for generating hourly hyetographs. ." Atmospheric Research n° 42: 149-161.
- Edijatno and C. Michel (1989). "Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres." La Houille Blanche 2: 113-121.
- Folton, N. and J. Lavabre (2006). "Regionalization of a monthly rainfall-runoff model for the southern half of France based on a sample of 880 gauged catchments." IAHS Publication Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parameterization: Results of the Model Parameter Experiment - MOPEX vol. 4: 264-277.
- Folton, N. and J. Lavabre (2007). "Approche par modélisation pluie-débit pour la connaissance régionale de la ressource en eau: application à la moitié du territoire français." Houille-Blanche n° 03-2007: 64-70.
- Fouchier, C. and J. Lavabre (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.
- Graff, B. (2005). Recherche d'une modélisation pluie-débit invariante pour la prédétermination des crues. Application à de petits bassins versants. Rapport d'étude Cemagref - Convention DPPR 2004: 61 pages + annexes.
- Hydris (2009). Cartographie des débits de crue en Métropole. Régionalisation du modèle pluie-débit. Détermination des débits de crues de référence par l'application de la méthode SHYPRE régionalisée sur la métropole. 1. Analyse des données hydrométriques. Rapport d'étude: 39 p.
- Hydris (2009). Cartographie des débits de crue en Métropole. Régionalisation du modèle pluie-débit. Détermination des débits de crues de référence par l'application de la méthode SHYPRE régionalisée sur la métropole. 2. Calibration du modèle de transformation de la pluie en débit, recherche de variable explicatives et régionalisation du modèle. Rapport d'étude: 32 p.
- Organde, D., P. Arnaud, et al. (2012). "Régionalisation d'une méthode de prédétermination de crue sur l'ensemble du territoire français : la méthode SHYREG." Revue des Sciences de l'Eau **in press**.
- Renard, B., K. Kochanek, et al. (2012). "Data-based comparison of frequency analysis methods: a general framework." Soumis Water Resource Research.
- Sol, B. and C. Desouches (2005). "Spatialisation à résolution kilométrique sur la France de paramètres liés aux précipitations. ." Rapport d'étude Météo-France. Convention Météo-France DPPR n°03/1735.: 41 pages.