

Connaître les débits des rivières : quelles méthodes d'extrapolation lorsqu'il n'existe pas de station de mesures permanentes ?

Laure Lebecherel, Vazken Andréassian,
Bénédicte Augeard, Eric Sauquet,
Clotaire Catalogne

Sommaire

N°21

- 1- Comment mesure-t-on les débits des rivières en France ?
- 2- Comment estimer les débits des cours d'eau dépourvus de station de mesure ?
- 3- Quel est l'impact de la disparition de stations de mesure sur la qualité de la régionalisation ?
- 4- Comment utiliser des données hydrométriques limitées en quantité ?
- Conclusion et recommandations

L'évaluation de la quantité de ressource en eau disponible, le dimensionnement d'ouvrages hydrotechniques comme les digues, les barrages ou les passes à poissons, la prévision des événements hydrologiques extrêmes (crue et étiage) et le calcul de débits minimums biologiques sont autant d'exercices qui nécessitent de connaître les débits des rivières et leur variabilité.

Les enjeux sont multiples : garantir la sécurité et la rentabilité des ouvrages, alerter la population et réduire les pertes humaines et matérielles, contribuer au maintien du « bon état écologique » des cours d'eau au sens de la directive cadre européenne ou assurer la satisfaction des usages, comme l'alimentation en eau potable, l'irrigation ou le refroidissement pour les centrales électriques.

Spécialiste de l'étude du cycle de l'eau l'hydrologue a besoin, pour réaliser ses calculs, de données hydrologiques (débits des rivières) et météorologiques (pluie ou température). La qualité et la quantité de ces données hydrométéorologiques ont donc un impact majeur sur l'exactitude des calculs hydrologiques.

Or, la mise en place et la maintenance des réseaux de mesure hydrométéorologiques représentent un coût non négligeable pour leurs gestionnaires. Il n'est donc pas possible de suivre le débit de tous les cours d'eau. Avec le développement informatique et la possibilité de construire des modèles de simulation du comportement hydrologique du bassin versant, peut-on pallier l'absence de stations de mesure hydrométrique ? Quelles sont les méthodes d'extrapolation disponibles et leurs incertitudes ? En quoi la densité de notre réseau de mesure affecte-t-elle la qualité des résultats de l'extrapolation ? Qu'apportent les mesures ponctuelles ou les chroniques courtes de débit ? Cette publication propose de faire le point sur ces questions en s'appuyant sur l'utilisation de la modélisation du fonctionnement du bassin versant.

© Vazken Andréassian



La Faye à Giroux (Augerolles, 63),
code hydro K2884010

I- Comment mesure-t-on les débits des rivières en France ?

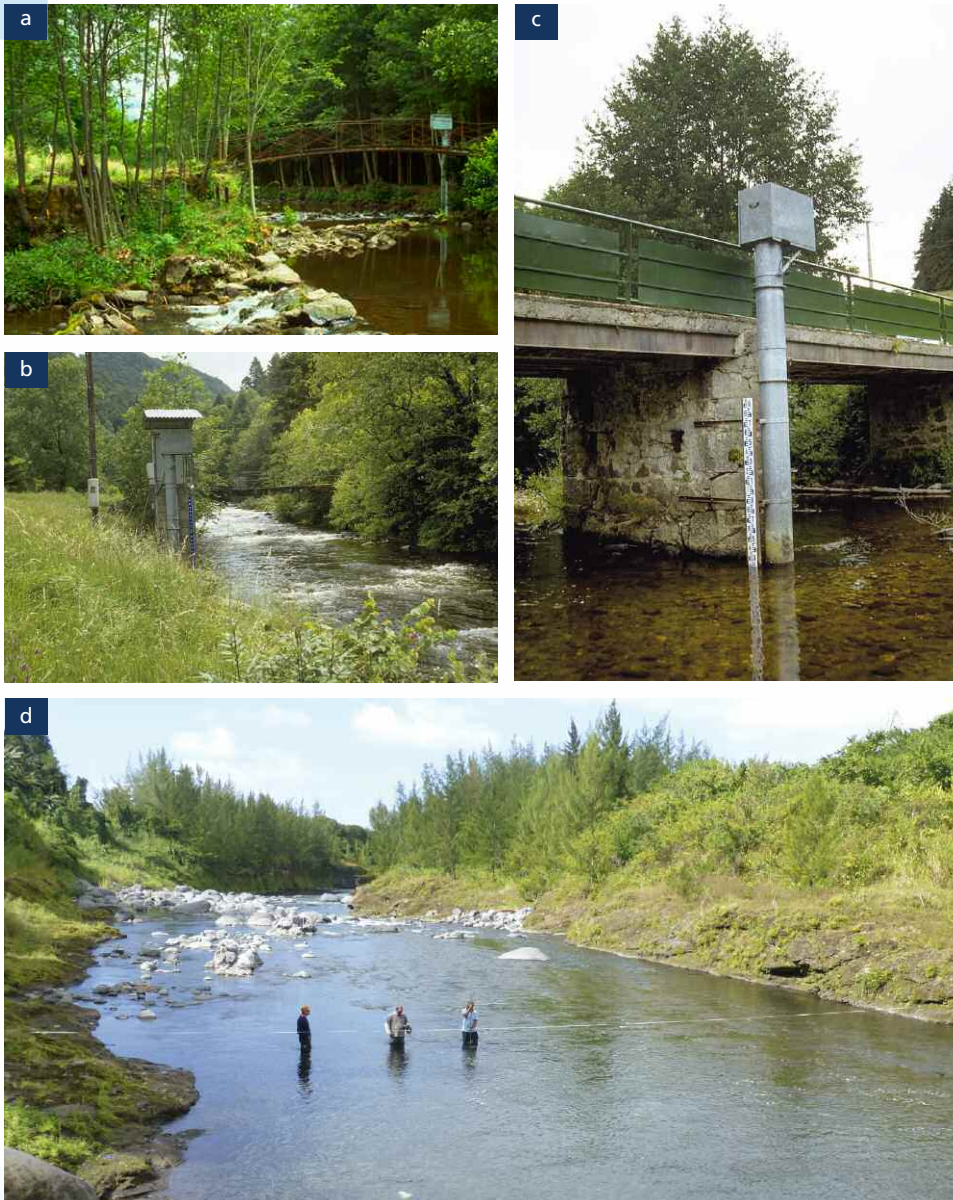
● Qu'est-ce qu'une station hydrométrique ?

Une station hydrométrique est un dispositif permettant d'observer et de mesurer une hauteur d'eau ou un débit d'un cours d'eau.

Généralement, on mesure une hauteur d'eau grâce à une échelle limnimétrique (règle graduée permettant d'apprécier directement la cote du niveau de l'eau dans un réservoir, un cours d'eau, etc.) ou à un capteur (appareil permettant de réaliser une mesure physique, ici la hauteur

d'eau), ce dernier permettant un enregistrement en continu de la donnée (Figure 1). Le débit est ensuite calculé à partir d'une relation liant le débit à la hauteur d'eau : la courbe de tarage (Figure 2, ci-contre). Cette relation, propre à chaque site de mesure, est obtenue à partir de mesures ponctuelles de débit, appelées jaugeages, effectués à différentes hauteurs d'eau.

1



© Vazken Andréassian

Figure 1. Stations hydrométriques (a, b et c) et campagne de jaugeage (d).

a- La Colagne à Ganivet (48), code hydro O7054010 ;
b- La Burande à Singles (63), code hydro P0115020 ;
c- La Dolore à Moulin-Neuf (63), code hydro K2834010 ;
d- La Rivière du Mât (île de la Réunion).

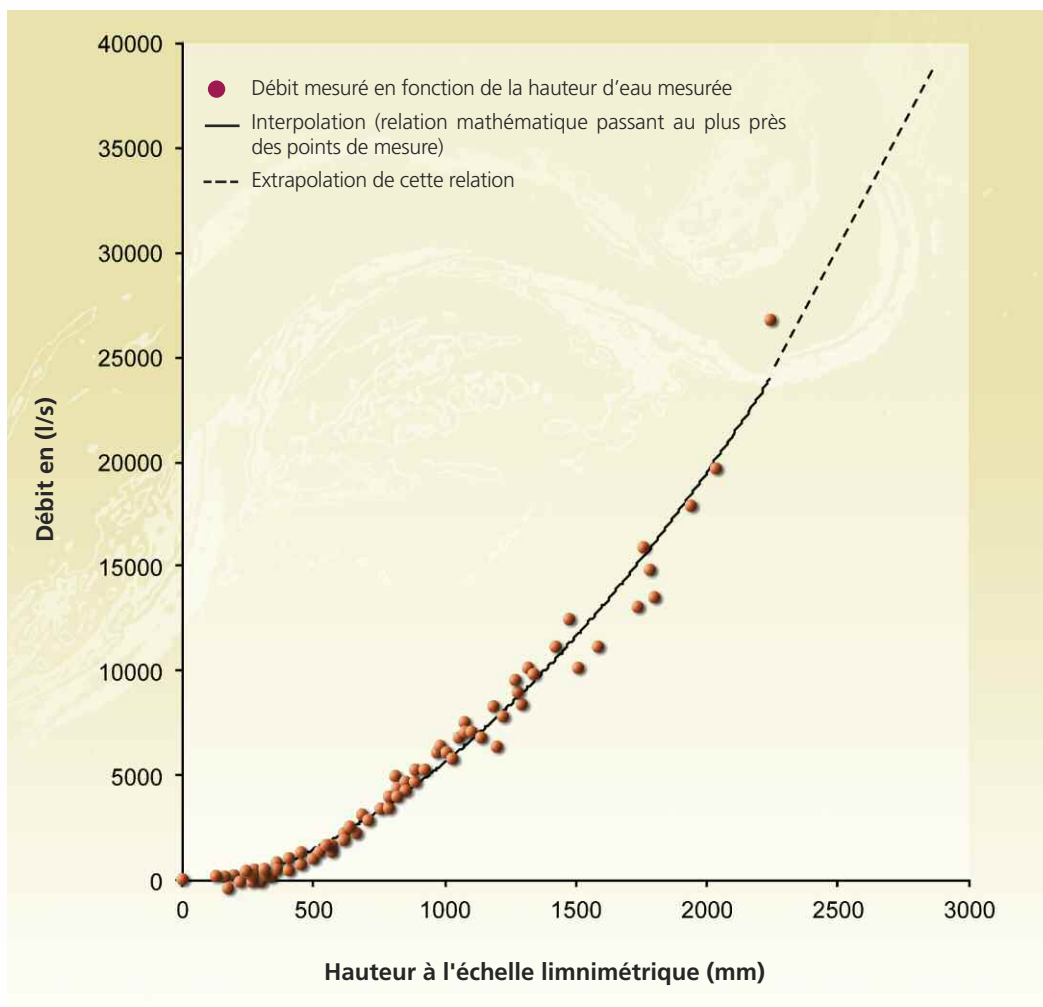


Figure 2. Exemple d'une courbe de tarage reliant le débit mesuré à la hauteur d'eau mesurée (station de l'Orgeval à Boissy-le-Châtel, code hydro H5723011).

● Où sont situées les stations ?

Le réseau hydrométrique national français compte à ce jour 3 150 stations de mesure actives (Figure 3) dont 64 dans les départements d'outre-mer. Les stations sont situées sur toutes les gammes de cours d'eau allant du petit cours d'eau (surface de bassin versant de quelques km²) à la Loire à Saint Nazaire (surface de bassin versant 117 480 km²).

L'actuel réseau d'hydrométrie de l'État est issu de la fusion :

- du réseau du ministère de l'agriculture géré par les anciens services régionaux d'aménagement des eaux et plus rarement par des directions départementales de l'agriculture ; ce réseau relevait de l'aménagement agricole des eaux et de la connaissance générale des ressources en eaux mobilisables en étiage, en particulier pour l'irrigation ;

- des réseaux d'hydrométrie du ministère en charge de l'équipement créés dans le cadre de l'annonce de crue, gérés dans les départements par les anciennes directions départementales de l'équipement et dans les bassins par les services hydrologiques centralisateurs ; ces stations sont généralement situées sur les cours d'eau ayant des impacts sur la sécurité publique.

Le réseau contient aussi des stations gérées par des établissements comme Électricité de France, des organismes de recherche ou des compagnies d'aménagements (la Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne, la Compagnie nationale du Rhône, la Société du canal de Provence, la Compagnie d'aménagement du Bas-Rhône-Languedoc). Les données de débit mesurées à ces stations sont disponibles sur le site internet de la Banque Hydro¹ (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>).

1- Banque nationale de données hydrométriques administrée par le Schapi qui stocke les mesures de hauteur d'eau en provenance d'environ 5 000 stations de mesure (dont 3 150 sont actuellement en service) implantées sur les cours d'eau français. Hydro calcule sur une station donnée les débits instantanés, journaliers, mensuels, les caractéristiques de crue, de basses eaux, etc.

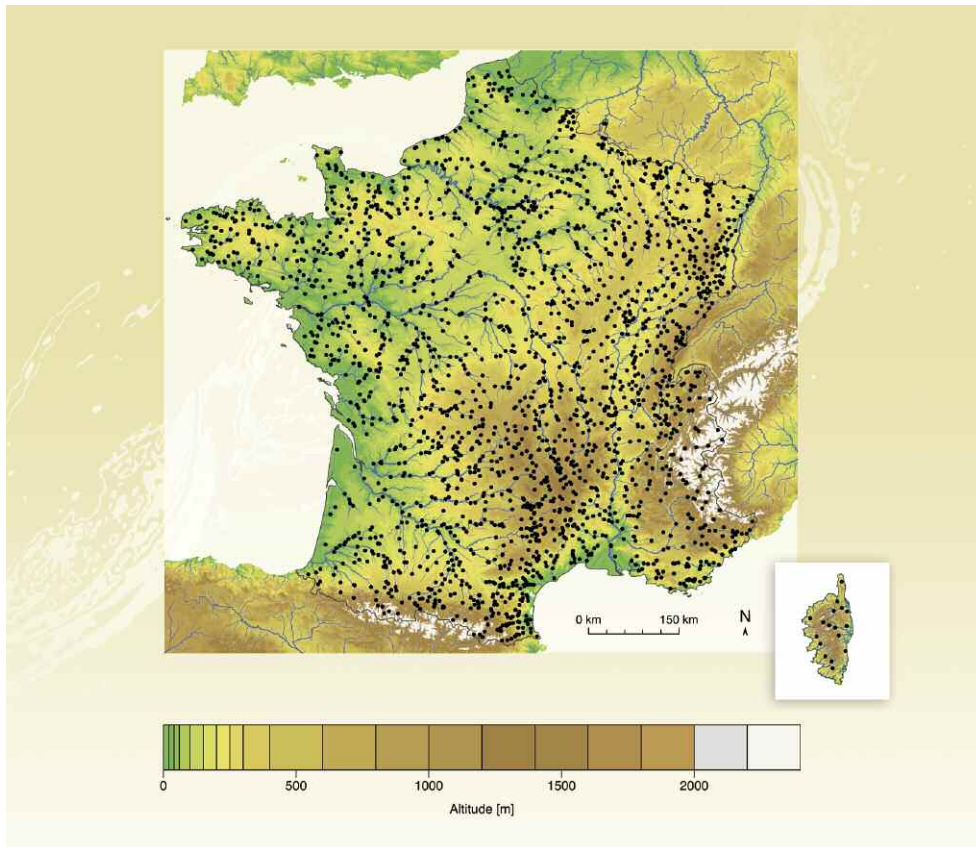


Figure 3. Stations hydrométriques actives en 2015 de la Banque Hydro en France métropolitaine. Cette carte n'inclut pas les stations situées sur des cours d'eau dont le régime est totalement artificiel (canal d'irrigation, canal usinier, canal de dérivation...).

Près de 80% des stations hydrométriques ont été installées entre les années 1960 et 1980. Le nombre total de stations a ensuite continué d'augmenter, puis s'est stabilisé autour des années 2000 (Figure 4). En 2006, le ministère chargé de l'écologie a souhaité unifier le réseau de mesure hydrométrique des services de l'État en

optimisant l'utilisation des moyens humains et financiers existants. Pour cette raison, une légère baisse du nombre de stations hydrométriques correspondant à la fusion et à la rationalisation des différents réseaux peut être observée à partir de cette date (Figure 4).

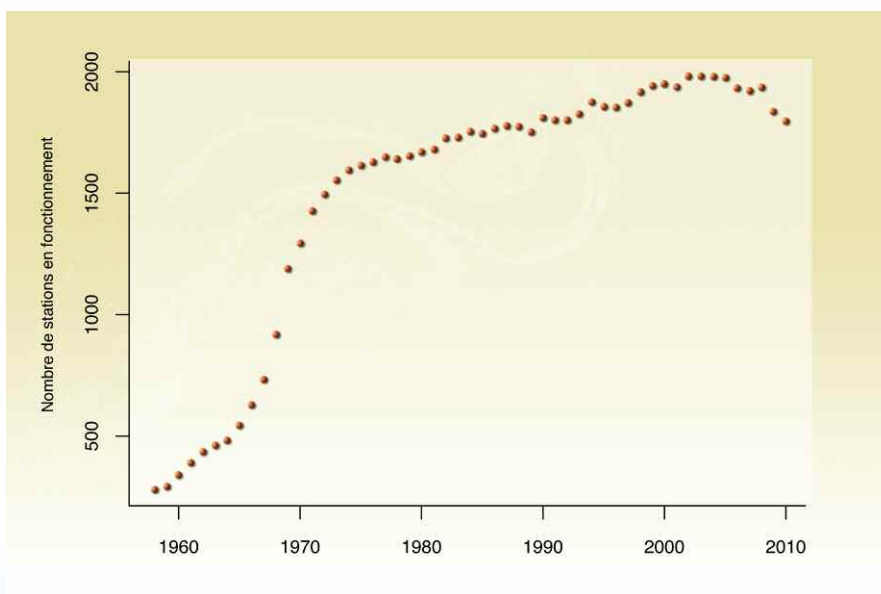


Figure 4. Evolution du nombre de stations hydrométriques actives au moins la moitié de l'année (hors stations situées sur des cours d'eau dont le régime est totalement artificiel comme certains canaux).

● Combien coûte le réseau hydrométrique français ?

Le maintien d'un réseau de mesure de débit des rivières en France nécessite un budget de fonctionnement non négligeable pour assurer une bonne qualité de la donnée (campagnes de jaugeages suffisantes, maintenance des appareils de mesure, interprétation des données collectées en vue de leur validation). Le budget total annuel des services d'hydrométrie s'élève à environ cinq millions d'euros (Schapi, 2015). On considère que la création d'une station hydrométrique coûte initialement environ 25 000 € et que son coût annuel de fonctionnement (maintenance, téléphone, alimentation électrique...) revient à environ 1 000 €. Si l'on compte les frais de personnel associés à l'entretien des stations, à la réalisa-

tion de jaugeages et au dépouillement et la bancarisation des données, il faut rajouter environ 3 000 € par an et par station. L'organisation des services qui s'occupent de la gestion du réseau hydrométrique national est décrite dans l'Encart 1.



Comment les services hydrométriques français sont-ils organisés ?

L'hydrométrie est la science qui a pour objet de mesurer les propriétés physiques de l'eau et spécialement le débit des eaux superficielles et souterraines (Larousse). Elle comprend la mesure des hauteurs d'eau et débits des cours d'eau, l'archivage, les traitements et la diffusion des données correspondantes.

En France une grande partie de l'hydrométrie est gérée par les services de l'État.

À l'échelle nationale, le service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations (Schapi), créé en 2003, est le service à compétence nationale chargé de l'hydrométrie. Il pilote le réseau de la prévision des crues et de l'hydrométrie ; il est notamment chargé de l'administration de la banque de données de débit (banque Hydro).

À l'échelle régionale, l'hydrométrie est gérée dans les directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (Dreal) qui doivent :

- coordonner les activités d'hydrométrie sur leur territoire et organiser les réseaux et les données : choix des sites de mesure en veillant à une bonne adaptation des réseaux de mesure pour la connaissance de la ressource en eau et la prévision des crues, campagnes de jaugeages pour les courbes de tarage, récupération et mise à disposition des données validées de hauteurs d'eau et débit ;
- piloter la connaissance hydrologique des bassins versants de leur territoire : développement de méthodes harmonisées d'extrapolation de données (débits spécifiques...), mesures ponctuelles de bassins non suivis en continu, échanges inter-Dreal sur les techniques de mesures utilisées, critique et saisie des données anciennes, études spécifiques sur de grandes crues ;
- contribuer à la cohérence de la programmation budgétaire en matière d'hydrométrie.

L'organisation de l'hydrométrie a été précisée par deux circulaires de 2006* et 2010**

*Circulaire du 13 avril 2006 relative à l'organisation de l'hydrométrie dans les DIREN (ex Dreal) et les SPC (services de prévision des crues)

**Circulaire du 4 novembre 2010 relative à l'évolution de l'organisation pour la prévision des crues et l'hydrométrie

Les gestionnaires réfléchissent de plus en plus à la manière dont ils peuvent rationaliser ces réseaux, c'est-à-dire optimiser au mieux l'emplacement et le nombre des instruments de mesure, de façon à réduire leurs coûts d'investissement et de fonctionnement tout en assurant un bon niveau d'information.

A titre d'exemple, dans les décennies 1980 et 1990, pour des raisons principalement économiques, de considérables réductions de densité des réseaux hydrologiques ont été constatées dans de nombreux pays : Canada (-21%), Finlande (-7%), Nouvelle-Zélande (-20%) (Pearson, 1998) et États-Unis (-6%) ; et ces réductions se poursuivent (WMO, 2008).

Mais, qu'en est-il du réseau français ? A-t-on besoin d'autant de stations ? La réponse n'est pas simple car si la réduction du nombre de stations de mesure semble un

moyen de limiter les dépenses à court terme, cela peut aussi se traduire par une perte économique à long terme en raison des incertitudes additionnelles qui affecteront les calculs hydrologiques utilisant les données ainsi produites. Ces évaluations d'incertitude dépendent de différents facteurs : l'objectif de l'étude hydrologique (connaissance des crues ou des étiages par exemple), les outils utilisés pour estimer les débits aux sites dépourvus de stations, les caractéristiques des bassins versants étudiés, l'existence ou non de quelques mesures ponctuelles de débit. Pour répondre à ces questions, il faut d'abord comprendre les méthodes d'extrapolation utilisées pour estimer les débits dans les rivières qui sont dépourvues de stations hydrométriques et garder en tête qu'aucune méthode d'extrapolation ne peut remplacer la mesure directe du débit des rivières.

II – Comment estimer les débits des cours d'eau dépourvus de station de mesure ?

Le réseau de stations hydrométriques ne couvrant pas l'ensemble du linéaire des cours d'eau, ce chapitre va porter sur l'estimation des débits des cours d'eau non ou peu suivis, c'est-à-dire sur lesquels il n'existe aucune ou très peu de mesures de débit. Dans ces cas, les calculs hydrologiques s'appuient sur les données de débit issues d'autres bassins versants dont l'exutoire est équipé d'une station hydrométrique et dont la proximité géographique ou la similarité physique ou climatique avec le bassin versant non jaugé jouent un rôle prépondérant.

Pour calculer les débits des bassins dépourvus de stations de mesure à partir d'informations de bassins versants jaugés, de nombreuses méthodes existent (Blöschl *et al.* 2013 pour une synthèse exhaustive). Il est par exemple possible :

- d'utiliser des rapports de surface de bassin versant en faisant l'hypothèse que le débit par unité de surface est le même d'un bassin à l'autre (Encart 2) ;
- de combiner linéairement des observations issues d'un ensemble de stations, le poids de chaque observation pouvant être déterminé à partir d'approches géostatistiques ;

- d'avoir recours à des outils de modélisation hydrologique du bassin versant qui permettent notamment de prendre en compte les différences de pluie et d'évapotranspiration entre le bassin cible et les bassins jaugés car ces deux variables expliquent en partie la variabilité des débits. D'autres modélisations, non discutées dans cette publication, s'appuient sur les différences de géomorphologie des cours d'eau (géométrie, pente, longueur, etc.) pour estimer le débit d'une rivière à partir de stations voisines (De Lavenne, 2013).



Dans quel cas utiliser un rapport de surface de bassin versant pour estimer le débit d'un cours d'eau ?

La méthode la plus simple pour reconstituer un débit à l'exutoire d'un bassin non jaugé est sans doute celle de la transposition directe du débit d'une station voisine, avec un ajustement correspondant au ratio des surfaces respectives de bassin :

$$Q_{\text{non jaugé}} = Q_{\text{voisin jaugé}} \times \frac{S_{\text{non jaugé}}}{S_{\text{voisin jaugé}}} \quad \text{Eq. 1}$$

Avec Q le débit en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et S la surface de bassin versant en km^2

On parle alors de modèle débit-débit, qui, dès lors que les bassins sont proches et qu'ils réagissent aux pluies de façon similaire, peut donner des résultats très satisfaisants (Andréassian *et al.*, 2012).

Mais, il faut tout de même en souligner les limites, qui nous ont poussés à utiliser une autre méthode appelée pluie-débit. Par exemple, la méthode utilisant le rapport de surface de bassin versant :

- fait implicitement l'hypothèse que les pluies diffèrent peu d'un bassin à l'autre ;
- néglige le fait que lorsque la surface du bassin versant augmente, les pointes de crue peuvent être atténuées ou décalées (le rapport des surfaces n'ajuste que les volumes d'eau).

Ainsi, on montre que les débits de crue décennale sont fonction non seulement de la surface du bassin versant mais également de la pluie décennale (comme dans la méthode Crupedix (CTGREF, 1980)) (Lang et Lavabre, 2007).

Les principes de la modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique vise à reproduire numériquement le débit d'un cours d'eau en un point (données de sortie du modèle) à partir de données supposées connues comme la pluie, l'évapotranspiration, ou certaines caractéristiques physiques du bassin versant drainé par le cours d'eau comme la superficie, la géologie, la pente, l'occupation du sol, etc. (données d'entrée du modèle). Une description précise de l'ensemble des mécanismes élémentaires intervenant dans tout l'espace tridimensionnel que constitue un bassin versant est actuellement impossible. Les modèles sont donc construits sur une schématisation plus ou moins complexe de ces processus transformant la pluie qui tombe sur le bassin en débit dans la rivière. Cette schématisation a deux conséquences majeures :

- les modélisations utilisent des paramètres dans la schématisation qui ne peuvent être que très approximativement déterminés *a priori* et doivent être ajustés par calage sur des données mesurées de débit (Encart 3) ;
- les modélisations ne reproduisent jamais exactement les valeurs de débit mesurées car les incertitudes liées à la schématisation du bassin versant s'ajoutent à celles des données d'entrée et des données de sortie utilisées pour le calage.

A titre d'exemple, le modèle hydrologique GR4J utilisé dans le cadre de cette étude est un modèle pluie-débit journalier dont quatre paramètres sont à caler (Encart 4). Un avantage de ce modèle pour des objectifs de régionalisation (voir ci-après) réside dans son faible nombre de paramètres libres, ce qui limite la complexité de la recherche des paramètres.

Qu'est-ce que le calage d'un modèle ?

Les modèles hydrologiques comportent de nombreux paramètres qui ne peuvent pas être obtenus directement à partir des caractéristiques physiques du bassin versant. Le processus de calage consiste à tester différents jeux de paramètres de manière à obtenir celui qui minimisera l'écart entre des débits mesurés et des débits simulés. L'objectif du calage est donc d'« apprendre » au modèle à identifier les propriétés hydrologiques du bassin versant.

La méthode de calage retenue dans les travaux présentés dans cette publication se caractérise par :

- la période sur laquelle le calage est effectué : il s'agit ici d'une période de 10 ans entre 1997 et 2006 ;
- le critère de performance du modèle qui traduit l'écart entre les débits mesurés et simulés ; le critère usuellement utilisé en hydrologie est le critère de Nash et Sutcliffe (1970) qui s'appuie sur le rapport entre l'erreur du modèle et l'écart du débit observé à sa moyenne. Selon l'objectif hydrologique, ce critère de Nash-Sutcliffe peut être calculé sur la racine carrée des débits pour les débits moyens, sur le logarithme des débits lorsque l'on s'intéresse à l'estimation des bas débits ou sur les débits pour les hauts débits ; un modèle très performant a un critère de Nash-Sutcliffe proche de 1, et lorsque les écarts sont importants, le critère devient négatif ;
- l'algorithme de calage qui permet d'identifier les paramètres du modèle qui maximisent le critère de performance : il permet une exploration exhaustive de l'espace des paramètres ainsi qu'une recherche locale de l'optimum (Edijatno *et al.*, 1999 ; Mathevet, 2005).

Le modèle pluie-débit GR4J

Le modèle hydrologique GR4J est un modèle pluie-débit à pas de temps journalier. Il simule le débit des cours d'eau en continu et s'appuie pour cela sur quatre paramètres qui lui permettent de s'adapter à un bassin versant donné. GR4J est régulièrement utilisé dans les études hydrologiques ; il a été choisi pour cette étude, mais l'approche utilisée pour évaluer les débits en site non jaugé peut être appliquée à n'importe quel autre modèle.

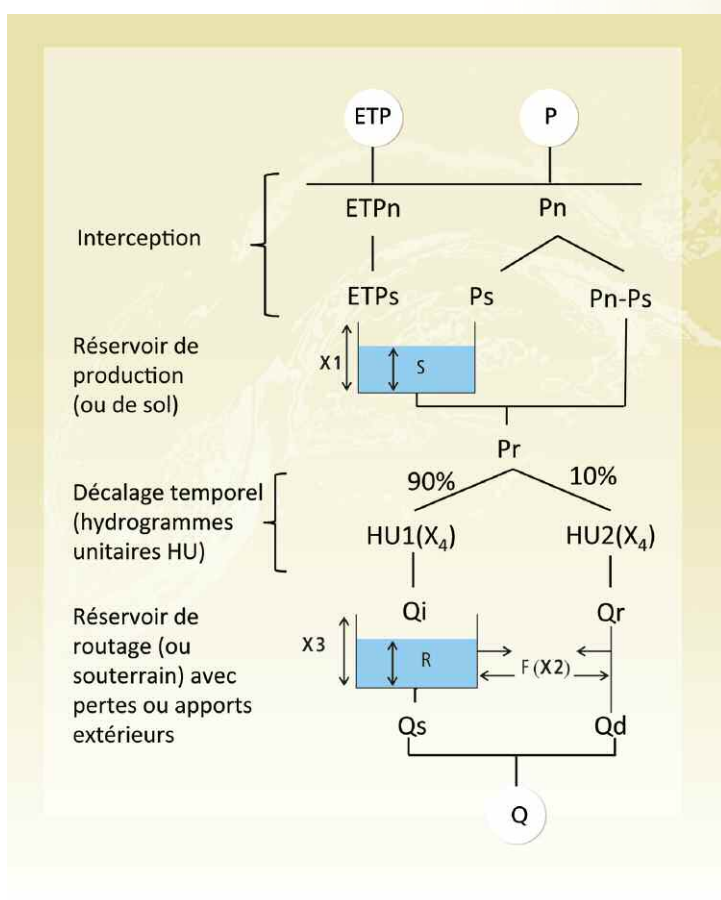
GR4J simule :

- l'évolution de l'humidité des sols en utilisant pour cela un réservoir (réservoir « sol » ou « de production »), qui calcule la part de la pluie qui contribue au débit ;
- l'évolution du débit au travers d'un réservoir de routage combiné à des hydrogrammes unitaires pour le transfert d'eau au sein du bassin.

La Figure 5 présente la structure du modèle GR4J ainsi que ses quatre paramètres libres.

Les entrées du modèle (en haut de la figure) sont des données de pluie (P) et d'évapotranspiration potentielle (ETP), mesurées ou estimées en certains points et calculées à l'échelle du bassin versant. A chaque pas de temps, le modèle calcule :

- le bilan en eau de surface (ou interception) à partir de la différence entre la pluie et l'évapotranspiration, appelée soit pluie nette (P_n) si $P > ETP$ et soit évapotranspiration nette (ETP_n) si $ETP > P$;
- l'actualisation du niveau du réservoir de production : soit le réservoir stocke une partie de la pluie nette notée P_s , soit il déstocke une partie de l'évapotranspiration nette notée ETP_s ; un débit percolé est calculé en fonction du taux de remplissage et retiré du réservoir ;
- la pluie qui contribue au débit (Pr) qui est la somme du débit percolé et de la pluie nette non routée vers le réservoir de production ; cette quantité Pr part à 90 % vers le réservoir de routage (ou réservoir souterrain) via un hydrogramme unitaire ($HU1$) qui retarde les écoulements, et à 10 % vers la rivière via un autre hydrogramme unitaire ($HU2$) ;
- les sorties des hydrogrammes unitaires notées Q_i (écoulement lent ou « routé ») pour l'hydrogramme 1 et Q_r (écoulement rapide ou « pseudo-direct ») pour l'hydrogramme 2 qui tiennent compte des pluies des pas de temps précédents restées en attente ;
- l'actualisation du niveau du réservoir de routage (ou réservoir souterrain) dont la sortie dépend de son taux de remplissage ;
- des pertes ou des apports extérieurs (F) qui peuvent être ajoutés ou ôtés de ce réservoir et du débit ruisselé Q_r (qui devient alors Q_d) ;
- le débit dans la rivière qui est constitué de la sortie du réservoir de routage et du débit Q_d .



Paramètres du modèle

- X1** : capacité maximale du réservoir de production (mm)
- X2** : coefficient d'échange souterrain (mm/j)
- X3** : capacité à un jour du réservoir de routage (mm)
- X4** : temps de base des hydrogrammes unitaires (j)

Variables de calcul (mm)

- ETP** : évapotranspiration potentielle
- ETPn** : évapotranspiration potentielle nette
- ETPs** : évapotranspiration déstockée du réservoir sol
- P** : pluie
- Pn** : pluie nette
- Ps** : pluie stockée dans le réservoir sol
- Pr** : pluie qui contribue au débit
- Qi** : entrée du réservoir
- Qr** : écoulement rapide ou pseudo-direct
- F** : pertes ou apports extérieurs
- Qs** : contribution du réservoir de routage au débit
- Qd** : contribution de l'écoulement pseudo-direct au débit
- Q** : débit à l'exutoire du bassin versant simulé

Figure 5. Structure et paramètres du modèle pluie-débit GR4J.

Pour en savoir plus : <http://webgr.irstea.fr/modeles/journalier-gr4j-2/> et Perrin *et al.* (2003)

● Qu'appelle-t-on « régionalisation » ?

Quand le bassin versant à étudier ne possède pas de mesures de débit à son exutoire, le calage des paramètres d'un modèle hydrologique n'est pas possible, et ces bassins requièrent un traitement spécifique. Les approches correspondantes sont appelées approches de régionalisation ; elles consistent à utiliser l'information hydrologique disponible sur d'autres bassins versants (appelés aussi « bassins versants donneurs ») pour la transférer vers le bassin d'intérêt non jaugé (« bassin versant receveur »).

Les approches de régionalisation s'appuient en général sur un des deux principes suivants (Figure 6) :

- la proximité géographique entre le bassin d'intérêt et les bassins jaugés : la faible variation spatiale des conditions physiques environnantes peut justifier un transfert d'information entre bassins voisins (voir l'exemple de l'Encart 5).

- la similarité physique entre le bassin d'intérêt et les bassins jaugés : cette approche repose sur le fait que les bassins avec des caractéristiques physiques semblables peuvent avoir une réponse hydrologique proche, même si les bassins sont éloignés géographiquement.

En France, l'approche fondée sur la proximité géographique a donné les meilleurs résultats (Oudin *et al.*, 2008).

Dans tous les cas, le bassin d'intérêt et les bassins jaugés utilisés pour la régionalisation ne doivent pas être fortement influencés par des activités humaines spécifiques à un bassin (présence de barrage dans le bassin versant par exemple), car cela limiterait la similarité de fonctionnement hydrologique.

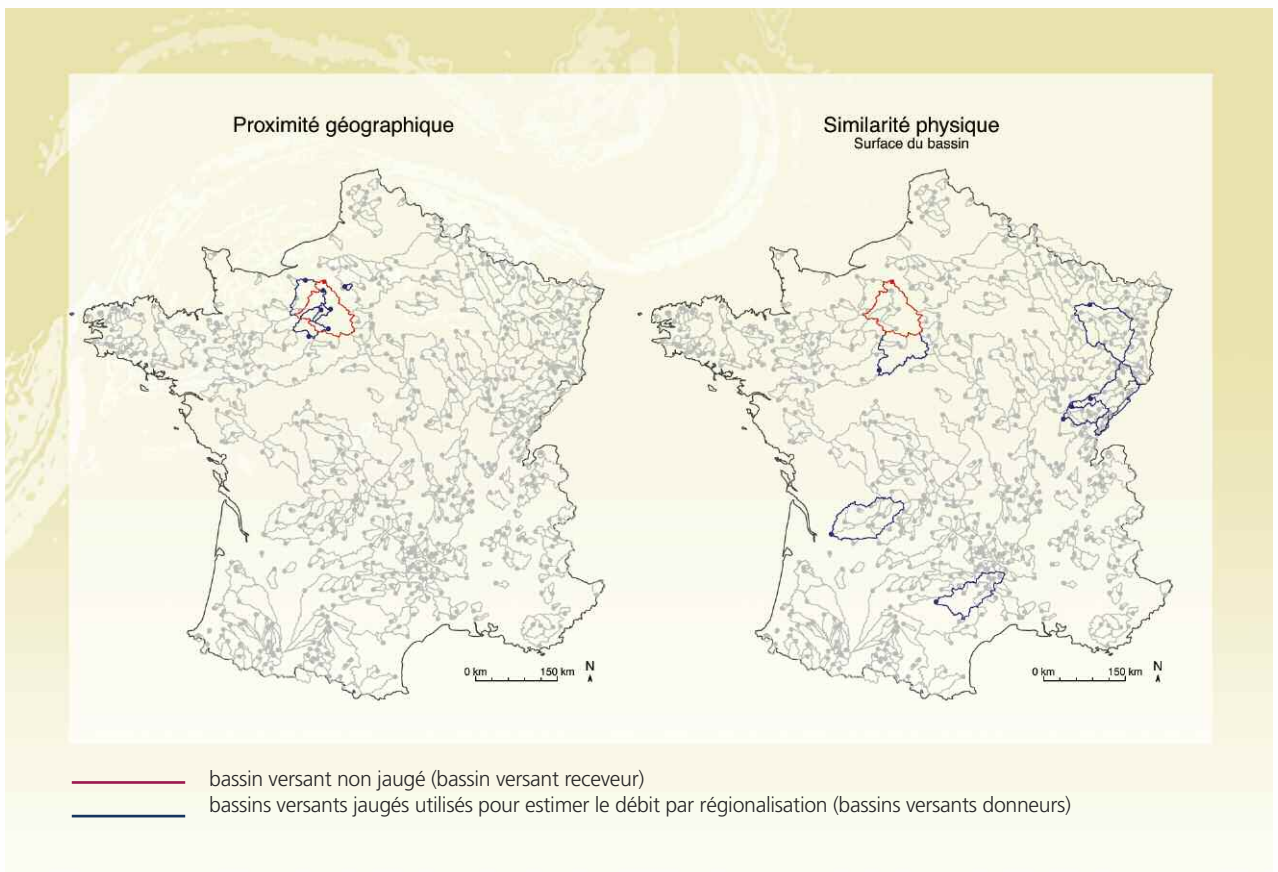


Figure 6. Deux approches de régionalisation utilisées pour modéliser le débit d'un bassin non jaugé (en rouge) à partir de bassins jaugés (en bleu) : approche basée sur la proximité géographique entre le bassin receveur et les bassins versants donneurs (à gauche) et approche basée sur la similarité physique entre le bassin receveur et les bassins donneurs, ici la superficie du bassin versant (à droite).

Régionalisation basée sur la proximité géographique

En France, la méthode basée sur la proximité géographique, utilisée avec des modèles pluie-débit, fournit la meilleure solution de régionalisation, en comparaison avec la régionalisation basée sur des similarités physiques.

La régionalisation basée sur la proximité géographique consiste à transférer les paramètres d'un modèle hydrologique calés sur les bassins voisins pour calculer le débit sur le bassin non jaugé. Les bassins jaugés voisins sont qualifiés de « donneurs » et le bassin non jaugé de « receveur ».

La régionalisation avec le modèle GR4J (Encart 4 p. 8) consiste par exemple, pour un bassin versant non jaugé donné, à caler les paramètres du modèle pour les dix bassins versants voisins sélectionnés sur une période de 10 ans (ici 1997-2006). Puis, 10 simulations du débit journalier du bassin non jaugé sont effectuées (avec chacun des 10 jeux de paramètres transférés depuis les voisins calés), en utilisant les données de pluie et d'évapotranspiration potentielle du bassin non jaugé en entrée du modèle. Dix chroniques de débit journalier pour le bassin cible sont alors obtenues (Figure 7).

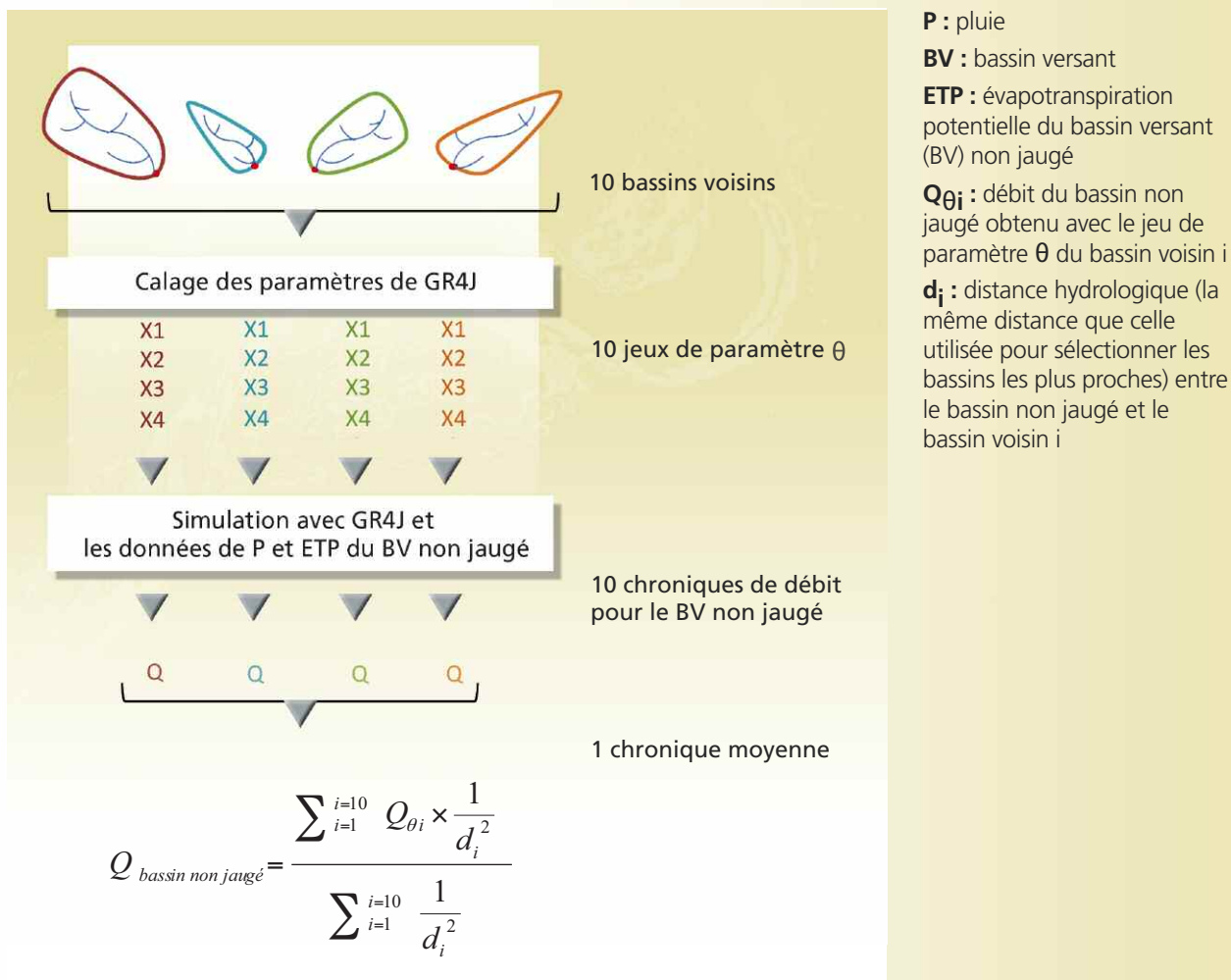


Figure 7. Schéma explicatif de la méthode de régionalisation basée sur la proximité géographique.

La chronique de débit simulé retenue résulte d'une pondération utilisant la distance entre les bassins voisins et le bassin non jaugé, comme présenté dans l'équation de la Figure 7 (page précédente). La distance séparant deux bassins versants combine la distance séparant les exutoires de deux bassins et celle séparant leurs centres de gravité, en donnant davantage de poids à cette dernière. Cette distance s'écrit alors de la façon suivante :

$$d = 0,2 \times d_{\text{exutoire}} + 0,8 \times d_{\text{centre}} \quad \text{Eq. 2}$$

La méthode consistant à obtenir une chronique moyenne en pondérant celles obtenues avec les différents jeux de paramètres des voisins, est plus cohérente que celle consistant à moyenner les paramètres des bassins voisins, puisqu'elle utilise des jeux de paramètres non modifiés. Ceci permet ainsi d'utiliser toute l'information contenue dans les paramètres des voisins calés localement.

Pour en savoir plus : Oudin *et al.* (2008), McIntyre *et al.* (2005)

5

● Quels résultats peut-on attendre d'une méthode de régionalisation ?

L'approche de régionalisation basée sur la proximité géographique (Encart 5 page 11) a été testée sur 609 bassins versants métropolitains équipés de station hydrométrique

et sans impact anthropique majeur identifié sur l'hydrologie. Cet échantillon de bassins versants représente des conditions climatiques variées (Figure 8).

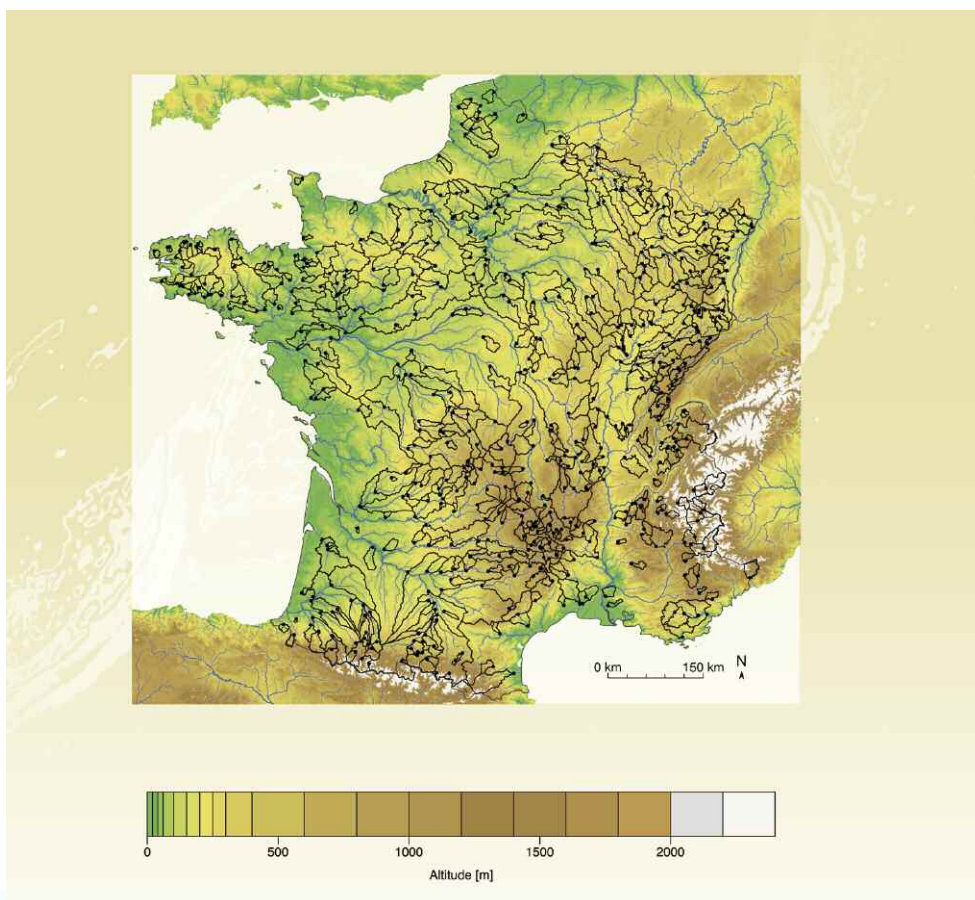


Figure 8. Echantillon des 609 bassins versants français sélectionnés pour l'étude.

Chaque bassin versant a été utilisé comme bassin versant « receveur » (c'est-à-dire considéré comme dépourvu de station hydrométrique) puis le résultat de la régionalisation utilisant les paramètres calés sur les bassins versants jaugés voisins a été comparé au débit mesuré à la station. Différentes caractéristiques de débit régulièrement utilisées pour la gestion de la ressource en eau ont été étudiées :

- simulation d'une chronique de débit journalier en mode non-jaugé : pour cette simulation, le modèle hydrologique utilisé est le modèle global pluie-débit GR4J (Encart 4 p 8) ; les paramètres de ce modèle sont obtenus à l'aide d'une méthode de régionalisation (Encart 5 p 11) ;
- calcul du module (débit moyen pluriannuel) en mode non-jaugé : pour ce calcul, une chronique de débit de 30 ans est simulée à l'aide du modèle hydrologique GR4J et d'une méthode de régionalisation (Encart 5 p 11), puis moyennée ;
- calcul du débit de crue décennale en mode non-jaugé : des chroniques de 30 ans simulées par le modèle GR4J ont également été utilisées pour le calcul de débit de crue décennale (période de retour 10 ans) ; la loi de Gumbel (Lang et Lavabre, 2007) a été utilisée en ajustant les paramètres avec la méthode des moments à partir de la distribution des débits maximaux journaliers de chaque année ;

- calcul d'une caractéristique d'étiage en mode non jaugé, le QMNA5 : ce débit est le débit mensuel minimal de période de retour 5 ans ; la méthode de référence utilisée pour estimer sa valeur est un ajustement statistique log-normal sur les valeurs minimales annuelles, en utilisant des simulations de 30 années de GR4J.

La Figure 9 illustre un exemple de régionalisation du débit journalier sur le bassin de l'Andelot à Loriges. Le succès de la régionalisation est évalué par la proximité relative des courbes du débit régionalisé et du débit observé.

Les performances de la méthode de régionalisation obtenues sur l'ensemble de l'échantillon de 609 bassins versants français diffèrent selon l'objectif de simulation recherché : les simulations de débit présentent en général des erreurs moindres pour les valeurs moyennes des débits et des écarts plus marqués pour les débits « extrêmes » (crue et étiage) (Figure 10). De même, les estimations semblent moins bonnes pour les petits bassins versants que pour les grands. Il est par ailleurs intéressant de noter qu'il n'y a pas de relation évidente entre les performances de la régionalisation et la distance des bassins voisins utilisés pour estimer le débit.

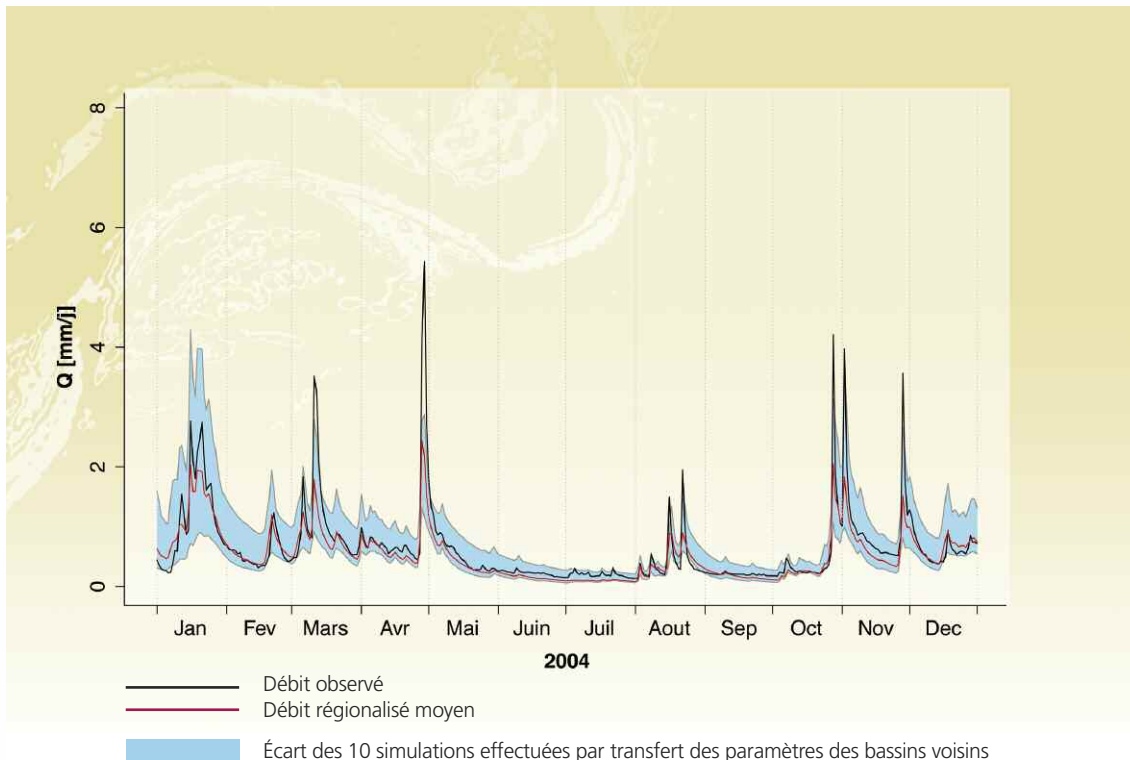


Figure 9. Chroniques de débit observé et de débits simulés par régionalisation sur le bassin de l'Andelot à Loriges (K3153010).

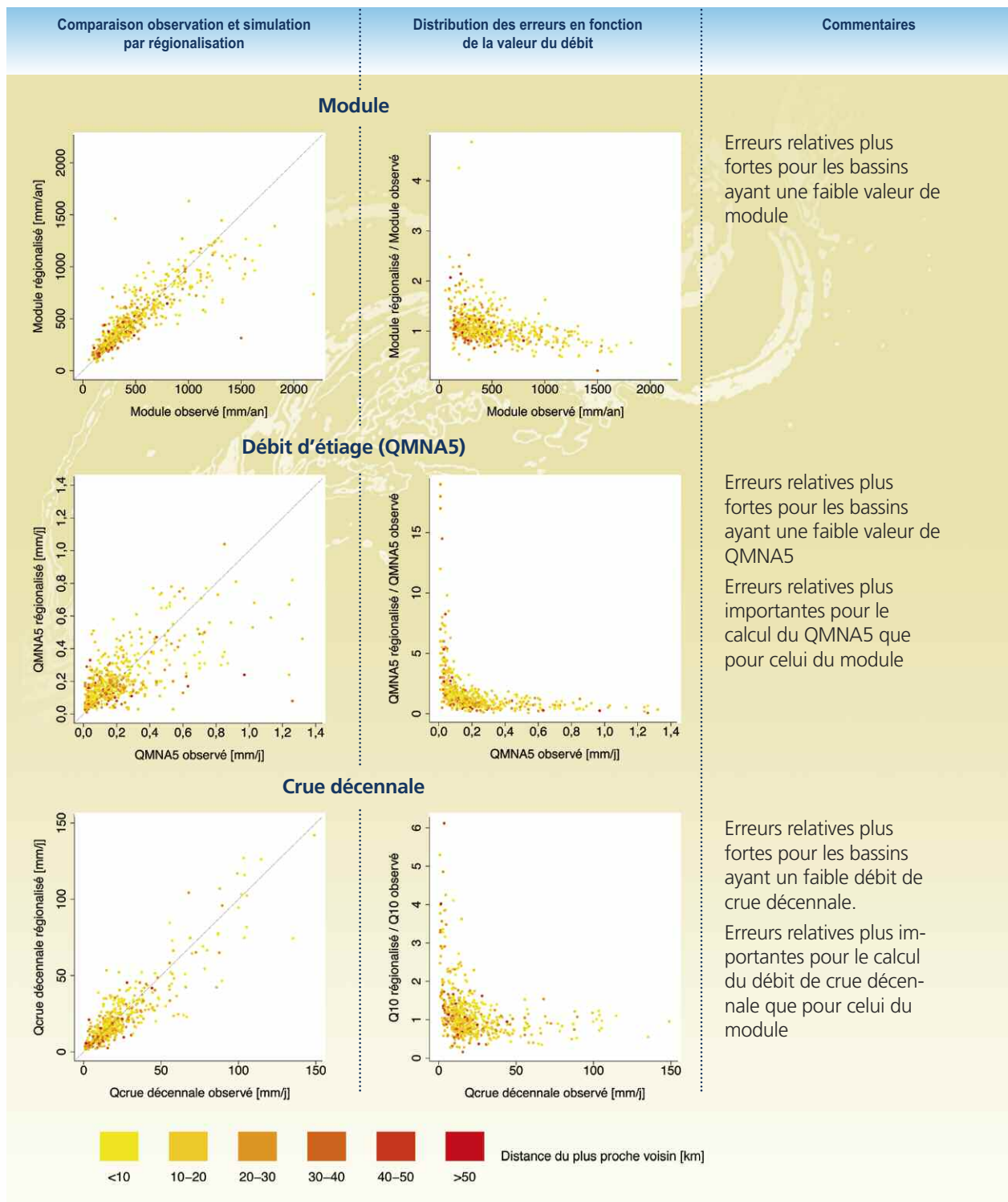


Figure 10. Comparaison des performances obtenues avec la méthode de régionalisation pour le calcul du module (débit moyen pluriannuel), du débit d'été (QMNA5) et du débit de crue décennale.

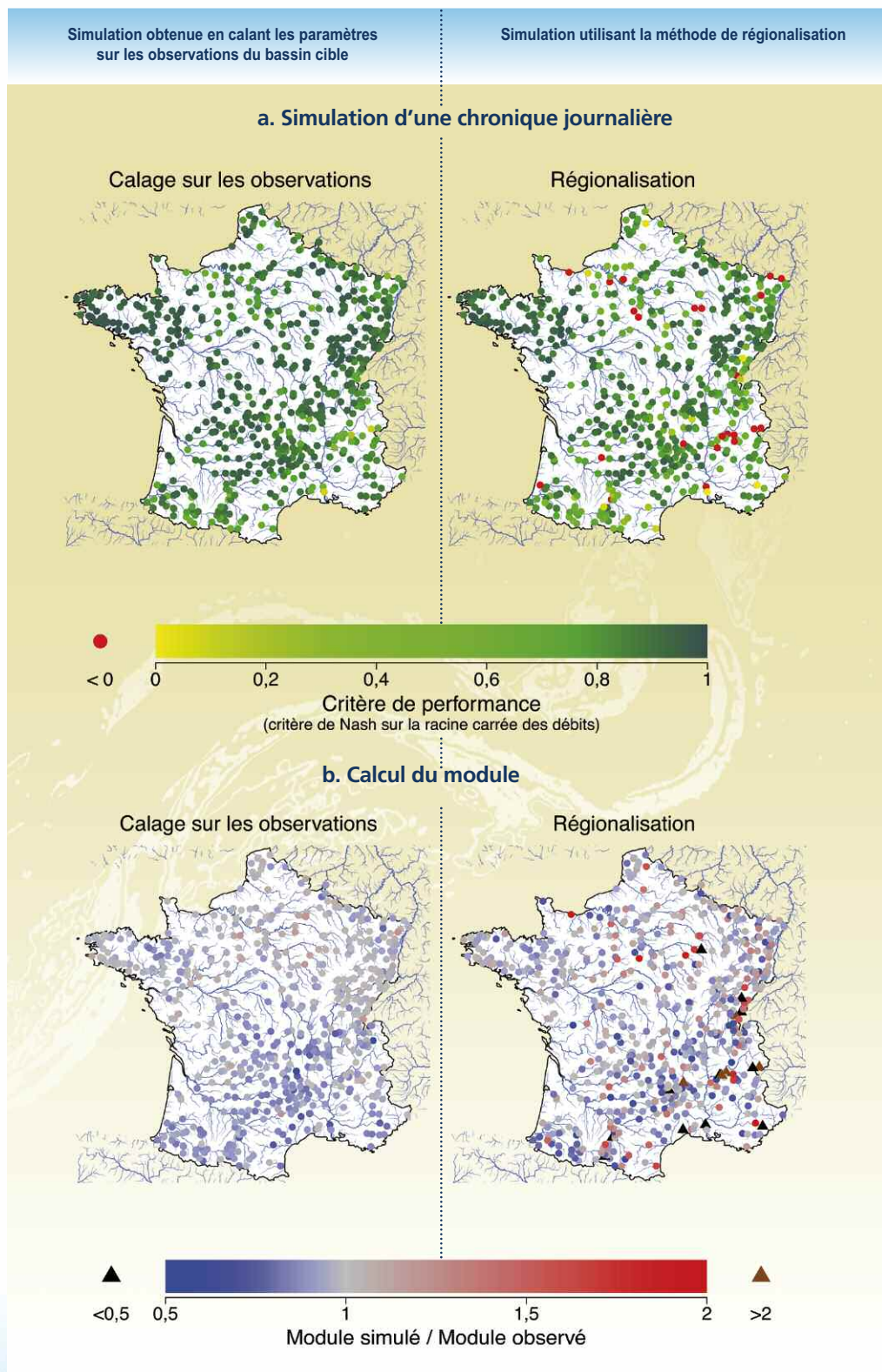
● Les performances de régionalisation sont-elles meilleures dans certaines zones géographiques ?

Comme les performances de régionalisation dépendent de l'homogénéité des caractéristiques climatiques et physiques des bassins versants donneurs et receveurs (géologie, pente, occupation du sol), certaines régions sont plus adaptées que d'autres à l'utilisation de cette technique. Les cartes de la Figure 11, permettent de

visualiser l'existence éventuelle d'un caractère régional expliquant les performances des calculs hydrologiques : les performances du modèle calé avec les débits observés sur le bassin versant cible sont présentées ainsi que celles du modèle régionalisé à l'aide des paramètres des bassins voisins.

Pour la simulation du débit journalier (Figure 11a), on observe un effet régional, aussi bien en situation jaugée que non jaugée. Le massif Armoricain par exemple se caractérise par des performances très élevées aussi bien au calage qu'en régionalisation. A l'inverse, les simulations semblent moins performantes en Normandie, en particulier en régionalisation. Ceci s'explique par la présence de craie

parfois karstique, favorisant de manière imprévisible les échanges souterrains entre bassins voisins et rendant donc le transfert d'information entre bassins difficile. En général, si le modèle GR4J a des difficultés à reproduire le débit, ces difficultés s'aggraveront en régionalisation. Pour le calcul du module (Figure 11b), aucune tendance ne semble se dégager clairement.



a. Cartographie des performances de simulation des débits journaliers avec et sans régionalisation. La qualité de la simulation est évaluée selon le critère de Nash-Sutcliffe calculé sur la racine carrée des débits [ce critère varie entre $(-\infty ; 1)$; 1 est la valeur optimale]

b. Cartographie des performances du calcul du module avec et sans régionalisation. La qualité du calcul est évaluée selon le rapport du module obtenu en régionalisation sur le débit observé (1 étant la valeur optimale)

● une station
Couleur du point : performance du modèle

Figure 11. Cartographie des performances du modèle hydrologique avec et sans régionalisation.

● Limites de la méthode de régionalisation

La méthode de régionalisation mise en œuvre pour ce test donne des résultats satisfaisants : la valeur médiane du critère de performance utilisé [critère de Nash-Sutcliffe qui varie entre $(-\infty ; 1)$; 1 étant la valeur optimale] est de 0,83 en régionalisation contre 0,88 en calage. Elle a cependant, comme toute méthode, ses limites et ne peut être appliquée en tout point de cours d'eau. D'abord, il faut disposer de bassins donateurs voisins ayant un comportement hydrologique similaire à celui du bassin receveur. De plus, comme indiqué précédemment, il est nécessaire que ces bassins ne soient pas influencés par des aménagements (barrage, transferts d'eau). Enfin, il faut également qu'ils n'aient pas de comportement hydrologique particulier, comme l'exemple ci-après.

Ce cas de comportement hydrologique particulier est illustré avec deux bassins situés en bordure méditerranéenne, il s'agit du Jabron à Comps-sur-Artuby (code hydro de la station : X2305010) et de la Siagne à Callian (code hydro de la station : Y5514040)

(code hydro de la station : Y5514040). Pour ces deux bassins, nous obtenons de bons résultats lors du calage du modèle directement sur la station (le modèle s'adapte bien aux spécificités de chacun des bassins). Toutefois, le calcul régionalisé du module donne de mauvais résultats (Figure 12) : dans le premier cas (Jabron à Comps-sur-Artuby, code hydro de la station : X2305010) le module est surestimé d'un facteur 2, dans l'autre il est sous-estimé d'un facteur 2 (Siagne à Callian, code hydro de la station : Y5514040). Or, leur proximité fait que la méthode de régionalisation basée sur la proximité géographique les utilise comme donateurs respectifs.

Pour comprendre l'origine de ces biais, il est pratique de représenter chaque bassin dans le graphe adimensionnel de Turc-Budyko qui permet de détecter les bassins non conservatifs c'est-à-dire ceux dont le bilan en eau n'est pas respecté (Encart 6).

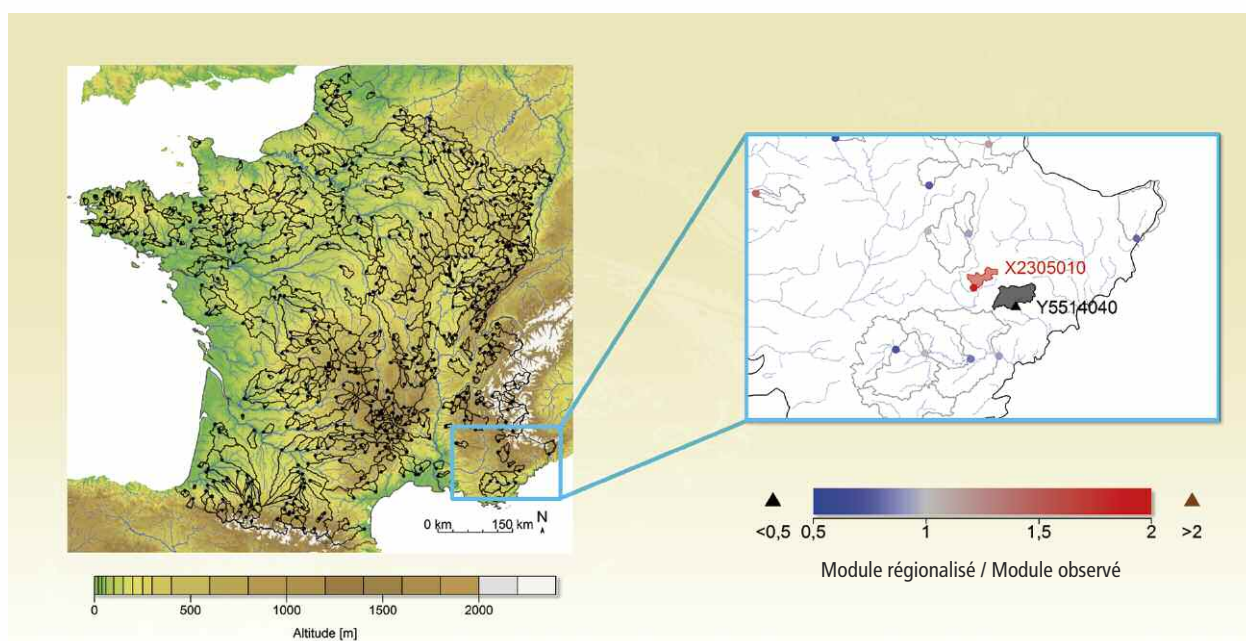


Figure 12. Cartographie des performances du calcul du module par régionalisation : zoom sur les bassins du Jabron à Comps-sur-Artuby (code hydro : X2305010) et de la Siagne à Callian (code hydro : Y5514040). La qualité du calcul est évaluée selon le rapport du module régionalisé sur le module observé (dont la valeur optimale est de 1).

Comment savoir si un bassin versant est conservatif ? Utilisation du graphique adimensionnel de Turc-Budyko pour analyser le bilan en eau d'un bassin

Le graphique adimensionnel de Turc-Budyko relie le coefficient d'écoulement à l'indice d'aridité d'un bassin versant. Le coefficient d'écoulement est le rapport entre le débit annuel rapporté à la surface du bassin (en mm/an) et la pluie annuelle du bassin (en mm/an) et est noté Q/P ; l'indice d'aridité est le rapport entre la pluie annuelle (en mm/an) et l'évapotranspiration potentielle annuelle (en mm/an) et est noté P/ETP .

Un bassin conservatif est un bassin dont le bilan hydrique est respecté et se positionnera ainsi dans la zone blanche du graphique adimensionnel (Figure 13), zone limitée par les limites suivantes :

- limite de mesure : $Q \geq 0$;
- limite d'énergie : $Q \geq P - ETP$; le rendement minimum des pluies (le ratio Q/P) d'un bassin dépend de l'énergie fournie par les rayonnements visibles et infra-rouges : il ne peut pas perdre plus d'eau dans l'atmosphère qu'il n'y a d'énergie pour l'évaporer ;
- limite d'eau : $Q \leq P$: un bassin ne peut pas fournir plus d'eau que ce qu'il reçoit par les précipitations sur son bassin versant.

Ces limites sont issues de l'équation de bilan hydrique qui, pour un bassin conservatif, donc situé dans la zone blanche, s'écrit : $P = Q + \alpha \cdot ETP$ avec $\alpha \leq 1$.

Quand un bassin se situe en dehors de la zone blanche, il est nécessairement non conservatif. Plusieurs raisons peuvent être invoquées :

- quand le bassin se situe en-dessous de la ligne d'énergie (zone rouge), $Q < P - ETP$. Ceci se produit généralement dans le cas de bassins qui « fuient », à savoir, un bassin versant qui, soit contribue à la recharge de l'aquifère régional, soit dirige ses flux souterrains vers un autre bassin. Cela peut également s'expliquer par une pluie surestimée et/ou une évapotranspiration potentielle sous-estimée ;
- quand le bassin se situe au-dessus de la limite d'eau (zone bleue), $Q > P$. Ceci se produit généralement dans le cas d'un bassin versant dont la pluie est sous-estimée (fréquent en région montagneuse). Cela peut également être causé par un écoulement souterrain en provenance d'un bassin versant voisin, fréquent dans les zones karstiques, ou par une surestimation du débit.

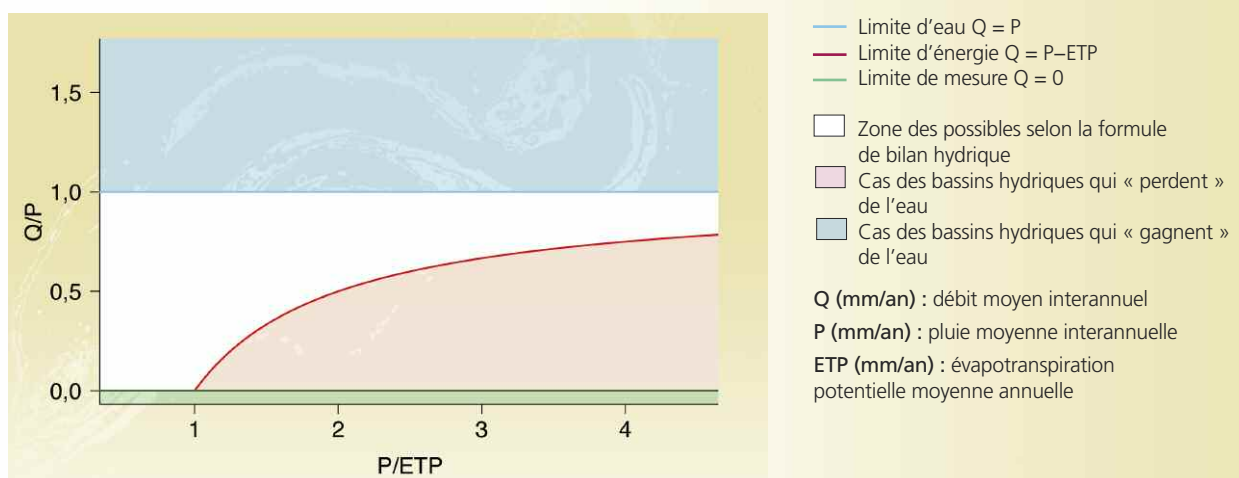


Figure 13. Graphique adimensionnel de Turc-Budyko reliant le coefficient d'écoulement (rapport entre débit annuel sur pluie annuelle du bassin Q/P) à l'indice d'aridité (rapport entre pluie annuelle et évapotranspiration potentielle annuelle P/ETP).

La Figure 14 montre que le bassin de la Siagne à Callian (code de la station Y5514040) se situe au-dessus de la limite de l'équilibre du bilan en eau, c'est-à-dire dans la zone où les bassins « gagnent » nécessairement de l'eau (le débit annuel est supérieur à la pluie annuelle tombée sur le bassin versant $Q > P$). A l'inverse, le bassin du Jabron à Comps-sur-Artuby (code de la station X2305010) se situe en dessous de la limite de l'équilibre du bilan énergétique, c'est-à-dire dans la zone où les bassins « perdent » de l'eau (le débit annuel est inférieur à la pluie moins l'évapotranspiration annuelle du bassin $Q < P - ETP$: un bassin ne peut pas perdre plus d'eau dans l'atmosphère qu'il n'y a d'énergie pour l'évaporer). Il est donc vraisemblable que les limites du bassin versant utilisées pour la modélisation (qui s'appuient sur la topographie) ne représentent pas le bassin versant drainé par la rivière : une partie de l'eau qui tombe sur le bassin topographique

du Jabron s'écoule vraisemblablement vers un autre bassin ; le bassin de la Siagne au contraire bénéficie d'écoulements souterrains venant d'un autre bassin versant. Des problèmes de mesure de débit ou de pluie de bassin peuvent également être à l'origine du problème.

La méthode de régionalisation des paramètres ne permet pas de rattraper de telles différences de comportement car elle ne corrige pas les données d'un bassin qui « perd » de l'eau pour les adapter à un voisin qui en « gagne » ou inversement. Ceci explique les mauvais résultats obtenus pour ces deux bassins pour le calcul du module en régionalisation.

Il est donc important de vérifier au préalable que les bassins versants utilisés comme « donneurs » pour la régionalisation soient cohérents pour ce qui est du bilan hydrologique, en plus d'avoir une hydrologie peu influencée par les aménagements anthropiques.

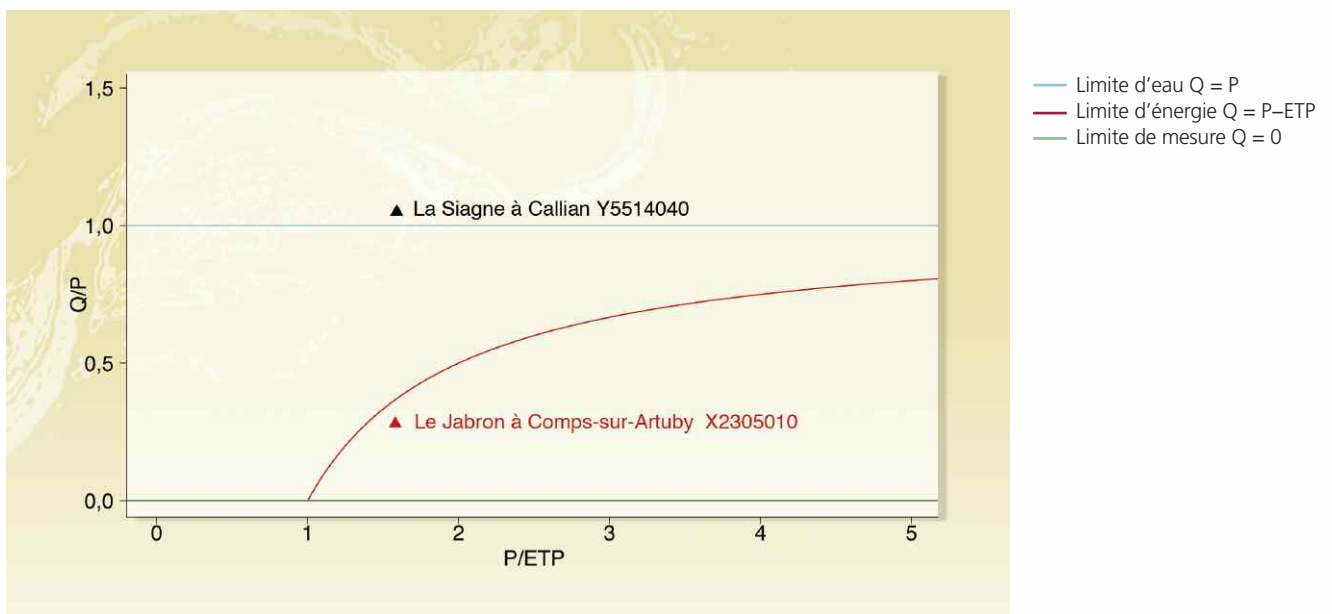


Figure 14. Analyse des bassins versants du Jabron à Comps-sur-Artuby (code hydro de la station : X2305010) et de la Siagne à Callian (code hydro de la station : Y5514040) sur le graphique adimensionnel reliant le coefficient d'écoulement (rapport entre débit annuel sur pluie annuelle du bassin Q/P) à l'indice d'aridité (rapport entre pluie annuelle et évapotranspiration potentielle annuelle P/ETP).

Le bassin du Jabron à Comps-sur-Artuby se situe en-dessous de la limite rouge, c'est-à-dire dans la zone où les bassins « perdent » de l'eau. Le bassin de la Siagne à Callian se situe au-dessus de la limite bleue, c'est-à-dire dans la zone où les bassins « gagnent » de l'eau.

III- Quel est l'impact de la disparition de stations de mesure sur la qualité de la régionalisation ?

● Présentation de la méthode

L'impact de la baisse de densité des stations de mesure sur la qualité d'estimation du débit dans les rivières dépourvues de station a été évalué en utilisant la méthode de régionalisation présentée précédemment (Encart 5 p 11). L'approche utilisée est celle du désert hydrométrique développée par Boldetti (2012) qui consiste à exclure progressivement les bassins donneurs les plus proches : les paramètres sont transférés de bassins versants voisins qui sont de plus en plus éloignés du bassin versant cible non jaugé, en fixant une limite inférieure en dessous de laquelle les voisins sont écartés (Figure 15).

Différents seuils de distance hydrologique telle que définie précédemment (Encart 5 p 11), ont été testés : 0 (sans limite de distance, toutes les stations voisines sont considérées), 10 km (on exclut les stations situées à moins de 10 km du bassin receveur), 20, 30, ..., 100, 150, ..., 250 km. Ces seuils d'éloignement ont été choisis à partir de la distribution des distances des dix bassins versants les plus proches pour les 609 bassins versants de l'échantillon : 80% des distances sont comprises entre 20 et 50 km, la valeur moyenne de cette distance est de 36 km et la distance minimale est de 15 km.

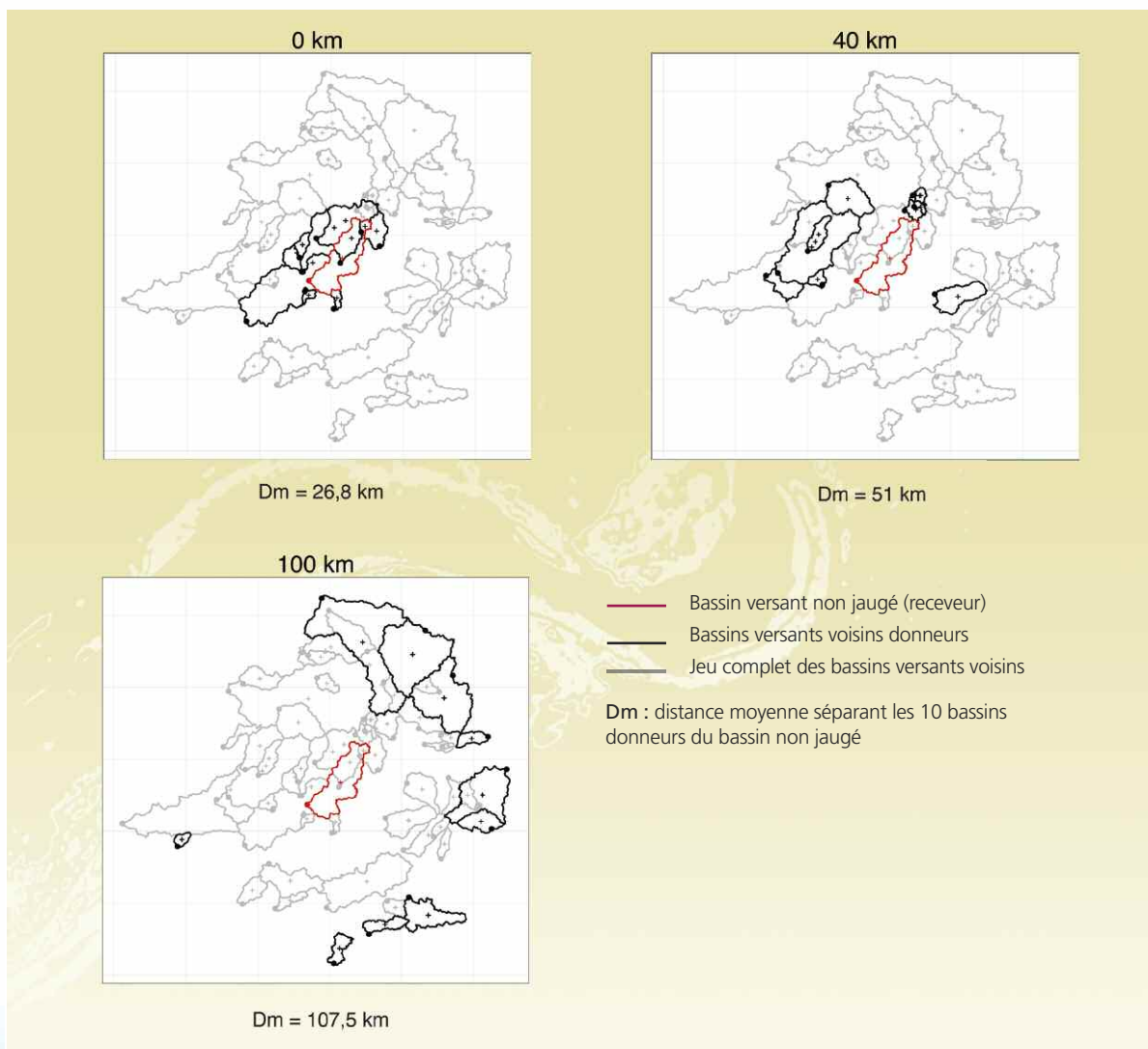


Figure 15. Illustration d'une sélection de bassins voisins avec le réseau complet (distance = 0 km) et lorsque la méthode du désert hydrométrique est appliquée pour différentes limites de distance (40 et 100 km).

Résultats

Les graphiques de la Figure 16 présentent la distribution des performances obtenues pour l'ensemble de l'échantillon de bassins versants en fonction de la distance des

plus proches voisins considérés pour les différents calculs hydrologiques envisagés.

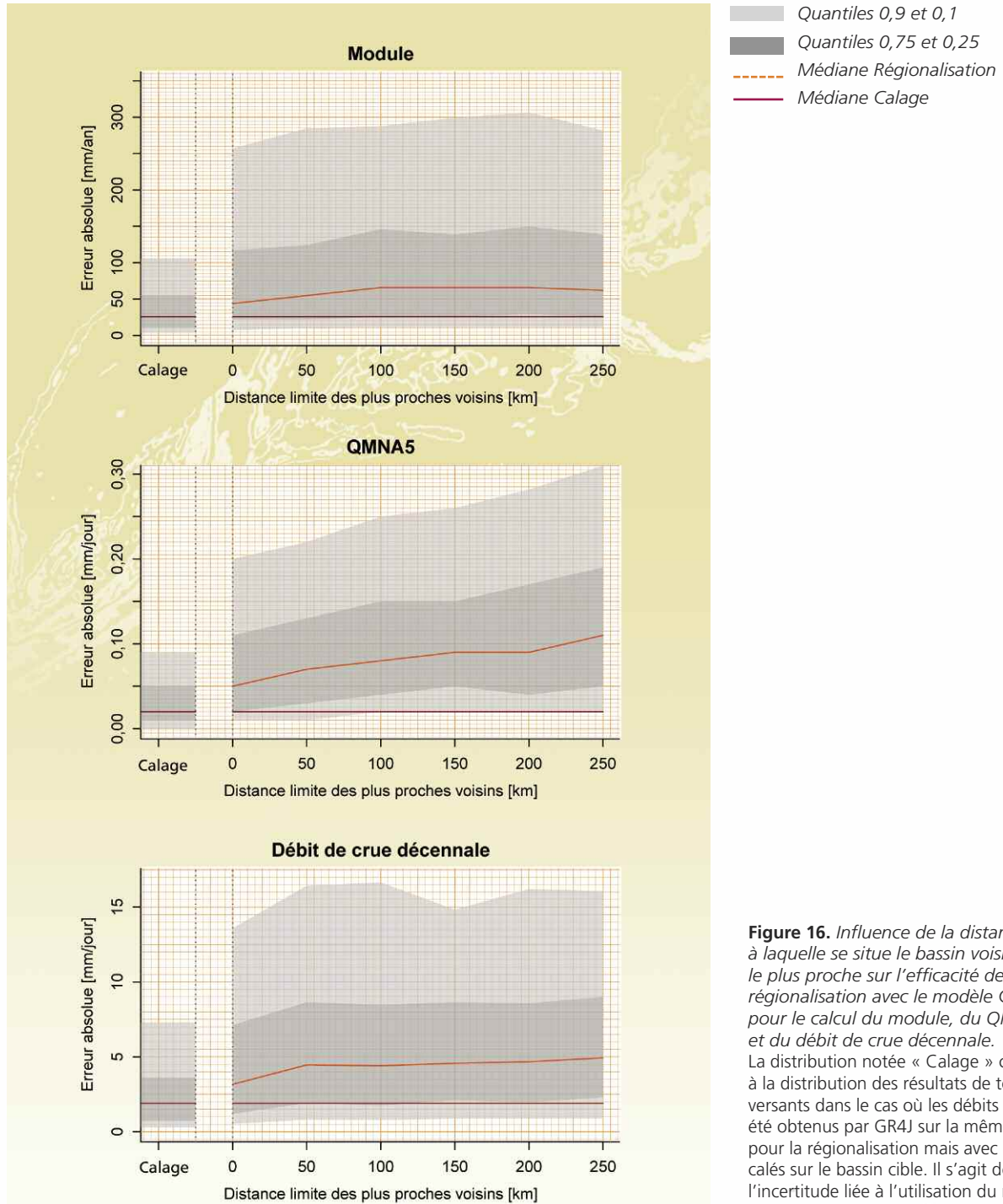


Figure 16. Influence de la distance à laquelle se situe le bassin voisin le plus proche sur l'efficacité de la régionalisation avec le modèle GR4J pour le calcul du module, du QMNA5 et du débit de crue décennale. La distribution notée « Calage » correspond à la distribution des résultats de tous les bassins versants dans le cas où les débits simulés ont été obtenus par GR4J sur la même période que pour la régionalisation mais avec les paramètres calés sur le bassin cible. Il s'agit donc de l'incertitude liée à l'utilisation du modèle pour simuler le comportement du bassin. La distance 0 km correspond au cas où aucune limite de distance des plus proches voisins n'est appliquée.

Le premier résultat important de cette étude est que, pour tous les calculs de débits envisagés, l'utilisation de la régionalisation pour le calcul des débits du bassin non jaugé apporte de moins bons résultats que l'utilisation du modèle calé sur les données mesurées ; l'erreur augmente de 71 % pour le calcul du module, de 67 % pour le calcul de débit de crue décennale et de 150 % pour le calcul du QMNA5 (Tableau 1). Ce résultat était attendu puisque le cas de référence correspond au cas « idéal » lorsque les données de débit sur le bassin cible sont disponibles pour caler les paramètres du modèle : la qualité de l'information issue de la régionalisation est loin de remplacer celle obtenue par les mesures des stations hydrométriques.

Le deuxième résultat à noter est que pour chacun des débits simulés, les performances en régionalisation se dégradent lorsque la distance au plus proche voisin augmente mais atteint un palier à partir d'une distance d'environ 100 km pour le module, 250 km pour le QMNA5 et 50 km pour la crue décennale. Ainsi, lorsque les bassins voisins sont au-delà de ces limites, le rôle de la proximité géographique des bassins voisins semble s'affaiblir. A partir de cette distance, la méthode engendre de trop fortes erreurs, la notion de proximité géographique comme indicateur de similarité physique perdant alors de son sens.

Par ailleurs, cette baisse d'efficacité en fonction de la distance des plus proches voisins, non négligeable, est variable entre les différents calculs (Tableau 1). Ce sont les bas débits qui ont une plus forte augmentation de l'erreur lorsque l'on passe d'un modèle calé à un modèle régionalisé ou d'un modèle régionalisé 0 km à un modèle régionalisé 150 km. Ceci s'explique par le fait qu'une même différence en valeur absolue aura un impact relatif beaucoup plus important pour les faibles valeurs de débit que pour des débits moyens ou des hauts débits. Nous constatons que la chute de performance, lorsque la distance du plus proche voisin augmente de 0 à 150 km, est inférieure aux erreurs dues à la méthode de régionalisation elle-même pour tous les calculs.

Enfin, les graphiques de la Figure 16 pourraient être utilisés comme graphiques de référence pour connaître les performances auxquelles on pourrait s'attendre dans le cas d'un bassin versant non jaugé. En effet, il est facile d'obtenir la distance séparant un bassin non jaugé de son plus proche voisin. A partir de cette distance et en utilisant ces graphiques, il devient possible d'estimer les performances moyennes attendues pour chacun de ces calculs et leurs incertitudes.

Tableau 1

Erreur relative médiane des performances entre le modèle calé et les modèles régionalisés avec des distances limites des plus proches voisins de 0 km et 150 km et erreur relative des performances entre les modèles régionalisés 0 km et 150 km pour tous les calculs hydrologiques envisagés.

Calculs	Modèle calé et modèle régionalisé 0 km	Modèle calé et modèle régionalisé 150 km	Modèles régionalisés 0 km et 150 km
Module	71 %	157 %	50%
Débit de crue décennale	67 %	142 %	45%
QMNA5	150 %	350 %	80%

IV- Comment utiliser des données hydrométriques limitées en quantité ?

Le chapitre précédent a montré que l'estimation de débit sur des bassins non jaugés est source d'incertitudes. Toutefois, il existe beaucoup d'endroits où, soit des séries courtes de débit sont disponibles, soit un faible nombre de mesures de débit ont été réalisées ponctuellement. Utiliser des données de débit non continues pourrait ainsi peut-être permettre d'améliorer les performances des

calculs hydrologiques par rapport à un cas où aucune mesure de débit n'est disponible. Cependant, la difficulté de prendre en compte ces quelques mesures de débit est que le modèle adapté à ces mesures risque d'être peu robuste, avec des paramètres ne représentant pas le comportement général du bassin mais seulement la période à laquelle ont été effectuées les mesures.

● Comment utiliser les données ponctuelles de débit ?

■ Pour l'estimation de paramètres de modèle hydrologique

Une méthode combinatoire visant à paramétrer un modèle pluie-débit sur des bassins très peu jaugés a été développée. Elle consiste à combiner une information partielle fournie par les quelques mesures de débit du bassin cible qui permet de caler un jeu de paramètres, avec une information régionale, fournie par une méthode de régionalisation (ici, la proximité géographique) (Figure 17). Les quelques mesures sont choisies aléatoirement.

L'approche combinatoire consiste à établir plusieurs classements des jeux de paramètres et à les combiner. La base de données de bassins jaugés permet de proposer des jeux de paramètres, que l'on peut classer :

- soit en fonction de la proximité géographique des bassins considérés avec le bassin cible non jaugé ; on obtient un rang de classement régional noté r^{reg} ;
- soit en fonction de l'erreur de simulation calculée en comparant les débits simulés et le petit nombre de jaugeages : les jeux de paramètres sont classés suivant cette information locale ; on obtient un rang de classement local noté r^{loc} .

Le classement des jeux de paramètres candidats se fait sur la base d'un rang combiné :

$$r_j = \alpha \cdot r_j^{reg} + (1 - \alpha) \cdot r_j^{loc} \quad \text{Eq. 3}$$

avec α , le coefficient pondérateur variant entre 0 et 1 exprimant l'importance relative de l'information régionale par rapport à l'information locale.

Quand α est égal à 1, la méthode équivaut à une simple approche de régionalisation et quand α est égal à 0, la méthode utilise seulement les quelques mesures ponctuelles obtenues sur le bassin cible pour sélectionner les jeux de paramètres.

Enfin, les sept meilleurs jeux de paramètres en termes de classement combiné r sont sélectionnés. Sept simulations sont ainsi réalisées et une simulation moyenne est produite.

Les tests effectués sur les 609 bassins versants de l'échantillon avec plusieurs scénarios de jaugeages ont permis d'obtenir une relation entre α optimale et le nombre de jaugeages réalisés (Figure 18).

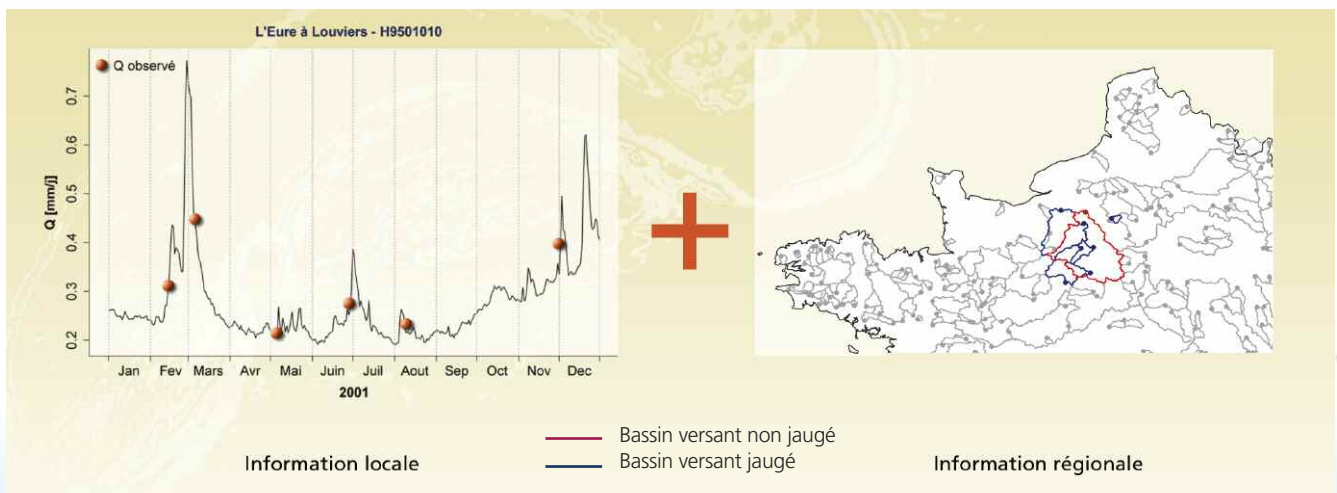


Figure 17. Schéma explicatif de la méthode utilisant les mesures aléatoires combinées à une méthode de régionalisation pour paramétrer un modèle pluie-débit.

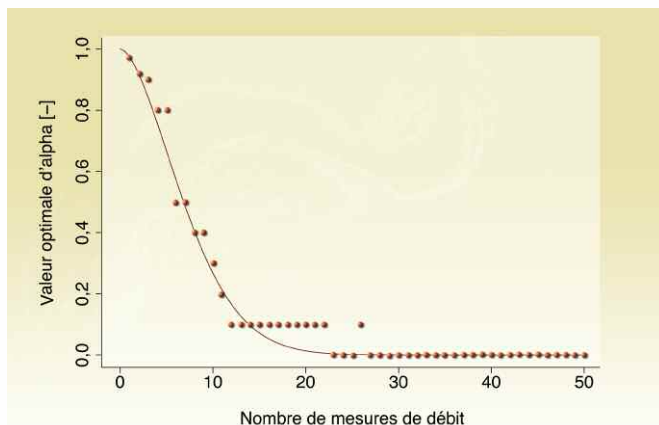


Figure 18. Valeur optimale du poids donné à l'information de jaugeage par rapport à l'information des stations voisines (coefficient alpha, équation 3 dans le texte) en fonction du nombre de jaugeages réalisés (N).

La Figure 19 présente les performances obtenues en appliquant l'approche combinatoire décrite précédemment sur les 609 bassins versants de l'échantillon, en comparaison avec celles du modèle GR4J obtenues dans le cas où les bassins versants sont totalement jaugeés et dans le cas où ils ne le sont pas du tout. Ainsi, cette méthode permet d'obtenir des résultats intermédiaires entre le cas d'un bassin totalement jaugeé et celui d'un bassin totalement non

jaugeé. Au-delà d'une vingtaine de jaugeages ponctuels, le gain de performance est moins important ; cela correspond donc au nombre de jaugeages minimal à effectuer pour estimer les débits lorsqu'il n'y a pas de stations de mesure. L'utilisation de données de jaugeages ponctuelles améliore les performances par rapport à la simple utilisation de la méthode de régionalisation.

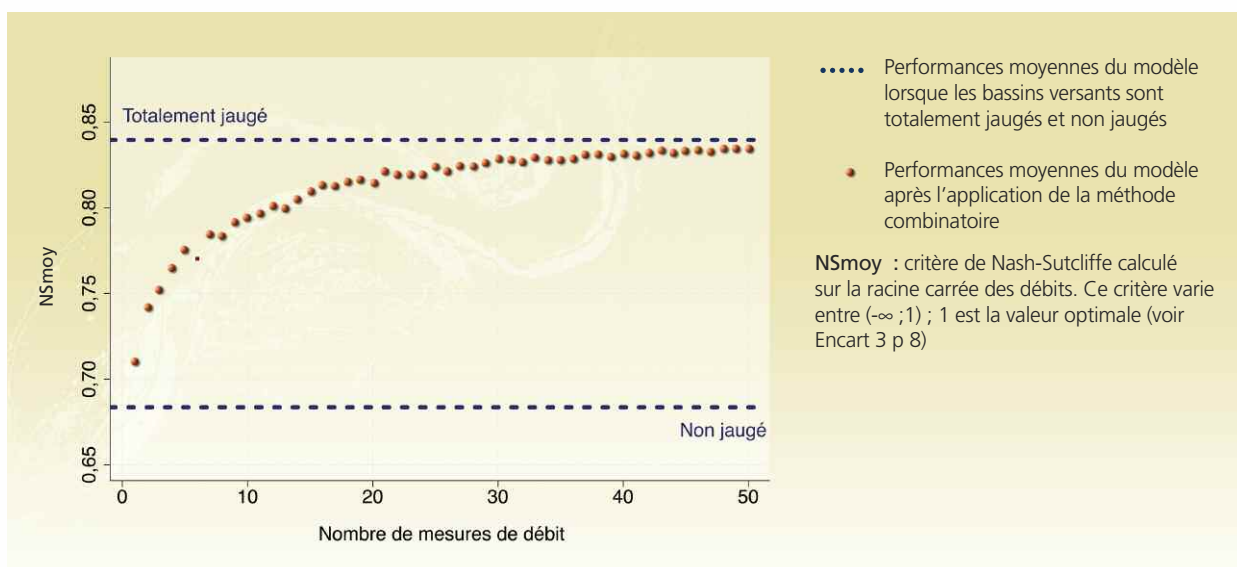


Figure 19. Performances moyennes du modèle GR4J sur les 609 bassins versants de l'étude, après l'application de la méthode combinatoire (points en rouge).

■ Pour l'estimation du débit de référence d'étiage, le QMNA5, sans utilisation de modèle hydrologique

Dans la poursuite des travaux sur les jaugeages ponctuels, Catalogne *et al.* (2014) se sont intéressés à l'estimation du QMNA5 (débit mensuel minimal de période de retour 5 ans) à partir de quelques mesures de débit d'un site cible peu jaugeé. La méthode proposée consiste à rechercher, parmi un échantillon de bassins géographiquement voisins, le site jaugeé le plus similaire en termes de corrélation entre les quelques mesures de débit disponibles au site cible et les débits observés à la même date sur le site jaugeé

voisin. Une relation linéaire est ensuite ajustée sur les logarithmes des couples d'observations concomitantes pour en déduire une estimation du QMNA5 au site cible à partir de la valeur connue au site d'appui, comme illustré en Figure 20. L'intérêt opérationnel de cette méthode est qu'elle permet de s'affranchir de l'utilisation d'une modélisation pluie-débit pour valoriser les mesures ponctuelles de débit.

Les performances de cette méthode ont été étudiées en validation croisée sur un échantillon de 632 stations hydrométriques françaises, selon un protocole permettant de simuler différentes stratégies de jaugeage au site cible. Les paramètres analysés comprennent le nombre de mesures réalisées (N), leur fréquence (F , nombre de jaugeages réalisés chaque année) et la durée de suivi du site (D , en année). Les simulations de jaugeages sont réalisées durant la période de basses eaux, c'est-à-dire durant les trois mois les plus secs de l'année.

Les erreurs commises sur l'estimation du QMNA5 au site cible ont été examinées en fonction de la proximité du site d'appui (c'est-à-dire le degré de corrélation entre le débit au site jaugé et celui au site d'appui) et des modalités de la campagne de jaugeage (fréquence d'échantillonnage, durée de suivi). Des formules empiriques ont ainsi pu être

ajustées sur les résultats afin de déterminer l'incertitude (c'est-à-dire, les intervalles de confiance) affectant les estimations selon ces différents paramètres. Les modalités optimales d'une campagne de jaugeage permettant de parvenir à une estimation fiable en limitant au maximum le « coût opérationnel » de suivi du site ont ainsi pu être précisées.

L'étude a montré que les performances de la reconstitution du QMNA5 augmentaient avec le nombre de jaugeages jusqu'à environ 20, puis se stabilisaient. Pour un nombre de jaugeages identiques, la réalisation de plusieurs jaugeages au cours d'une même saison d'étiage fournit un gain de performances moins important que s'ils étaient répartis sur plusieurs années. Les auteurs de l'étude préconisent de réaliser trois jaugeages par an.

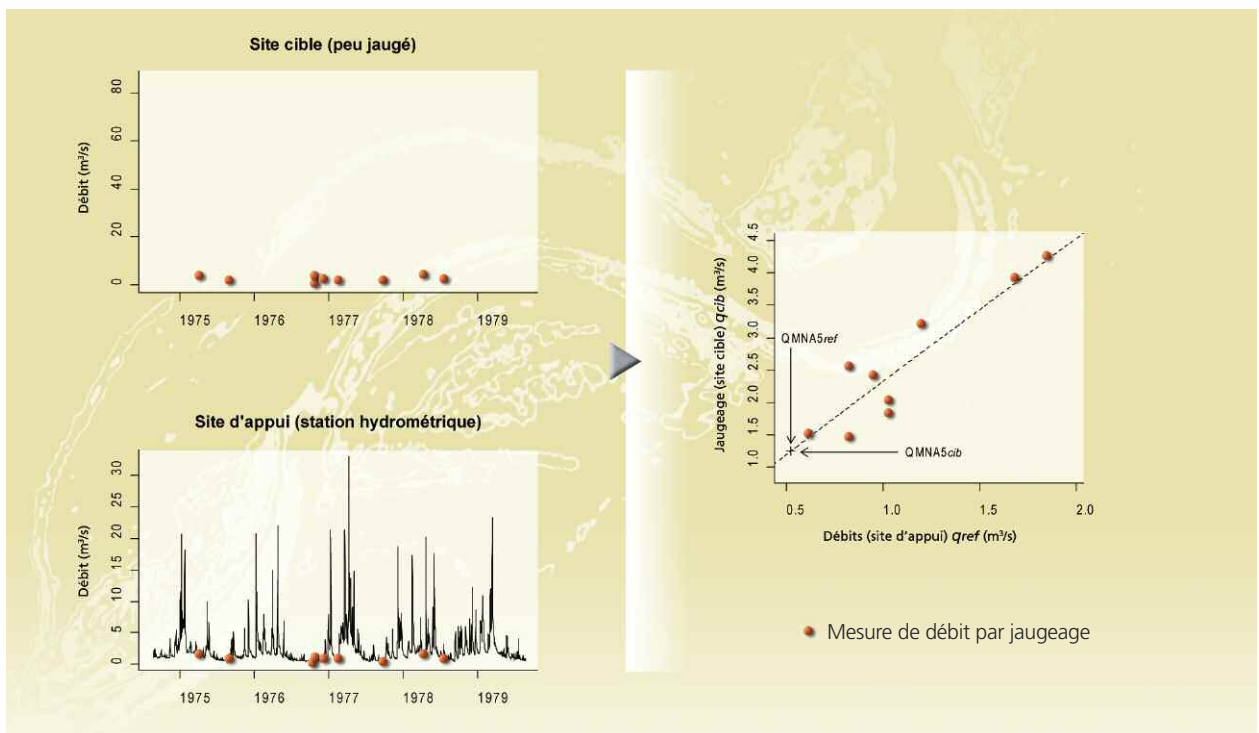


Figure 20. Principe de l'exploitation des jaugeages épisodiques sur la base d'une relation ajustée sur neuf couples jaugeages au site cible et débits observés aux mêmes dates sur le bassin d'appui (Catalogne et al., 2014).

● Comment utiliser de courtes chroniques de débit ?

En cas de séries courtes, des facteurs de correction (de réajustement climatique) doivent être appliqués afin d'effacer les particularités climatologiques des années pour lesquelles les observations sont disponibles. On utilise pour cela des chroniques longues de débit aux stations environnantes et/ou des séries de variables climatiques (essentiellement la pluie). Nicolle et al. (2013) ont proposé une correction du QMNA5, s'appuyant sur deux références :

- une référence climatique (pour prendre en compte l'impact que peuvent avoir l'écart entre les conditions climatiques de long terme et celles observées sur la période trop courte) ;
- une référence régionale pour prendre en compte les effets régionaux « non mesurables ».

Cette méthode est détaillée dans l'Encart 7. En l'absence de données climatiques, une alternative est possible (Catalogne, 2012 ; Encart 7 également).

Correction du débit d'étiage QMNA5 calculé sur des chroniques courtes à l'aide de deux références : climatique et régionale

La méthode présentée dans l'étude de Nicolle *et al.* (2013) utilise deux sources de correction afin de corriger le QMNA5 obtenu à partir d'une courte chronique de débit.

Ces corrections sont combinées de la façon suivante :

$$Q_{\text{corrigé}} = Q_{\text{court terme}} \times [\theta \times \text{Correction climatique} + (1 - \theta) \times \text{Correction régionale}] \quad \text{Eq. 4}$$

Le paramètre θ définit le poids relatif de chacune des corrections, et il dépend de la proximité des bassins voisins utilisés pour évaluer la correction régionale. On utilise la relation :

$$\theta = 0,003 \times \text{distance} + 0,26 \quad \text{Eq. 5}$$

1- Le paramètre de correction régionale s'obtient à partir de données de débit de bassins voisins (quand elles existent), sur lesquelles il a été possible de calculer à la fois un débit Long Terme (Q^{LT}) et un débit Court Terme (Q^{CT}), sur la période de disponibilité des données du bassin cible :

$$\text{Correction régionale} = \frac{Q_{\text{bassin voisin}}^{LT}}{Q_{\text{bassin voisin}}^{CT}} \quad \text{Eq. 6}$$

Quand plusieurs bassins voisins sont disponibles, on réalisera une moyenne pondérée par la distance de ces corrections régionales.

2- Le paramètre de correction climatique s'obtient pour sa part à partir de données climatiques, disponibles pour le bassin cible, à la fois sur le long terme (T) et sur la période courte (CT). On utilise la formule ci-dessous :

$$\text{Correction climatique} = \left(\frac{P^{LT}}{P^{CT}}\right)^{0,5} \times \left(\frac{ETP^{LT}}{ETP^{CT}}\right)^{-2,2} \times \left(\frac{PMNA5^{LT} + \frac{P^{LT}}{12}}{PMNA5^{CT} + \frac{P^{CT}}{12}}\right)^1 \quad \text{Eq. 7}$$

Avec P, les précipitations annuelles (mm/an) ; ETP, l'évapotranspiration potentielle annuelle (mm/an) ; et PMNA5, les précipitations mensuelles minimales avec une période de retour de 5 ans. Les indices CT et LT correspondent respectivement aux variables climatiques à court terme et long terme.

La méthode suggérée par Catalogne (2012) propose de corriger la valeur de QMNA5 calculée sur la chronique courte à l'aide d'un facteur correctif régional k déduit uniquement des données hydrologiques. Ce facteur est obtenu par ajustement d'une relation linéaire entre (i) les QMNA5 d'un ensemble de stations hydrométriques de référence voisins disposant de plus de 26 ans de mesures et calculés sur toute la période de mesure disponible, et (ii) les QMNA5 de ces mêmes stations calculés sur les années de la chronique courte de la station d'intérêt. Le facteur de correction k correspond à la pente de la droite de régression passant par le nuage de points reliant le QMNA5 « chronique longue » au QMNA5 « chronique courte ». La pente de ce graphique informe sur la sécheresse relative de la période courte par rapport à celle de la période longue. Des intervalles de confiance sont fournis (Catalogne, 2012, p. 118).

Conclusion et recommandations

En hydrologie, le cas idéal pour connaître le débit d'une rivière est celui où l'on dispose d'une station hydrométrique installée depuis de nombreuses années, avec une chronique de données sans lacune et de bonne qualité. Les données mesurées sur quelques années peuvent permettre une reconstitution de longues séries de débits à l'aide de modèles hydrologiques. Les données hydrométriques sont également utilisées pour estimer les

débits dans les points non ou très peu jaugés. Toutefois, les incertitudes liées à ces méthodes sont importantes et dépendantes de la disponibilité spatio-temporelle des données hydrométriques. Ce document a présenté des méthodes à mettre en œuvre pour estimer les débits des cours d'eau et les incertitudes associées aux points où aucune station pérenne n'a été préalablement installée. Elles sont synthétisées dans la Figure 21.

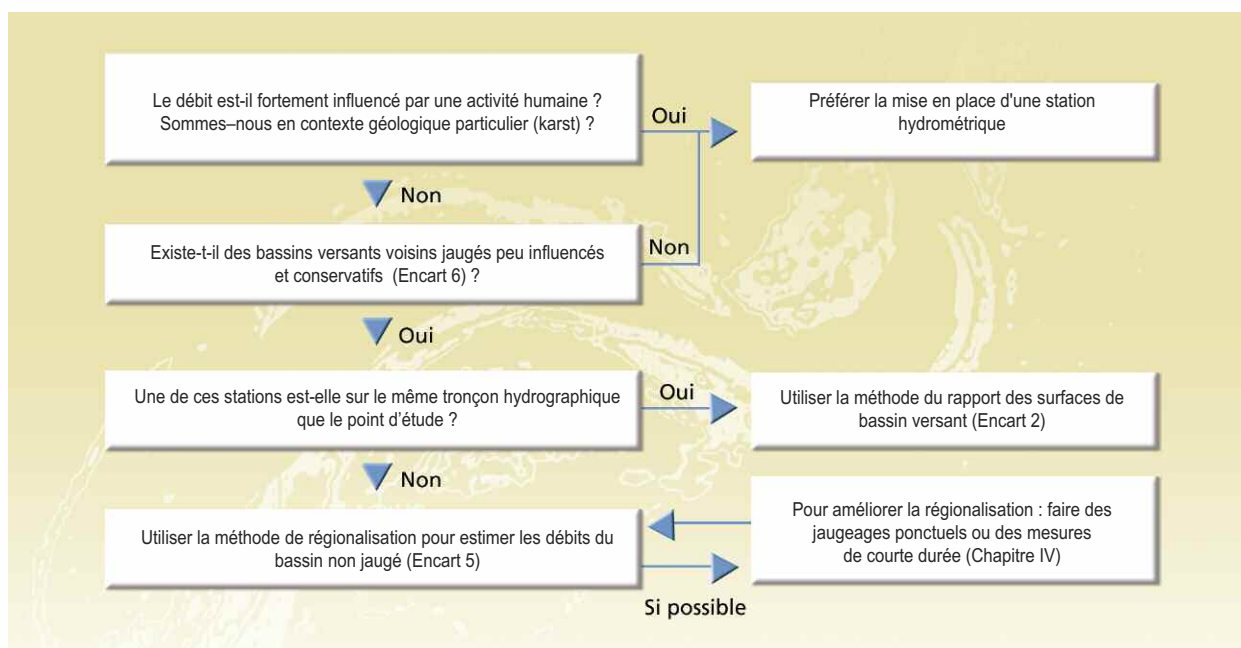


Figure 21. Arbre de décision pour sélectionner la(les) méthode(s) à mobiliser pour estimer le débit d'une rivière dépourvue de station de mesure.

● Cas d'un bassin totalement non jaugé

Dans le cas où aucune donnée de débit n'est disponible au point cible du cours d'eau, diverses méthodes de régionalisation peuvent être appliquées afin d'estimer le débit en ces points non jaugés. Dans cette publication, l'utilisation d'un modèle hydrologique (GR4J) régionalisé par une méthode basée sur la proximité géographique des bassins disposant d'une station hydrométrique a été analysée.

La première limite de cette approche est qu'elle ne peut pas être appliquée sur des bassins versants ayant une hydrologie fortement influencée par les aménagements anthropiques, que ce soit le bassin versant du point non jaugé ou les bassins voisins qui disposent de stations de mesure. Les stations de mesure sont donc indispensables pour comprendre le fonctionnement de ces bassins au comportement spécifique. La régionalisation doit également s'appuyer sur des bassins cohérents pour ce

qui est du bilan hydrologique (voir l'exemple en section "Limites de la méthode de régionalisation", p 16).

La seconde limite de cette méthode est que ses performances peuvent être impactées par la densité spatiale du réseau hydrométrique nécessaire au transfert des jeux de paramètres sur le bassin non jaugé. L'étude a montré que lorsque les paramètres sont transférés de bassins voisins qui sont de plus en plus éloignés du bassin versant cible non-jaugé, les performances du processus de régionalisation diminuent. Il est donc recommandé de conserver un réseau dense de stations ayant peu d'influence anthropique (pour donner un ordre de grandeur, on peut dire qu'il est souhaitable de ne pas dépasser les 50 km en distance interbassins pour l'estimation de débit de crue décennale). Toutefois, cette chute d'efficacité liée à l'augmentation de la distance des plus proches voisins est moindre en comparaison de celle due à la méthode de

régionalisation elle-même. Ceci confirme que pour connaître le débit d'un cours d'eau, rien ne vaut les observations de débit en un point donné.

Pour une application opérationnelle sur un bassin versant non jaugé donné, les graphiques de la Figure 16 (p 20) peuvent être utilisés afin d'obtenir une estimation des gammes de performances auxquelles on peut s'attendre

● Cas d'un bassin partiellement jaugé

Si aucune station n'a été installée au point d'intérêt du cours d'eau, quelques mesures ponctuelles peuvent venir compléter l'utilisation d'une méthode de régionalisation. Cette étude a permis de confirmer l'intérêt de mettre en place une méthode combinant une information partielle fournie par les quelques mesures de débit disponibles sur le bassin cible, avec une information régionale, fournie par les paramètres des bassins voisins.

En particulier, une quantification du poids relatif de l'information locale et de l'information régionale suivant le nombre de jaugeages disponibles sur toute l'année pour l'estimation des débits moyens est proposée. À partir de 30 jaugeages disponibles, l'information de ces jaugeages devient prépondérante par rapport à l'information issue des stations voisines.

sur un bassin versant non jaugé pour divers calculs hydrologiques. Ces « abaques » permettent d'obtenir une indication de la valeur attendue de l'efficacité des calculs régionalisés en fonction de la distance à laquelle se situent les bassins voisins, avec un intervalle d'incertitude sur la valeur attendue.

Pour l'estimation des débits d'étiage, il est plus judicieux d'utiliser les jaugeages en étiage. Une vingtaine de jaugeages à raison de trois par an permet ainsi de diminuer l'incertitude sur le QMNA5 par rapport à un site non jaugé. Une méthode est également présentée pour estimer ce même paramètre d'étiage à partir de chroniques courtes.

Les différentes études présentées montrent que les méthodes combinant informations locale et régionale peuvent efficacement exploiter les deux sources d'information, les stations voisines et les jaugeages ponctuels, ce qui est particulièrement intéressant quand peu de mesures sont disponibles sur un bassin versant.

Pour en savoir plus...

Le rapport

- Lebecherel, L., V. Andreassian, et C. Perrin (2012), Analyse de la sensibilité des calculs hydrologiques aux informations disponibles de pluie et de débit, rapport bibliographique, 20 pp.
- Lebecherel, L. (2015), Sensibilité des calculs hydrologiques à la densité des réseaux de mesure hydrométrique et pluviométrique, thèse de doctorat, 280 pp, AgroParisTech - Irstea (Antony).

Références citées

- Andréassian, V., J. Lerat, N. Le Moine, et C. Perrin (2012), Neighbors: *nature's own hydrological models*, *Journal of Hydrology* 414/415, 49-58, doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.10.007.
- Blöschl, G., M. Sivapalan, T. Wagener, A. Viglione et H. Savenije, (2013), *Runoff prediction in ungauged basins. Synthesis across processes, places and scales*. Cambridge University Press, 465 pp.
- Boldetti, G. (2012), Estimation of the parameters of hydrological models on ungauged basins: a comparison of direct and indirect approaches, Thèse de doctorat, 207 pp, AgroParisTech - Irstea (Antony).
- Catalogne, C. (2012), Amélioration des méthodes de prédétermination des débits de référence d'étiage en sites peu

ou pas jaugés, Thèse de doctorat, 285 pp, Université de Grenoble - Irstea (Lyon).

- Catalogne, C., E. Sauquet, et M. Lang (2014), Valorisation des données de jaugeages épisodiques pour l'estimation du débit de référence d'étiage QMNA5, *La Houille Blanche*(4), 78-87.
- CTGREF (1980), Estimation du débit de crue décennal sur un bassin versant non jaugé - La méthode CRUPEDIX, *Informations techniques, Cahier* 40(n°3).
- De Lavenne, A. (2013), Modélisation hydrologique à base géomorphologique de bassins versants non jaugés par régionalisation et transposition d'hydrogramme. Thèse de doctorat, 226 pp, Agrocampus Ouest Rennes.
- Drogue, G. P., et J. Plasse (2014), How can a few stream-flow measurements help to predict daily hydrographs at almost ungauged sites?, *Hydrological Sciences Journal*, 59(12), 2126-2142, doi: 10.1080/02626667.2013.865031.
- Edijatno, N. D. Nascimento, X. L. Yang, Z. Makhlof, et C. Michel (1999), GR3J: a daily watershed model with three free parameters, *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 44(2), 263-277, doi: 10.1080/02626669909492221.
- Lang, M., et J. Lavabre (2007), *Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations*, Quae ed., 232 pp.

- Mathevet, T. (2005), Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire ? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants, thèse de doctorat, 463 pp, ENGREF, Paris.
- McIntyre, N., H. Lee, H. Wheeler, A. Young, et T. Wagener (2005), Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments, *Water Resources Research*, 41(12), doi: W1243410.1029/2005wr004289.
- Ministère des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer, et Ministère de l'écologie et du développement durable (2006), Circulaire relative à l'organisation de l'hydrométrie dans les DIREN et les SPC (services de prévision des crues).
- Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer (2010), Circulaire relative à l'évolution de l'organisation pour la prévision des crues et l'hydrométrie.
- Nash, J. E., et J. V. Sutcliffe (1970), River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.

- Nicolle, P., V. Andréassian, et E. Sauquet (2013), Blending neighbor-based and climate-based information to obtain robust low-flow estimates from short time series, *Water Resources Research*, 49(12), 8017-8025, doi: 10.1002/2012WR012940.
- Oudin, L., V. Andréassian, C. Perrin, C. Michel, et N. Le Moine (2008), Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments, *Water Resources Research*, 44(3), doi: W03413.10.1029/2007wr006240.
- Pearson, C. P. (1998), Changes to New Zealand's national hydrometric network in the 1990s, *Journal of Hydrology New Zealand*, 37(1), 1-17.
- Perrin, C., C. Michel, et V. Andréassian (2003), Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 275-289, doi: 10.1016/S0022-1694(03)00225-7.
- WMO (2008), Guide to Hydrological Practices, WMO - No. 168.

● Rédaction

Laure Lebecherel (Irstea)
Vazken Andréassian (Irstea)
Bénédicte Augéard (Onema)
Eric Sauquet (Irstea)
Clotaire Catalogne (Irstea)

● Edition

Véronique Barre (Onema, direction de l'action scientifique et technique) et
Claire Roussel (Onema, délégation à l'information et à la communication)

● Création et mise en forme graphiques

Béatrice Saurel (saurelb@free.fr)

● Remerciements

Les auteurs remercient Météo-France et le Schapi pour la mise à disposition des données pluviométriques et hydrométriques respectivement. Ils remercient également Michel Lang et Rachel Puechberty pour leur contribution.

Contacts : vazken.andreassian@irstea.fr
benedicte.augeard@onema.fr

Imprimé par IME by estimprim



ISBN 979-10-91047-50-0

Novembre 2015

La collection **Comprendre pour agir** accueille des ouvrages issus de travaux de recherche et d'expertise mis à la disposition des enseignants, formateurs, étudiants, scientifiques, ingénieurs et des gestionnaires de l'eau et des milieux aquatiques.

- 1- Eléments d'hydromorphologie fluviale (octobre 2010)
- 2- Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière (mai 2011)
- 3- Evaluer les services écologiques des milieux aquatiques : enjeux scientifiques, politiques et opérationnels (décembre 2011)
- 4- Evolutions observées dans les débits des rivières en France (décembre 2012)
- 5- Restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau et mieux maîtriser les nutriments : une voie commune ? (décembre 2012)
- 6- Quels outils pour caractériser l'intrusion saline et l'impact potentiel du niveau marin sur les aquifères littoraux ? (avril 2013)
- 7- Captages Grenelle : au-delà de la diversité, quels caractères structurants pour guider l'action ? (septembre 2013)
- 8- Les évaluations économiques en appui à la gestion des milieux aquatiques (octobre 2013)
- 9- Regards des sciences sociales sur la mise en œuvre des politiques publiques (décembre 2013)
- 10- Comment développer un projet ambitieux de restauration d'un cours d'eau ? Retours d'expériences en Europe, un point de vue des sciences humaines et sociales (février 2014)
- 11- Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons Principes et méthodes (mai 2014)
- 12 - La compétence « Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations » (Gemapi) (août 2014)
- 13 - Les poissons d'eau douce à l'heure du changement climatique : éclairages et pistes d'actions pour la gestion (octobre 2014)
- 14 - Connaître les perceptions et les représentations : quels apports pour la gestion des milieux aquatiques ? (décembre 2014)
- 15- Quelle est l'efficacité d'élimination des micropolluants en station de traitement des eaux usées domestiques? Synthèse du projet de recherche ARMISTIQ (janvier 2015)
- 16- Modèles hydro-économiques : quels apports pour la gestion de l'eau en France ? (mars 2015)
- 17- Les espèces exotiques envahissantes dans les milieux aquatiques : connaissances pratiques et expériences de gestion - Vol. 1 Connaissances pratiques (mars 2015)
- 18- Les espèces exotiques envahissantes dans les milieux aquatiques : connaissances pratiques et expériences de gestion - Vol. 2 Expériences de gestion (mars 2015)
- 19- Captages Grenelle : où en est-on de la protection contre les pollutions diffuses? Comment aller plus loin ? (septembre 2015)
- 20- Prévoir les étiages : que peut-on attendre des modèles hydrologiques ? (novembre 2015)
- 21- Connaître les débits des rivières : quelles méthodes d'extrapolation lorsqu'il n'existe pas de station de mesures permanentes ? (novembre 2015)



Contact : veronique.barre@onema.fr
<http://www.onema.fr/collection-comprendre-pour-agir>

