



HAL
open science

Guide pour l'exploitation des jaugeages en hydrologie - Application à la prédétermination des débits caractéristiques d'étiage

Eric Sauquet, C. Catalogne, J. Plasse, M. Lang

► To cite this version:

Eric Sauquet, C. Catalogne, J. Plasse, M. Lang. Guide pour l'exploitation des jaugeages en hydrologie - Application à la prédétermination des débits caractéristiques d'étiage. Onema, pp.37, 2016. hal-02604844

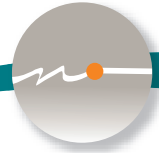
HAL Id: hal-02604844

<https://hal.inrae.fr/hal-02604844>

Submitted on 16 May 2020

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

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



GUIDE

pour l'exploitation des jaugeages en hydrologie

Application à la prédétermination des débits caractéristiques d'étiage



GUIDE

pour l'exploitation des jaugeages en hydrologie

Application à la prédétermination
des débits caractéristiques d'étiage

Eric SAUQUET, Clotaire CATALOGNE, Julien PLASSE, Michel LANG

Auteurs

- **Eric SAUQUET**, directeur de recherche (Irstea), eric.sauquet@irstea.fr
- **Clotire CATALOGNE**, ingénieur de recherche, chargé de mission (Irstea)
- **Julien PLASSE**, ingénieur d'étude (Irstea)
- **Michel LANG**, ITPE (Irstea), michel.lang@irstea.fr

Les développements, réalisés au sein de l'Unité de recherche Hydrologie-Hydraulique du centre Irstea de Lyon-Villeurbanne, se sont inscrits dans une collaboration Irstea portant sur la caractérisation des étiages en France. Ils ont notamment abouti à des représentations cartographiques du *QMNA5* et du module (<http://www.eaufrance.fr/observer-et-evaluer/etat-des-milieux/rivieres-et-lacs/hauteurs-et-debits>) ainsi qu'à l'ouvrage intitulé *Connaître les débits des rivières : quelles méthodes d'extra-polation lorsqu'il n'existe pas de station de mesures permanentes ?* publié dans la collection *Comprendre pour agir* de l'Onema.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les personnes suivantes pour leur aimable contribution : **Stéphane HELOUIN**, **Gwen GLAZIOU** et **Stéphane PINEY** (Dreal Normandie), **Christophe MAGE** (Dreal Champagne-Ardenne), **Bénédicte AUGÉARD** et **Véronique BARRE** (Onema).

Résumé

Ce guide technique a pour objectif de présenter une méthode valorisant des données de jaugeages (mesures du débit d'un cours d'eau) disponibles en un point du réseau hydrographique, un « site cible », en vue de l'estimation du débit mensuel minimum de période de retour cinq ans du cours d'eau (*QMNA5*) en ce point.

La méthodologie développée s'appuie sur l'ajustement d'une relation log-linéaire entre couples des débits jaugés au site cible et observés simultanément au droit d'une station hydrométrique voisine, un « site de référence », là où une valeur fiable du *QMNA5* est disponible. La relation ajustée est alors appliquée au *QMNA5* du site d'appui pour en déduire le *QMNA5* au site cible.

Les erreurs d'estimation associées sont quantifiées au travers d'expressions analytiques reposant sur les deux principales caractéristiques des campagnes de mesure (nombre et fréquence des jaugeages) et sur la qualité de la relation entre les débits concomitants observés aux deux sites (coefficient de corrélation). Le biais issu de la relation log-linéaire peut alors être corrigé et l'on peut associer un intervalle de confiance à la valeur de *QMNA5* estimée.

Après un premier chapitre consacré aux principes généraux de la méthode d'estimation du *QMNA5*, le deuxième chapitre développe le protocole d'exploitation des jaugeages incluant notamment l'analyse critique des données, la quantification des incertitudes et des recommandations sur la stratégie de jaugeages. Le troisième et dernier chapitre est dédié à l'application de la méthode à deux bassins versants : la Scie (Seine-Normandie, contexte océanique) et l'Asse (Alpes-de-Haute-Provence, contexte mixte montagnard et méditerranéen).

Ce guide a été conçu dans une perspective opérationnelle en fournissant notamment des recommandations sur la stratégie de jaugeages à mettre en œuvre pour parvenir à un résultat fiable dans un délai raisonnable.

Mots clés

Hydrologie, étiage, prédétermination, jaugeages volants, sites peu jaugés, incertitudes



Sommaire

P 5 - 6	Introduction : cadre réglementaire et méthodes existantes
P 7 - 11	1. Principes généraux et bases théoriques de la méthode <ul style="list-style-type: none">1.1 Éléments de calcul1.2 Principes de sélection des données de jaugeages1.3 Principes du choix du site de référence parmi les stations hydrométriques1.4 Principes de quantification des incertitudes1.5 Le cas des bassins versants influencés
P 12 - 17	2. Protocole d'exploitation des jaugeages <ul style="list-style-type: none">2.1 Étape 1 - Critique et sélection des données de jaugeages2.2 Étape 2 - Choix du site de référence2.3 Étape 3 - Estimation du biais et de l'intervalle de confiance2.4 Étape 4 (optionnelle) - Réflexion sur la stratégie de jaugeages2.5 Conclusion
P 18 - 30	3. Cas d'étude, la Scie (Seine Normandie) et l'Asse (Alpes-de-Haute-Provence) <ul style="list-style-type: none">3.1 La Scie, un exemple en contexte océanique influencé par des aquifères3.2 L'Asse, un exemple en contexte pluvio-nival sous climat méditerranéen
P 31 - 32	Conclusion
P 33	Bibliographie

Introduction : cadre réglementaire et méthodes existantes

Le débit moyen mensuel minimum annuel de fréquence quinquennale sèche d'un cours d'eau (couramment noté *QMNA5*) est, avec le dixième du module, un indicateur statistique relatif aux étiages, officiellement défini dans la réglementation française sur l'eau.

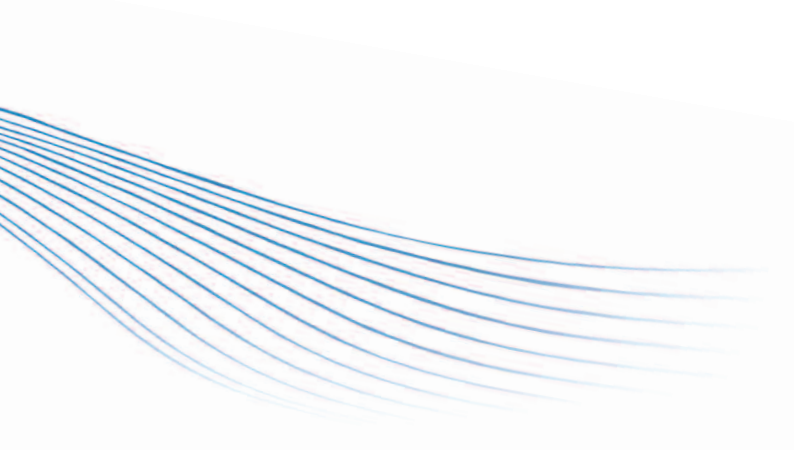
Dans le Code de l'environnement en vigueur en 2016, le *QMNA5* est désigné « débit de référence du cours d'eau » (article R214-1), et exploité dans la procédure de déclaration ou d'autorisation des installations, ouvrages, travaux, ou activités susceptibles de porter atteinte à la ressource en eau (par ex. les prélèvements et les rejets en eaux superficielles). De même, ce débit est utilisé dans le cadre de la mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau pour la détermination des pressions ponctuelles (MEDD 2003) et de pression de prélèvement (Onema, 2011) sur les masses d'eau (Anonyme, 2015). Enfin, cet indicateur est fréquemment évoqué voire utilisé dans le processus de définition des débits seuils consignés dans les « arrêtés cadres sécheresse » et dans les études d'estimation des « volumes prélevables ».

La détermination de ce débit est, de fait, une nécessité opérationnelle pour la mise en œuvre de la gestion quantitative de la ressource en eau en France.

La connaissance du *QMNA5* reste réduite le long du réseau hydrographique car elle requiert l'existence de longues chroniques de mesure de débit (de plus de 25 ans) pour calculer cette grandeur de manière fiable. Au sens strict, le *QMNA5* est le résultat de l'ajustement d'une distribution statistique à l'échantillon des débits mensuels minimaux annuels *QMNA* extraits de la série hydrologique. Il correspond à la valeur théorique de *QMNA* dépassée en moyenne quatre années sur cinq. En cas de séries courtes, la question d'un réajustement climatique peut se poser et l'application d'un coefficient multiplicatif correcteur déduit de stations hydrométriques voisines est conseillée afin d'effacer les particularités climatologiques des années de mesures (Sauquet et Catalogne, 2011).

En site dépourvu de toute mesure de débits, l'opérateur peut interroger un outil cartographique développé par Irstea et accessible sur internet¹. Conçues pour fournir une aide à la décision, les cartes dites « de consensus » proposent des valeurs de *QMNA5* et du module interannuel le long du chevelu hydrographique (tronçons de la BD Carthage® de l'IGN), assorties d'un indice de robustesse et d'une fourchette d'incertitude. Elles sont tributaires notamment de la densité du réseau de mesures sur lequel la méthode s'est appuyée, et de l'hétérogénéité hydro-climatique du secteur d'intérêt. Malgré le soin apporté, de fortes incertitudes demeurent donc par endroit (plus particulièrement en tête de bassin et dans des secteurs géologiquement complexes comme les karsts) et peuvent limiter l'usage de cette carte. L'erreur de reconstitution sur les estimations de la carte de consensus relative au *QMNA5* présente une moyenne et un écart-type respectivement de 0,26 l/s/km² et 1,13 l/s/km² (Tableau 6 de Riffard *et al.*, 2012).

1. http://www.eaufrance.fr/IMG/zip/cartes_debits_caracteristiques.zip



Une solution souvent négligée, consiste à privilégier une méthode d'estimation exploitant, quand elles existent, des données de jaugeages ponctuelles, dits « jaugeages volants » ou encore « jaugeages épisodiques », recueillis sur plusieurs années d'observation. En France, la démarche de valorisation de ce type de données trouve son origine dans les travaux du Centre technique du génie rural des eaux et des forêts (CTGREF) réalisés dans les années 1970 (Oberlin *et al.*, 1973). La technique suggérée a depuis évolué et fait l'objet d'applications à l'échelle de régions (par ex. Rhône-Alpes, Haute-Normandie). Dans la continuité de ces travaux, un travail de thèse réalisée au sein de l'Unité de recherche Hydrologie-Hydraulique du centre de Lyon-Villeurbanne d'Irstea a cherché à renouveler la méthode et à progresser sur certains aspects restés inexplorés, en particulier concernant l'évaluation de l'incertitude affectant les estimations en fonction de la stratégie de jaugeages adoptée au site d'intérêt (Catalogne, 2012). Ce guide en propose une synthèse.

La méthodologie exposée ici s'avère plus efficace, en termes de biais et d'incertitude à l'échelle de la France, que les méthodes d'interpolation utilisées dans la carte de consensus, même avec un nombre réduit de jaugeages. Elle est donc vivement recommandée lorsque des jaugeages existent. La performance de la méthode peut inciter également à la réalisation de nouveaux jaugeages.

Notons que des travaux comparables réalisés à l'étranger ont abouti à la conception d'une méthode apparentée, connue aux États-Unis sous le nom de « *base-flow correlation method* »². D'autres approches proposent de valoriser les jaugeages épisodiques à des fins hydrologiques. L'une d'entre elles consiste à dresser des profils en long à l'aide de jaugeages en différents points d'un même linéaire hydrographique, puis à établir une relation entre les débits jaugés et la surface drainée (Arts et Sary, 2000). La valeur de *QMNA5* connue en un site de référence est extrapolée le long du bief à partir de la relation débit-surface. Enfin, les données de jaugeages volants peuvent aussi intervenir en appui à la modélisation hydrologique dans le but de mieux caler les paramètres d'un modèle conceptuel et d'améliorer ainsi la qualité des chroniques reconstituées en site peu jaugé (Plasse *et al.*, 2014).

Après un premier chapitre consacré aux principes généraux de la méthode d'estimation du *QMNA5*, le deuxième chapitre s'attache à décrire de façon opérationnelle le protocole de mise en œuvre, incluant notamment le prétraitement des données, le choix du site de référence et la quantification des incertitudes. Un dernier chapitre est dédié à l'application à deux cas d'études.

2. pubs.usgs.gov/sir/2008/5126/section4.html

Principes généraux et bases théoriques de la méthode

1

1.1 Éléments de calcul

La démarche proposée s'est appuyée, lors de sa conception, sur une procédure de validation croisée ; celle-ci consiste à simuler différentes configurations de jaugeages à partir de tirages conditionnés dans les chroniques d'un échantillon de référence. Ce dernier est constitué de 632 longues séries de débits journaliers jugées fiables en basses eaux et peu influencées, représentatives des différents régimes hydrologiques observés en France métropolitaine (Figure 1) ; la liste complète des stations est présentée dans (Catalogne, 2012). Tour à tour, chacune des stations de référence a été traitée comme un site peu jaugé, la procédure a été appliquée et la comparaison entre les valeurs de $QMNA5$ estimée et observée a permis de quantifier les erreurs de reconstitution selon différentes configurations et, finalement, d'identifier parmi elles, celle qui semble optimale.

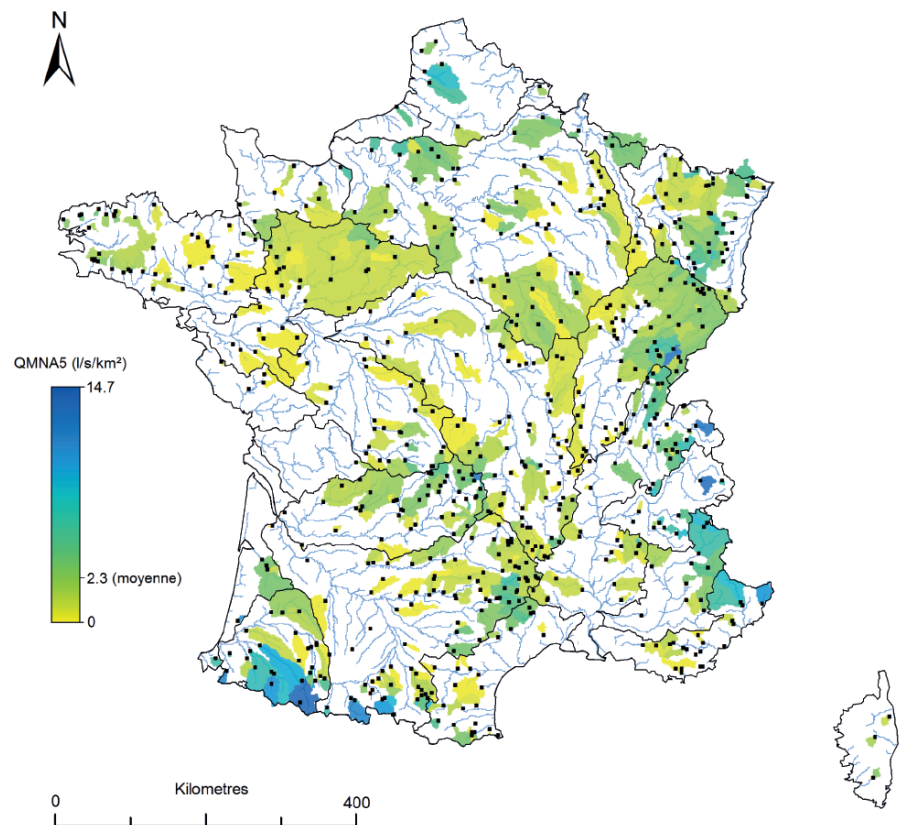
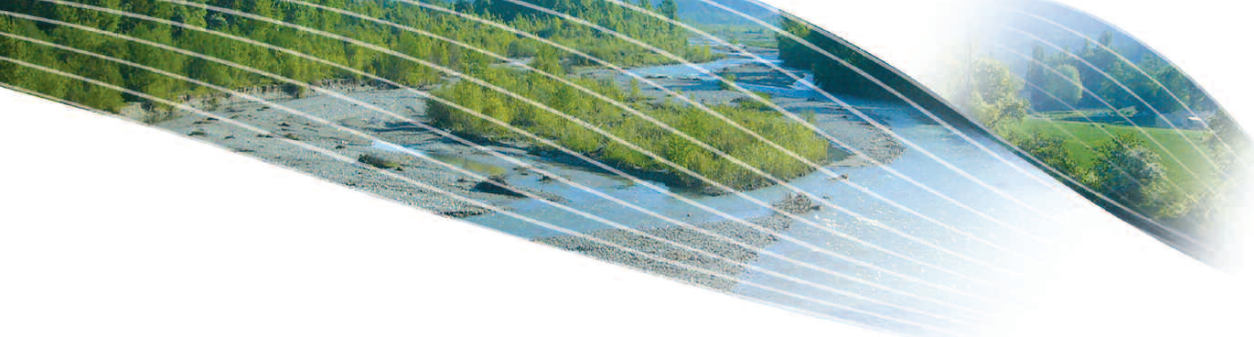


Figure 1. Valeurs de $QMNA5$ spécifiques (en $l/s/km^2$) aux 632 stations de l'échantillon de référence (d'après Catalogne, 2012).



La méthode s'appuie sur l'identification d'une relation simple entre les débits jaugés au site cible et ceux observés à la même date à une station hydrométrique voisine sélectionnée à cet effet et désignée, par la suite, « site de référence ». L'hypothèse principale est que la relation ajustée sur les débits concomitants constitue une bonne approximation de la relation entre la valeur de $QMNA5$ recherchée au site cible et celle connue au site d'appui (Figure 2). Il est entendu que les co-fluctuations des débits sont une réponse à une même variabilité climatique régionale, et non à des actions humaines. La méthode n'est donc pas adaptée aux bassins fortement anthropisés, nous y reviendrons plus loin.

D'après les résultats obtenus en validation croisée, la formule la plus pertinente reliant le débit du site cible au débit du site de référence est une relation de forme log-linéaire :

$$q_{cib}(t) = \lambda [q_{ref}(t)]^k \text{ (Eq. 1)}$$

où $q_{cib}(t)$ et $q_{ref}(t)$ sont les débits jaugés à la même date t , respectivement au site cible et au site de référence. λ et k sont les paramètres à ajuster. Ils s'obtiennent par régression linéaire entre les logarithmes des débits $q_{cib}(t)$ et $q_{ref}(t)$:

$$\ln[q_{cib}(t)] = \ln(\lambda) + k \ln[q_{ref}(t)] \text{ (Eq. 2)}$$

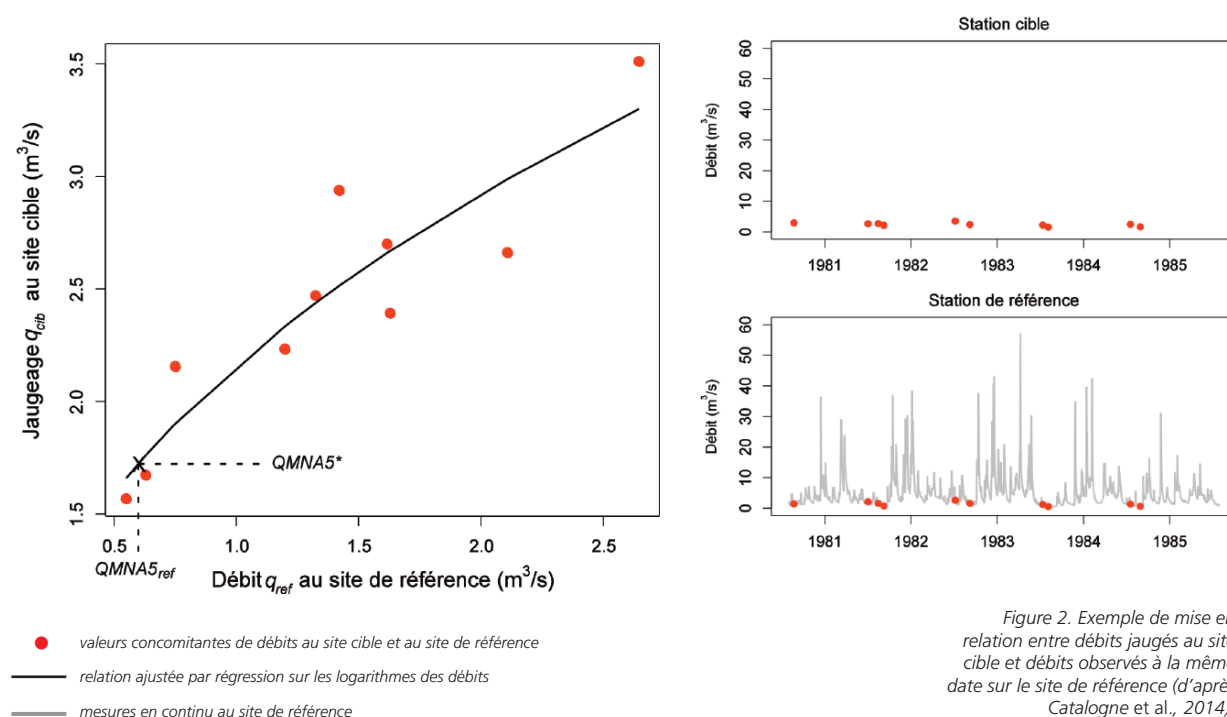
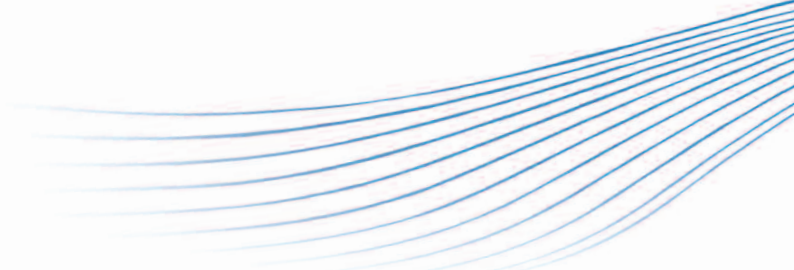


Figure 2. Exemple de mise en relation entre débits jaugés au site cible et débits observés à la même date sur le site de référence (d'après Catalogne et al., 2014).

Le modèle log-linéaire autorise une courbure ; il est de ce fait plus flexible qu'un simple modèle linéaire. En outre, il donne intrinsèquement un poids plus important aux valeurs jaugées les plus faibles. Il a également plus de sens physique que le modèle linéaire.

La formule ajustée est ensuite exploitée pour une première estimation du $QMNA5^*$ au site cible à partir de la valeur de $QMNA5_{ref}$ connue au site de référence :

$$QMNA5^* = \lambda (QMNA5_{ref})^k \text{ (Eq. 3)}$$



Cette première estimation peut être ensuite corrigée d'un biais et assortie d'un intervalle d'incertitude en fonction des caractéristiques principales des campagnes de jaugeages (fréquence annuelle et nombre total de jaugeages) et de la qualité de la relation appréciée par le coefficient de corrélation entre les logarithmes des débits q_{cib} et q_{ref} . L'estimation finale du débit d'étiage s'obtient alors :

$$QMNA5_{cib} = QMNA5^* - \mu = \lambda (QMNA5_{ref})^k - \mu \text{ (Eq. 4)}$$

où μ représente le biais moyen d'estimation. Biais et intervalle de confiance sont exprimés en l/s/km². Dans les applications, il faudra prendre soin de faire les conversions d'unité nécessaires (de m³/s en l/s/km² et parfois inversement).

Les différentes étapes que sont la constitution du jeu de données, le choix de la station de référence et l'élaboration de la relation empirique, soulèvent un certain nombre de questions pratiques. Des recommandations sont proposées dans les sections suivantes. Elles s'appuient sur une expertise des modes opératoires de mesure des débits, des processus agissant sur les bassins versants et du caractère naturel ou non du régime hydrologique aux sites.

1.2 Principes de sélection des données de jaugeages

Les données de jaugeages doivent :

- être indépendantes pour limiter la redondance d'information et éviter ainsi de biaiser la relation empirique ;
- explorer une gamme étendue de débits d'étiage caractérisant le fonctionnement en basses eaux du site cible en premier lieu en se focalisant sur des phases de tarissement pour obtenir une homogénéité de processus sous-jacents aux valeurs q_{cib} .

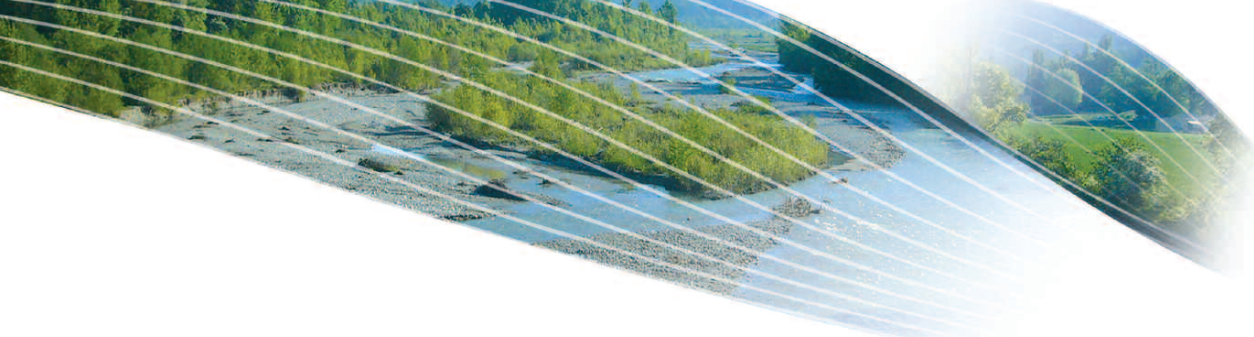
Les exigences énoncées sur les échantillons de débits ont des conséquences évidentes sur l'exploitabilité de jaugeages préexistant (certains jaugeages doivent ainsi être écartés) et/ou sur le planning des campagnes de terrain complémentaires.

1.3 Principes du choix du site de référence parmi les stations hydrométriques

La station hydrométrique susceptible d'être « site de référence » doit satisfaire à des contraintes élémentaires de qualité métrologique (mesures en basses eaux fiables) et de représentativité (débits peu ou pas altérés par des actions humaines). Enfin, pour y garantir une estimation robuste du $QMNA5$, la chronique au site de référence devra être longue (*a priori* au moins 25 ans) ; sinon se référer à l'intervalle de confiance associé publié par la banque HYDRO³.

La sélection d'un site de référence vise à identifier le bassin versant qui, dans le même contexte climatique que le bassin versant cible, présente la plus forte similitude comportementale avec le bassin versant en amont du site cible.

3. <http://hydro.eaufrance.fr>



1.4 Principes de quantification des incertitudes

L'erreur commise sur l'estimation $QMNA5^*$ a été étudiée en validation croisée sur les 632 stations mentionnées plus haut (Figure 1, page 7) dont on connaît la valeur de référence $QMNA5_{obs}$. Elle s'exprime au site cible par :

$$Err = QMNA5^* - QMNA5_{obs} = \lambda \cdot (QMNA5_{ref})^k - QMNA5_{obs} \text{ (Eq. 5)}$$

avec Err en $l/s/km^2$.

Différentes modalités ont été envisagées pour l'analyse des erreurs :

- la première est « générique », la validation croisée a été mise en œuvre sur l'ensemble de l'échantillon de 632 stations sans considération hydrologique particulière sur les sites cibles et de référence ;
- la seconde est « régionale » : la validation croisée a été engagée non pas sur les 632 bassins versants, mais sur des ensembles réputés hydrologiquement homogènes, élaborés à partir d'une carte des régimes mensuels proposée par Sauquet *et al.* (2008) et reportée en Figure 3. Ainsi, les stations de chaque classe et celles des deux classes qui les encadrent sont rassemblées⁴ pour n'en former qu'une. La relative continuité dans les classes dans l'ordre présenté en Figure 3 légitime en partie ces regroupements. L'avantage principal est d'obtenir un effectif de stations suffisant pour assurer une certaine robustesse aux paramétrages qui suivent.

Le choix du formalisme mathématique décrivant les erreurs Err est commun aux différentes modalités. Il résulte de l'analyse des erreurs Err obtenues sans distinction de classe. Il n'a pas été remis en cause lors de la mise en place des modèles spécifiques aux classes.

Rappelons donc ici les principaux points :

- la distribution des erreurs Err peut être décrite par une loi normale de moyenne (ou biais) μ et d'écart-type σ ;
- la moyenne μ et l'écart-type σ des erreurs dépendent de :
 - la stratégie de jaugeages adoptée au site cible, c'est-à-dire la fréquence annuelle de jaugeages (F) et le nombre de jaugeages (N),
 - la similitude entre les sites cible et de référence, mesurée par le coefficient de corrélation r entre les logarithmes de $q_{cib}(t)$ et $q_{ref}(t)$;
- les expressions analytiques les plus satisfaisantes pour décrire l'évolution du biais μ et de l'écart-type σ sont :

$$\mu_{(r,N,F)} = \alpha_{(F)} \cdot r + \beta_{(F)} \text{ (Eq. 6)}$$

$$\sigma_{(r,N,F)} = a_{(F)} \cdot \ln(N) + b_{(F)} \cdot (1-r) + c_{(F)} \text{ (Eq. 7)}$$

- comme l'erreur suit une loi normale, il est possible d'exprimer un intervalle de confiance à p %, qui encadre chaque estimation en fonction du biais $\mu_{(r,N,F)}$ et de l'écart-type $\sigma_{(r,N,F)}$:

$$\text{Prob}(\mu_{(r,N,F)} - u_{(1+p)/2} \cdot \sigma_{(r,N,F)} < Err < \mu_{(r,N,F)} + u_{(1+p)/2} \cdot \sigma_{(r,N,F)}) = p \text{ (Eq. 8)}$$

où $u_{(1+p)/2}$ correspond au quantile normal centré réduit de fréquence au non-dépassement $(1+p)/2$.

4. à l'exception des classes 1 et 12 qui ne comportent qu'un voisin.

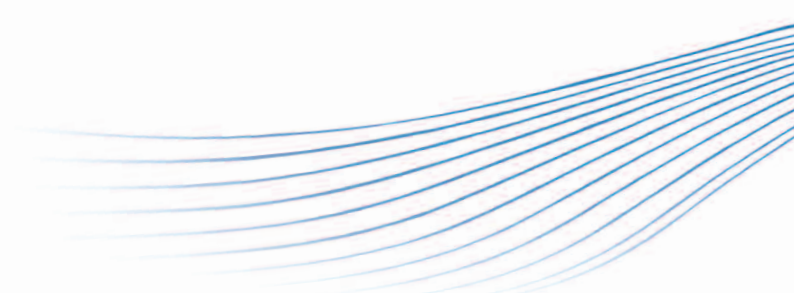
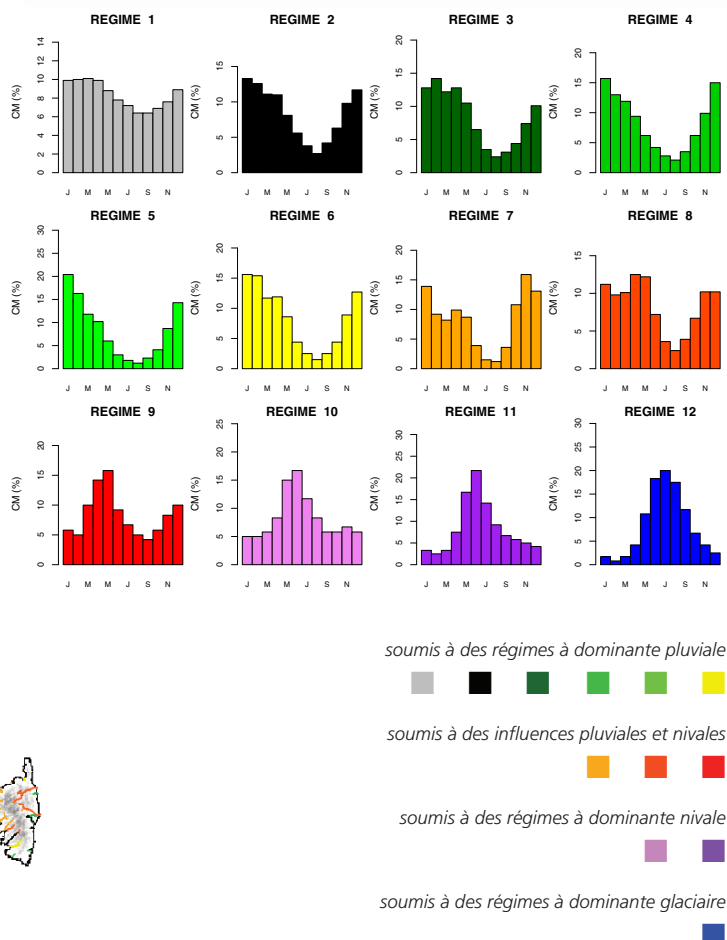
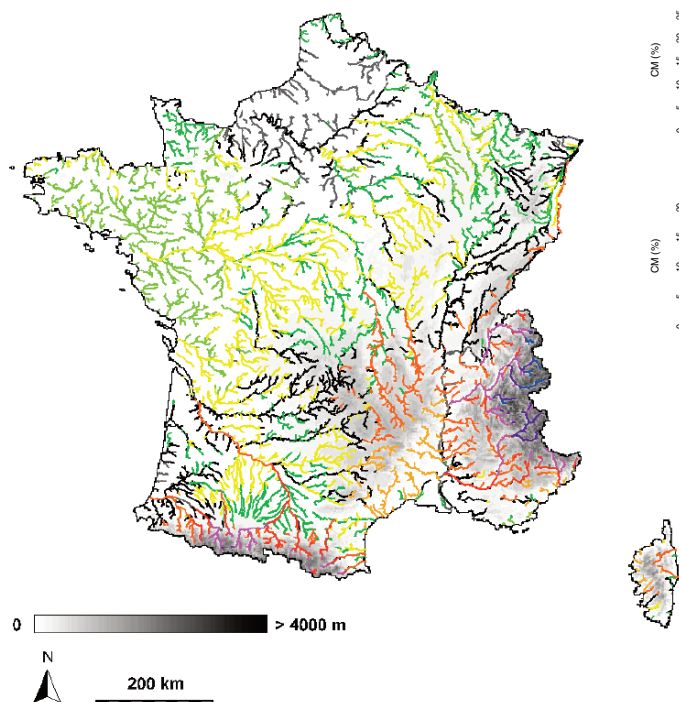


Figure 3. Carte des régimes hydrologiques le long du réseau hydrographique selon la typologie définie par les douze séries de coefficients mensuels de débit (CM), définis par les débits mensuels moyens interannuels divisés par le module et exprimé en %.



1.5 Le cas des bassins versants influencés

La méthode développée reste valide sur des bassins versants soumis à des actions humaines. Sa légitimité dépend de l'impact des prélèvements sur les débits d'été. Elle est laissée à la libre appréciation par l'expert hydrologue local du caractère influencé prononcé ou non. Un des cas d'étude présenté plus loin, celui de l'Asse, illustre cette situation.

Si le cours d'eau est fortement anthropisé (notamment en aval d'un ouvrage), il est bon de s'interroger si la notion de *QMNA5* a un sens. Dans un contexte de régulation, ce sont principalement les débits réglementaires (débits réservés, seuils d'arrêt sécheresse...) et les modes de gestion qui conditionneront les valeurs des débits en été.

Si l'influence reste modérée, une difficulté est d'isoler une station de référence voisine subissant les mêmes fluctuations d'origines anthropiques et climatiques, c'est-à-dire présentant une corrélation acceptable ($r > 0,5$).

Les modèles d'incertitude décrits ici ne seront pas légitimes sur les estimations moyennement à fortement influencées. L'estimation finale sera donnée par l'Eq. 3, sans correction de biais.



Protocole d'exploitation des jaugeages

2

Les phases sensibles de la méthodologie sont décrites ici. Les points particulièrement délicats concernent la sélection des données de jaugeages et le choix de la station de référence.

2.1 Étape 1 - Critique et sélection des données de jaugeages

Pour satisfaire aux exigences d'indépendance entre les données et d'homogénéité des événements observés, il est suggéré de considérer :

- la saison d'étiage comme la période de trois mois centrés autour du mois au débit mensuel moyen le plus faible dans l'année ; la période d'étiage peut être définie en s'appuyant sur la carte des régimes hydrologiques (Figure 3, page 11) ;
- des jaugeages espacés d'au moins 15 jours dans la saison d'étiage pour limiter la dépendance entre les valeurs retenues.

Notons que :

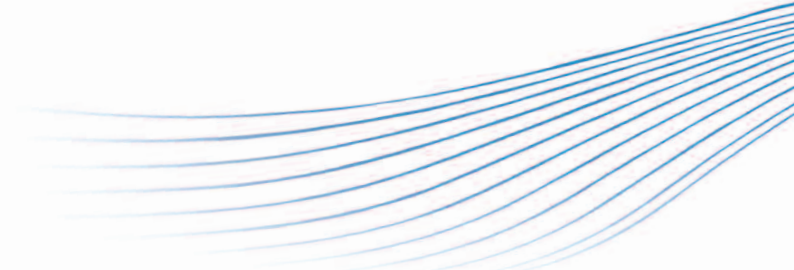
- l'utilisation d'une station hydrologique voisine, si possible sur le même cours d'eau ou un affluent, facilite le positionnement des jaugeages dans le contexte hydrologique de la mesure (phase de tarissement, montée des eaux suite à une averse, positionnement des valeurs au site de référence vis-à-vis d'un seuil d'étiage, etc.), positionnement qui conditionnera leur éventuelle exclusion du jeu de données final ;
- l'historique pluviométrique du bassin considéré peut être examiné pour exclure les données concomitantes avec des précipitations significatives et/ou dans un délai de $d = S^{0,2}$ jours après celles-ci⁵, où S désigne la surface du bassin versant en km^2 ;
- l'espacement de 15 jours peut être réduit si un épisode pluvieux et une remontée temporaire des débits vient interrompre une période d'étiage dans un délai inférieur aux 15 jours préconisés ;
- la séquence de trois mois peut être étendue si la période d'étiage n'est pas prononcée (c'est le cas pour des bassins influencés par les échanges nappes-rivières) ou si un étiage secondaire mérite d'être exploité (la question peut être soulevée pour un bassin de type nivo-pluvial) ;
- la critique des données achevée conduira bien souvent à ne retenir qu'un nombre annuel de jaugeages situé entre deux et cinq valeurs.

2.2 Étape 2 - Choix du site de référence

L'objectif est d'identifier la ou les stations présentant la plus forte similitude comportementale avec le bassin versant en amont du site cible. Pour cela, la méthode propose une sélection en deux étapes :

- présélection d'un ensemble de M stations sur la base de la proximité géographique (l'utilisation de la distance entre les centres de gravité des bassins versants est recommandée) complétée par une expertise hydrologique sur les stations hydrométriques ; le recours à un sous-échantillon des 632 stations de référence (Figure 1, page 7) peut être envisagé ;

5. Il s'agit d'une manière simpliste mais pratique d'estimer le temps de ressuyage d'un bassin.



■ calcul du coefficient de corrélation (noté r dans la suite) entre les couples des logarithmes des débits $q_{cib}(t)$ et débits journaliers à la même date aux M stations candidates.

Le site de référence parmi les M candidats sera celui présentant le plus fort degré de corrélation choisi et les débits journaliers concomitants formeront les valeurs q_{ref} .

Une relation log-linéaire ne peut être mise en place avec des débits nuls. Le conseil est de remplacer les valeurs nulles par 1 l/s (seuil de précision des données de débits fournies par la Banque HYDRO). L'ajustement doit être réalisé avec les outils classiques de la statistique : la régression linéaire simple sur des variables transformées en logarithme. Il faut veiller à ne pas tomber dans les pièges de la corrélation (présence de quelques points qui portent l'essentiel de la corrélation, distribution des erreurs non uniforme, etc.).

D'un point de vue opérationnel, il est difficile de mesurer des débits strictement aux mêmes instants. De ce fait, les données au pas de temps journalier aux sites candidats sont jugées représentatives d'un débit instantané qui aurait été mesuré au même instant que le jaugeage au site cible. Cette hypothèse est recevable en saison d'étiage, période au cours de laquelle les variations infra-journalières de débits sont faibles.

Notons que le choix du site de référence parmi des bassins candidats voisins est réalisé *a posteriori* en fonction des observations disponibles. Il pourra être remis en cause si d'autres campagnes de jaugeages sont effectuées car les coefficients de corrélation seront amenés à évoluer, d'autant plus que le nombre initial de jaugeage est faible.

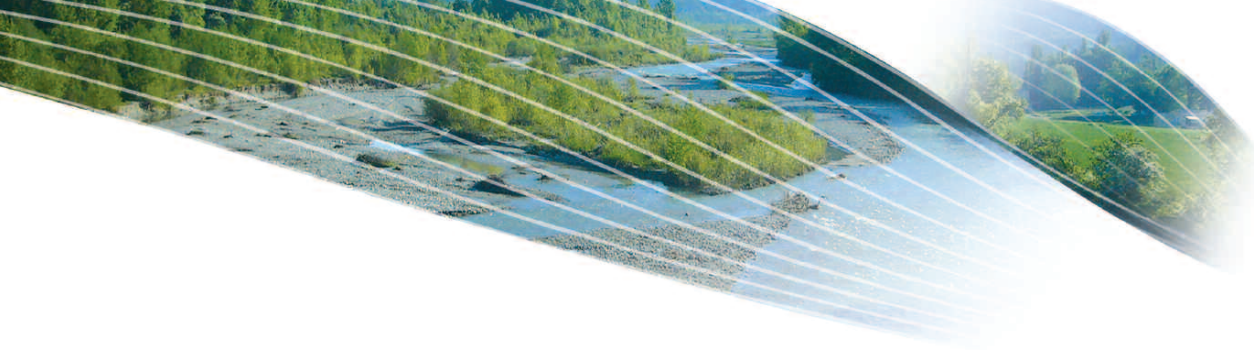
Dans une application pratique, cet ensemble de stations pourra être réduit sur la base de la carte des régimes hydrologiques ou d'une expertise plus approfondie des contextes hydro-climatiques du secteur d'intérêt. Des réflexions peuvent être engagées sur les processus dominants agissant sur les étiages du bassin versant cible.

Il est conseillé de rejeter une station candidate si la valeur de $QMNA5$ associée se situe en dehors de la gamme des débits concomitants aux mesures des $q_{cib}(t)$.

2.3 Étape 3 - Estimation du biais et de l'intervalle de confiance

Les coefficients du modèle décrivant le biais d'estimation (Eq. 6) et l'écart-type de l'erreur (Eq. 7) sont reportés dans le Tableau 1 et le Tableau 2, pages suivantes. Les valeurs des tableaux peuvent être calculées par interpolation linéaire pour des fréquences annuelles de jaugeage non échantillonnées.

L'évolution de l'écart-type de l'erreur est représentée sur la Figure 4, page suivante, en fonction de la fréquence annuelle de jaugeage F pour différentes durées de suivi D . L'expression des résultats en fonction de F et de D permet d'apprécier le « coût opérationnel » (nombre de déplacements sur le terrain par année et cumulé au fil des années) impliqué par le choix d'une stratégie de jaugeages. On pourra facilement transposer les résultats en termes de nombre de jaugeages ($N = D \cdot F$).



F	$\alpha(F)$	$\beta(F)$	$a(F)$	$b(F)$	$c(F)$
1	-0,91	1,1	-0,33	0,66	1,45
2	-0,93	1,14	-0,29	0,77	1,47
3	-0,94	1,15	-0,26	0,82	1,44
4	-0,92	1,16	-0,25	0,85	1,45
5	-0,94	1,18	-0,24	0,89	1,44

Tableau 1. Paramètres du modèle d'incertitude générique ajustés pour chaque fréquence annuelle de jaugeage F à l'échelle nationale. Les paramètres sont décrits dans les Eqs 6 et 7. Les paramètres sont exprimés en $l/s/km^2$.

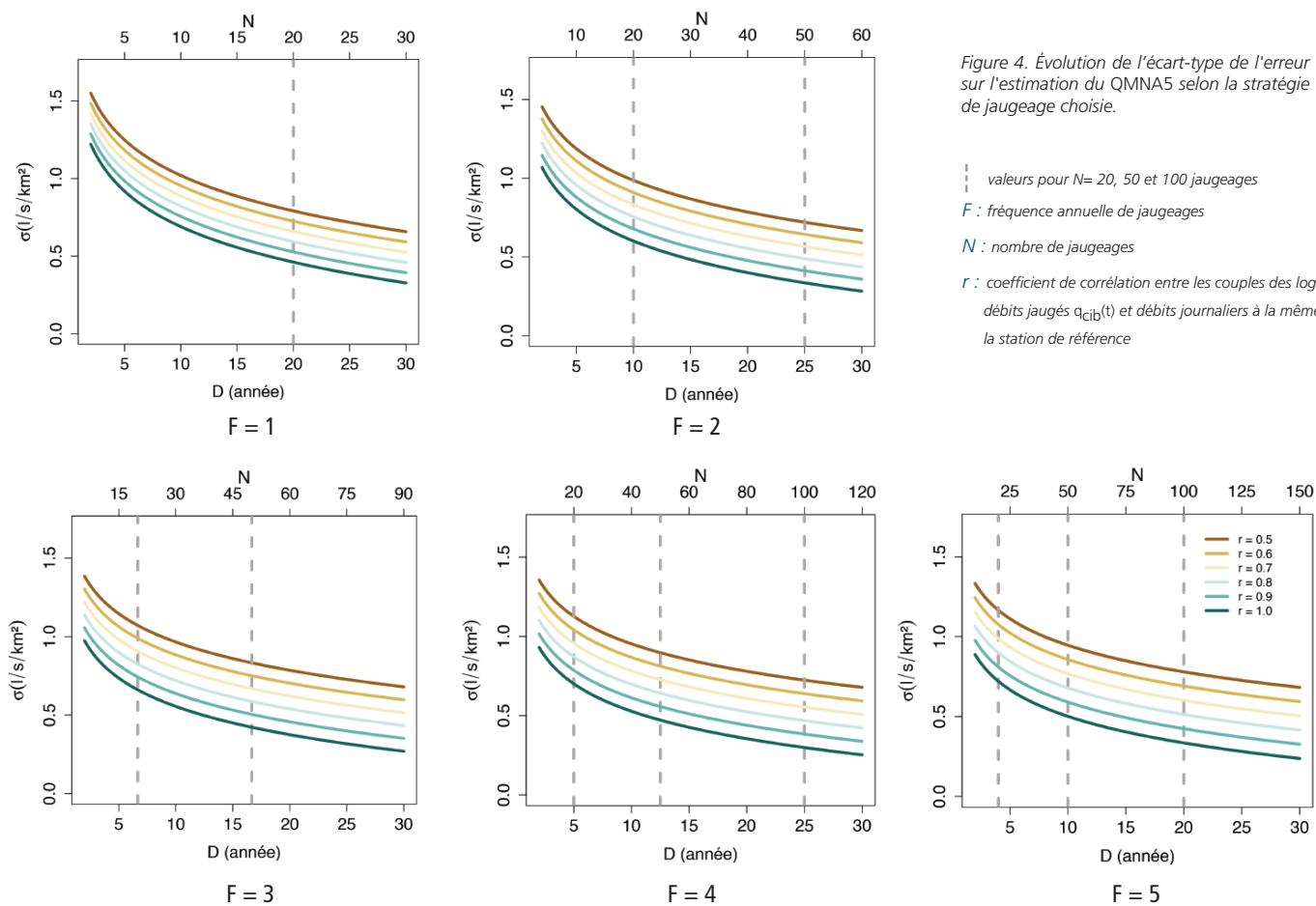
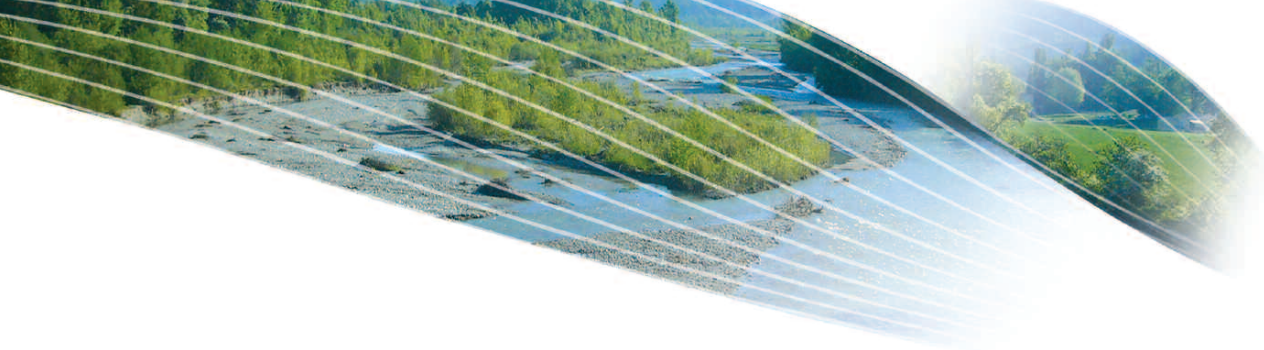


Tableau 2. Paramètres du modèle d'incertitude ajustés pour chaque fréquence annuelle de jaugeage F, par classe de régime (entre parenthèses, le nombre de stations par classe). Les paramètres sont décrits dans les Eqs 6 et 7. Les paramètres sont exprimés en l/s/km². Les paramètres concernant le régime 12 n'ont pas été calculés faute de stations en nombre suffisant.

Régime (effectif)	F	$\alpha(F)$	$\beta(F)$	$a(F)$	$b(F)$	$c(F)$
1 (30)	1	-1,38	1,64	-0,45	0,59	1,88
	2	-1,4	1,66	-0,4	0,68	1,89
	3	-1,41	1,68	-0,34	0,74	1,79
	4	-1,42	1,69	-0,32	0,77	1,77
2 (114)	1	-1,07	1,29	-0,37	0,43	1,58
	2	-1,1	1,33	-0,34	0,52	1,64
	3	-1,06	1,31	-0,29	0,53	1,57
	4	-1,09	1,34	-0,27	0,59	1,56
3 (87)	1	-1,05	1,29	-0,37	0,43	1,61
	2	-1,07	1,33	-0,33	0,47	1,61
	3	-1,05	1,32	-0,27	0,52	1,51
	4	-1,08	1,36	-0,26	0,55	1,51
4 (35)	1	-0,58	0,71	-0,21	0,32	0,94
	2	-0,56	0,71	-0,19	0,32	0,97
	3	-0,55	0,71	-0,15	0,33	0,91
	4	-0,54	0,71	-0,14	0,31	0,91
5 (93)	1	-0,49	0,59	-0,18	0,27	0,76
	2	-0,5	0,61	-0,16	0,29	0,79
	3	-0,48	0,6	-0,14	0,3	0,75
	4	-0,49	0,61	-0,13	0,31	0,74
6 (153)	1	-0,49	0,59	-0,17	0,28	0,73
	2	-0,48	0,59	-0,16	0,25	0,76
	3	-0,45	0,57	-0,13	0,24	0,73
	4	-0,43	0,56	-0,12	0,24	0,72
7 (25)	1	-0,84	0,99	-0,3	0,54	1,23
	2	-0,89	1,05	-0,27	0,63	1,25
	3	-0,87	1,05	-0,22	0,69	1,16
	4	-0,82	1,01	-0,2	0,66	1,16
8 (59)	1	-2,03	2,36	-0,67	1,44	2,58
	2	-2,06	2,37	-0,56	1,54	2,49
	3	-2,09	2,41	-0,46	1,66	2,27
	4	-2,08	2,4	-0,42	1,73	2,22
9 (16)	1	-2,94	3,43	-0,91	2,68	3,59
	2	-2,89	3,39	-0,82	2,61	3,66
	3	-3,03	3,48	-0,65	2,81	3,22
	4	-3,1	3,54	-0,61	3,01	3,14
10 (7)	1	-4,26	4,29	-0,96	4,54	4,8
	2	-4,15	4,32	-0,82	4,95	4,52
	3	-4,11	4,36	-0,8	5,73	4,38
	4	-4,23	4,49	-0,75	6,26	4,15
11 (13)	1	-5,37	5,21	-0,71	4,22	4,47
	2	-5,7	5,57	-0,71	5,98	4,09
	3	-5,8	5,68	-0,71	7,04	3,82
	4	-5,75	5,64	-0,68	7,61	3,6



L'analyse des paramètres ajustés pour le biais $\mu_{(r,N,F)}$ et l'écart-type $\sigma_{(r,N,F)}$ des erreurs montre que :

- $\alpha_{(F)}$ est négatif et varie peu avec la fréquence F des jaugeages et le biais diminue lorsque la corrélation augmente ;
- $a_{(F)}$ est négatif en cohérence avec une réduction de l'incertitude avec le nombre de jaugeages ;
- $b_{(F)}$ est positif et la contribution $b_{(F)}(1 - r)$ à l'incertitude totale diminue lorsque la corrélation r augmente ;
- le biais μ est toujours positif (à quelques exceptions près) et traduit une tendance à la surestimation du *QMNA5*. Il est peu sensible à la stratégie de jaugeages.

Malgré les regroupements opérés, les cours d'eau de montagne sont peu présents dans l'échantillon des 632 stations (les classes 9 à 11 rassemblent 36 bassins versants, éclatés entre les secteurs pyrénéens et alpins, ce qui limite les appariements tandis que les classes 4 à 6 regroupées comptent 281 stations). Les paramètres pour les classes 9 à 11 sont à considérer avec précaution. La fréquence $F = 5$ a été exclue car les contraintes sur le choix de la station de référence et de l'échantillonnage réduisent le nombre de couples de débits concomitants.

La Figure 5 représente les deux composantes μ et σ pour une fréquence $F = 3$ et une corrélation $r = 0,8$ pour les différentes classes de régime. Les évolutions du biais et de l'écart-type génériques sont également tracées pour permettre une comparaison. En toute logique, les biais sont globalement plus importants pour les bassins aux étiages soutenus (classe 1 et de 9 à 10) en particulier lorsqu'il y a peu de jaugeages. Les valeurs génériques se situent dans la moyenne des valeurs propres aux classes de régime. L'évolution atypique des biais des classes 10 et 11 pourrait témoigner de paramètres associés non stabilisés.

La recherche d'homogénéité est utile puisque identifier un site de référence dans la même classe conduit à une réduction significative des incertitudes sur l'estimation finale et de ce fait elle doit être encouragée. Des pistes de recherche sont possibles notamment pour identifier une classification plus pertinente (en lien avec l'hydrogéologie) ou d'enrichir le panel de bassins à composante nivale sur des secteurs alpins hors France pour donner plus de robustesse aux paramètres estimés sur ce type de bassins.

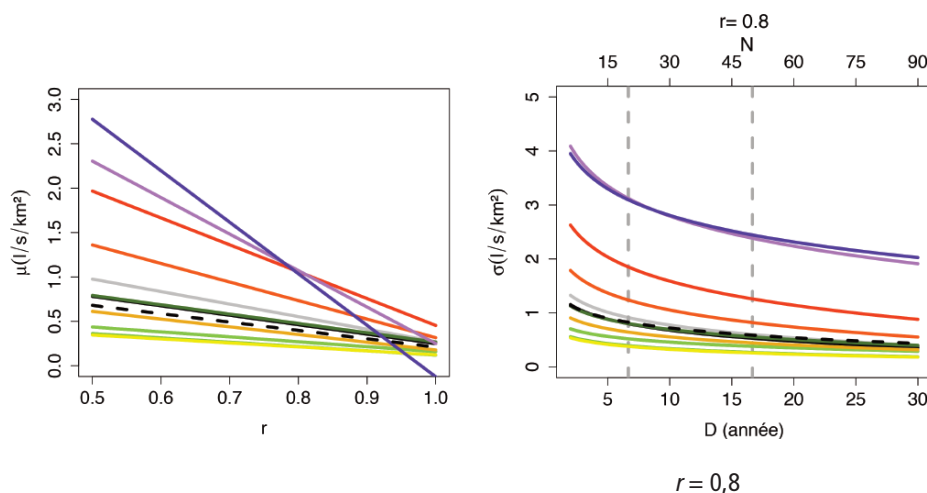
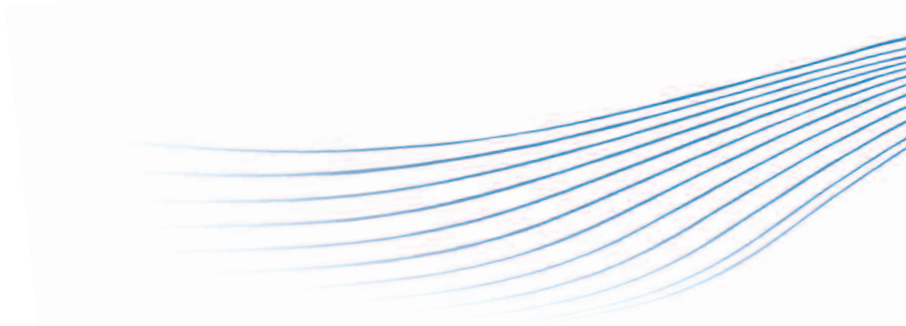


Figure 5. Évolution du biais et de l'écart-type selon les modèles d'incertitude ajustés par classe de régime pour $F = 3$ pour le biais et $F = 3$ et $r = 0,8$ pour l'écart-type.

Les couleurs des courbes correspondent aux classes de régime de la Figure 3, page 11.

--- valeurs pour $N = 20, 50$ et 100 jaugeages
 - - - - - valeurs obtenues sans distinction de classe



En pratique, les modèles pour la classe i sont applicables au site cible réputé de la classe i pour l'estimation du $QMNA5$ qui la concerne si et seulement si le bassin de référence est dans la même classe i ou dans une des classes adjacentes $i-1$ ou $i+1$. La confiance dans l'appréciation de la classe de régime au site cible conditionne l'usage des modèles spécifiques à la classe correspondante.

À l'issue de cette étape, il est possible de déduire une estimation du $QMNA5$ débiaisé, baptisée $QMNA5_{cib}$ (Eq. 4, page 9), qui sera la valeur finale à conserver. L'intervalle de confiance se construit en prenant $p = 90$ ou 95% , ce qui correspond à des valeurs $u_{(1+p)/2}$ égales à 1,64 et 1,96 pour l'application de l'Eq. 8, page 10.

2.4 Étape 4 (optionnelle) - Réflexion sur la stratégie de jaugeages

À l'issue de chaque campagne de jaugeage, sur la base de l'évolution du nombre de jaugeages disponibles et de la corrélation avec le site de référence, il est possible d'évaluer les gains attendus sur l'incertitude des débits (en modifiant les valeurs N , F et D des Eqs. 4 à 7, pages 9 et 10). Cette quantification permet d'orienter la stratégie de jaugeages. Elle éclaire sur la capacité d'aboutir à une estimation avec l'incertitude souhaitée dans un délai raisonnable.

Après consultation de la carte de consensus, et à la lumière des incertitudes sur le secteur concerné, il peut être envisagé d'initier des campagnes de jaugeages sur le site d'intérêt. Un calcul permet de calculer les combinaisons de fréquence des jaugeages F et du nombre d'années N à envisager pour une incertitude acceptable (nécessairement plus faible que celle proposée par la carte). La seule inconnue dans l'appréciation reste la corrélation r , en partie liée à la présence d'un bassin versant instrumenté à proximité.

L'analyse des incertitudes montre qu'au-delà de 20 jaugeages, les gains de performance sont moindres et qu'une fréquence de trois valeurs réparties dans la saison semble suffisante pour capturer la variabilité des débits d'étiage.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a proposé des recommandations générales jugées réalistes au regard des contextes explorés en métropole pour la mise en œuvre de la méthode. Les options proposées pourront être adaptées en intégrant l'expertise de l'opérateur sur l'hydrologie du secteur. Il est conseillé, en cas de doute, de procéder à des analyses de sensibilité pour arbitrer les choix finaux (en testant différents échantillons de jaugeages pour mesurer l'influence d'une ou de plusieurs valeurs, différentes stations candidates pour examiner la cohérence entre estimations finales de $QMNA5_{cib}$).



Cas d'étude, la Scie (Seine Normandie) et l'Asse (Alpes-de-Haute-Provence)

Dans cette section nous nous proposons d'illustrer en détail l'application de la méthode présentée précédemment pour l'estimation du $QMNA5$ dans un cadre opérationnel.

Le premier exemple exploite des données de jaugeages réalisés par la Dreal Haute-Normandie, bancarisées par l'Agence de l'eau Seine-Normandie, transmises dans le cadre d'un projet de recherche portant sur la régionalisation. Le site choisi est celui de la Scie à Hautot-sur-Mer (Seine Maritime), à proximité de son débouché à la mer.

Le second exemple est issu d'une collaboration avec la Dreal Provence Alpes Côte d'Azur (PACA) sur le bassin de l'Asse (Alpes-de-Haute-Provence), à hauteur de l'un des sept points stratégiques prévus par le Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) sur le bassin pour assurer le suivi des étiages (lieu-dit « La Julienne »).

3.1 La Scie, un exemple en contexte océanique influencé par des aquifères

La Scie est un des petits fleuves côtiers de Haute-Normandie (Figure 6). A son débouché à la mer au droit de Pourville-sur-Mer, ce cours d'eau draine environ 220 km². Les cours d'eau dans ce secteur traversent des terrains crayeux du crétacé supérieur. Les débits sont influencés par les apports de puissants aquifères continus qui contribuent fortement aux écoulements de surface, quelle que soit la période de l'année. Les régimes hydrologiques sont de type pluvial océanique avec de faibles contrastes saisonniers (classe 1 et 2 de la Figure 3, page 11). Citons en exemples : l'Authie à Dompierre-sur-Authie (784 km² ; E5505720), station située dans la Somme et l'Yères à Touffreville-sur-Eu (267 km² ; G1003010) station située en Seine-Maritime (Figure 7, page 19).

La Scie est, à l'image des bassins voisins, vraisemblablement influencée par les aquifères de la Craie susceptibles de masquer la variabilité climatique en raison de l'inertie des systèmes souterrains. Le régime attendu à Hautot-sur-Mer est certainement de classe 1, comme le suggère la Figure 3, page 11. La saison d'étiage est peu marquée et la période de sélection des jaugeages peut être raisonnablement étendue à quatre mois, c'est-à-dire du mois de juillet au mois d'octobre inclus.

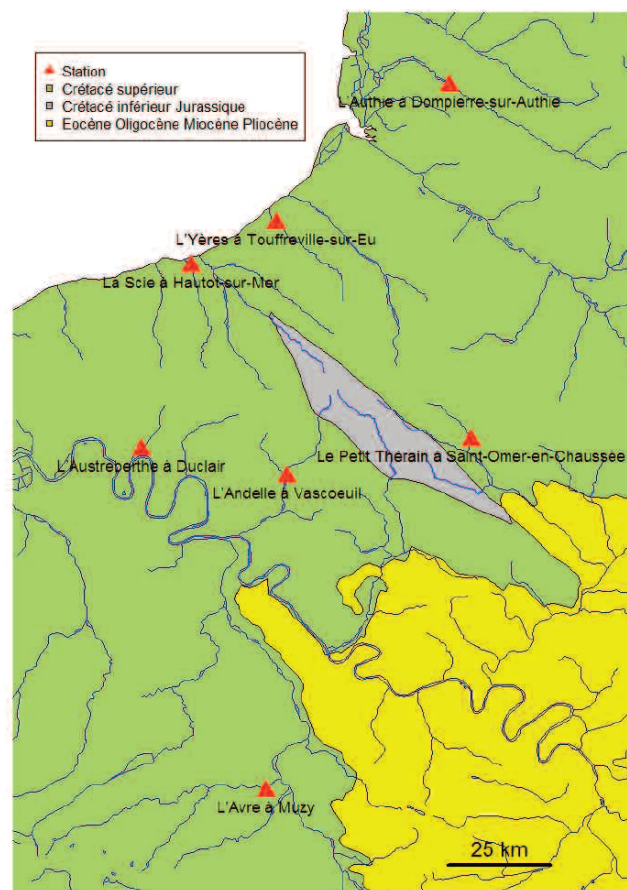


Figure 6. Localisation de la station cible (la Scie à Hautot-sur-Mer) et les stations hydrométriques exploitées dans le cas d'étude, sur fond de carte simplifiée du réseau hydrographique et de la géologie.

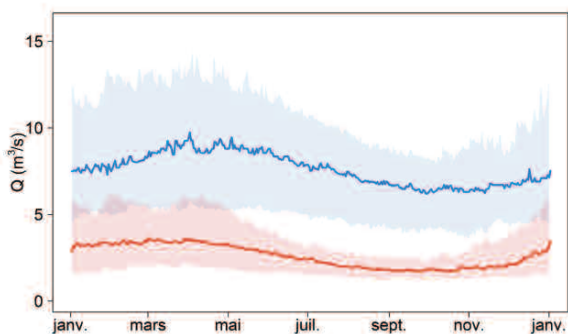


Figure 7. Médiane et enveloppe définie par les premiers et derniers déciles des débits journaliers de l'Authie à Dompierre-sur-Authie (bleu) et de l'Yères à Touffreville-sur-Eu (rouge) - Source des données : HYDRO.

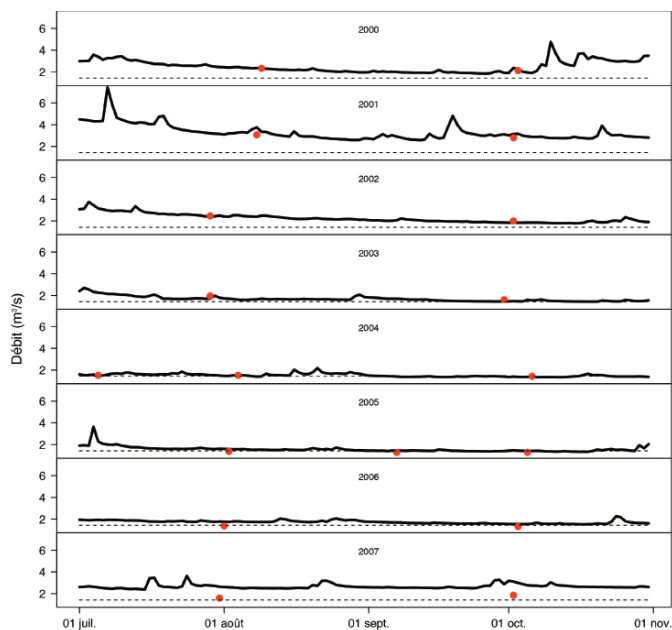
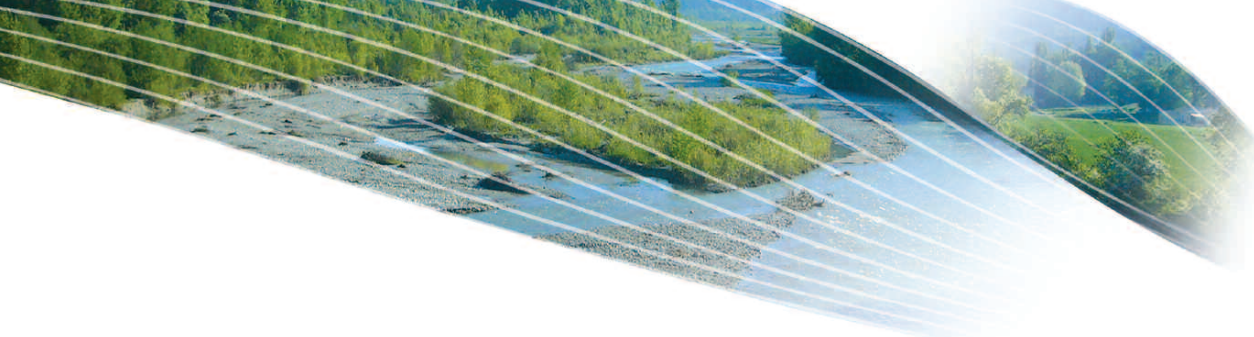


Figure 8. Examen visuel des jaugeages retenus (●) et confrontation avec les débits journaliers de l'Yères à Touffreville-sur-Eu (G1003010) (—)
 - - - - : valeur dépassée 90% du temps pour l'Yères à Touffreville-sur-Eu pour les années 2000-2007.
 Source des données : HYDRO, Dreal Haute-Normandie, Agence de l'eau Seine Normandie.

L'analyse critique des données pour isoler des débits influencés par des précipitations n'est pas aisée. Les bassins du secteur examiné sont en effet peu réactifs aux impulsions de pluie et les étés sont souvent synonymes de lentes récessions déterminées par les conditions climatiques des mois antérieurs (Figure 8). Il est difficile de déceler une réponse à une impulsion de pluie dans un tel système. Finalement les 100 valeurs de débits relevés de juillet à octobre entre 1968 et 2007 ont toutes été conservées, soit une fréquence moyenne de 2,5 jaugeages par an. Notons que les jaugeages n'ont pas été acquis avec la même régularité : dans les années 1970, une mesure par mois était réalisée contre une environ tous les deux mois dans les années 2000.



Sélection du site de référence

Les coordonnées du centre de gravité du bassin drainé amont de Hautot-sur-Mer sont $X_{cib} = 508500$ m ; $Y_{cib} = 2545500$ m (Lambert 2 étendu). La recherche de stations de référence parmi les 632 considérées (Figure 1, page 7) s'effectue dans un rayon de 200 km autour du point $(X_{cib} ; Y_{cib})$ et présentant un régime hydrologique océanique influencé par les écoulements souterrains (classes 1 et 2). Finalement (Tableau 3), deux (respectivement quatre) stations hydrométriques parmi les 29 pré-identifiées présentent un coefficient de corrélation r supérieur à 0,85 (respectivement 0,80). Les périodes de disponibilité des données pour les calculs sont différentes et il est donc difficile de départager les sites candidats. Le choix a été fait de conserver les cinq stations et d'y appliquer la méthode.

Tableau 3. Détail des résultats d'estimation obtenus sur la plus longue période disponible pour les stations candidates - Source des données : HYDRO, Agence de l'eau Seine Normandie, Dreal Haute-Normandie.

Station	Classe	Distance (km)	Période	D (an)	N	F	r	QMNA5 _{cib} (m ³ /s)	IC95% (m ³ /s)
L'Authie à Dompierre-sur-Authie	1	98	1968-2007	39	99	2,538	0,847	1,15	1,04 1,26
Le Petit Thérain à Saint-Omer-en-Chaussée	1	62	1968-2007	37	85	2,297	0,835	1,17	1,05 1,28
L'Andelle à Vascoeuil	1	32	1973-2007	32	73	2,281	0,862	1,19	1,06 1,33
L'Avre à Muzy	2	115	1971-2007	34	75	2,206	0,783	1,13	0,98 1,28
L'Austreberthe à Duclair	1	22	1965-1998	31	80	2,581	0,854	1,14	1,00 1,28

D : durée de suivi

N : nombre de jaugeages concomitants

F : fréquence annuelle de jaugeages

r : coefficient de corrélation entre les couples des logarithmes des débits jaugés $q_{cib}(t)$ et débits journaliers à la même date à la station de référence

IC95% : intervalle de confiance à 95%.

Estimation du QMNA5 et des incertitudes associées

Prenons l'exemple du calcul avec les données de l'Andelle à Vascoeuil, présenté dans le Tableau 3. Le coefficient de corrélation établi entre les logarithmes des débits concomitants sur toute la période considérée est égal à $r = 0,862$ et la relation empirique ajustée est la suivante :

$$q_{cib}(t) = 0,704 [q_{ref}(t)]^{0,711} \quad (\text{Eq. 9})$$

L'estimation biaisée au site cible s'obtient en appliquant la formule précédente au QMNA5 de l'Andelle à Vascoeuil calculée sur la période complète antérieure à 2007 ($QMNA5_{ref} = 2,344$ m³/s). La conversion en l/s/km² est effectuée avec une surface drainée à Hautot-sur-Mer de 217 km².

$$QMNA5^* = 0,704 [QMNA5_{ref}(t)]^{0,711} = 1,290 \text{ m}^3/\text{s} = 5,945 \text{ l/s/km}^2 \quad (\text{Eq. 10})$$

Le régime attendu à Hautot-sur-Mer est certainement de classe 1, comme annoncé plus haut. Les régimes des bassins candidats oscillent entre la classe 1 et la classe 2 ; ceci rend légitime l'usage du modèle d'incertitude associé à la classe 1.

Sur la période 1973-2007, trois années n'ont pas de jaugeages. La durée effective de suivi D est donc 32 ans avec un total de $N = 73$ jaugeages. Il vient donc $F = 2,281$.

Cette fréquence de 2,281 étant absente du Tableau 2, page 15, il est nécessaire d'interpoler les valeurs considérées entre $F = 2$ et $F = 3$. Les différents paramètres $x(F)$ recherchés sont obtenus en utilisant la formule :

$$x(F) = (x_3 - x_2)(F - 2) + x_2 \quad (\text{Eq. 11})$$

avec F entre 2 et 3. Les paramètres du biais en considérant le modèle d'incertitude de la classe 1 sont ainsi : $\alpha_{(2,281)} = -1,403$ et $\beta_{(2,281)} = 1,666$. Le biais s'en déduit (Eq. 6) :

$$\mu_{(r,N,F)} = \mu_{(0,862; 24;3)} = -1,403 \cdot 0,862 + 1,666 = 0,457 \text{ l/s/km}^2 \quad (\text{Eq. 12})$$

De la même façon, nous obtenons $a_{(2,281)} = -0,383$, $b_{(2,281)} = 0,697$ et $c_{(2,281)} = 1,862$ et un écart-type (Eq. 7) :

$$\sigma_{(r,N,F)} = \sigma_{(0,862;73;2,281)} = -0,383 \cdot \ln(73) + 0,697 \cdot (1 - 0,862) + 1,862 = 0,315 \text{ l/s/km}^2 \quad (\text{Eq. 13})$$

L'estimation corrigée du biais est :

$$QMNA5_{cib} = 5,945 - 0,457 = 5,488 \text{ l/s/km}^2 = 1,191 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{Eq. 14})$$

et l'intervalle de confiance à 95% (IC95%) se déduit de l'écart-type et du quantile normal centré réduit $u_{0,975}$ de fréquence au non-dépassement 97.5% (= 1.960) :

$$\begin{aligned} IC95\% &= [5,488 - u_{0,975} \sigma_{(0,862;73;2,281)} ; 5,488 + u_{0,975} \sigma_{(0,862;73;2,281)}] \\ &= [4,871 ; 6,105] \text{ l/s/km}^2 = [1,057; 1,325] \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{Eq. 15}) \end{aligned}$$

Les calculs ont été effectués pour toutes les stations candidates du Tableau 3 et au fil des années, pour mesurer la sensibilité au choix de la station de référence et à l'apport de données supplémentaires au fil des ans depuis 1968. Les résultats sont présentés en Figure 9.

Globalement, les estimations au site cible sont cohérentes, oscillant entre 1,13 et 1,19 m³/s. Les intervalles de confiance sont fortement recouvrants. Une analyse plus détaillée montre que :

- la station de l'Avre semble devoir être écartée du fait d'une corrélation entre les logarithmes des débits plus faible que celles obtenues avec les autres sites candidats ; plusieurs raisons peuvent être avancées, comme la morphologie particulière en amont (lit perché) ou les prélèvements via l'aqueduc de l'Avre pour alimenter Paris en eau potable ;
- la station de l'Austreberthe conduit à des incertitudes les plus fortes ; en outre, elle est arrêtée depuis 1998 et son choix est contestable dans une perspective d'exploitation des jaugeages les plus récents ou de la poursuite des mesures de débit.

Sur cette base, nous pouvons les exclure.

Pour les trois autres stations :

- l'estimation de $QMNA5$ au site cible n'est pas le résultat d'une extrapolation (c'est-à-dire la gamme des débits aux dates des jaugeages intègre la valeur de $QMNA5$ de chaque site candidat) (Figure 9.a, 9.b, 9.c) ;
- les estimations sont stabilisées lorsque le nombre de jaugeages atteint 20 (autour de 1985 pour le Petit Thérain et l'Andelle et de 1980 pour l'Authie) (Figure 9.d) ;
- les variations dans les années 1970 sont dues à des relations empiriques moins robustes et des estimations de $QMNA5$ au site de référence incertaines du fait de chroniques courtes ;
- l'incertitude sur l'estimation déduite de l'Andelle reste la plus forte du fait de données moins nombreuses pour établir la relation.

Le choix parmi les trois stations ne peut être définitif sur la base des seules données de débit. Il semble ici peu important. Une logique géographique inciterait à retenir la station la plus proche parmi les trois, c'est-à-dire l'Andelle à Vascoeuil (H8212010) qui partage la ligne de crête avec la Scie. C'est celle qui présente le coefficient de corrélation le plus élevé, et cela bien que l'Andelle présente en tête de bassin des formations du Pays de Bray (crétacé inférieur, jurassique), très peu perméables et très différentes de celles de la craie du crétacé supérieur qui constituent l'essentiel du bassin versant de la Scie.

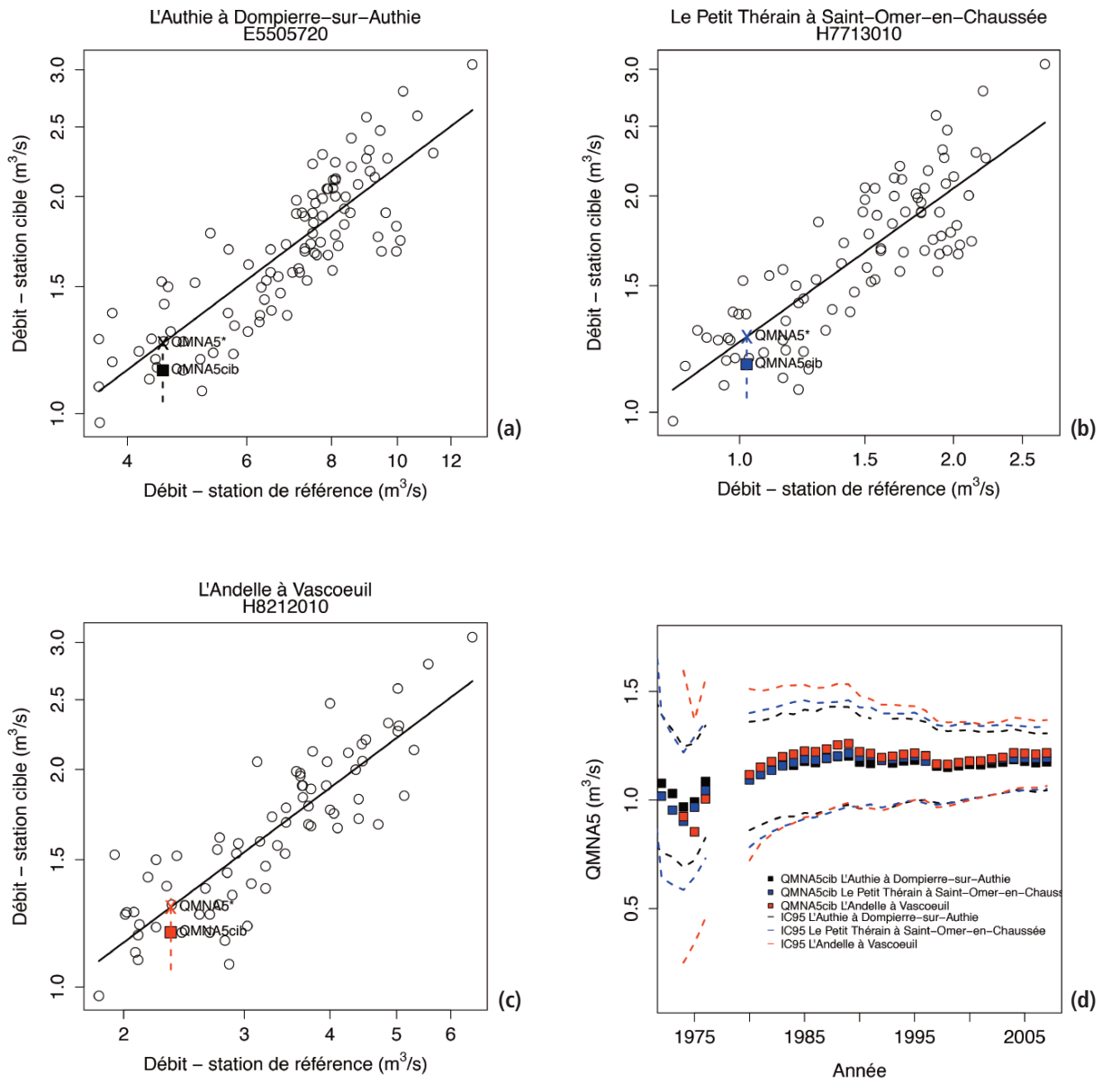
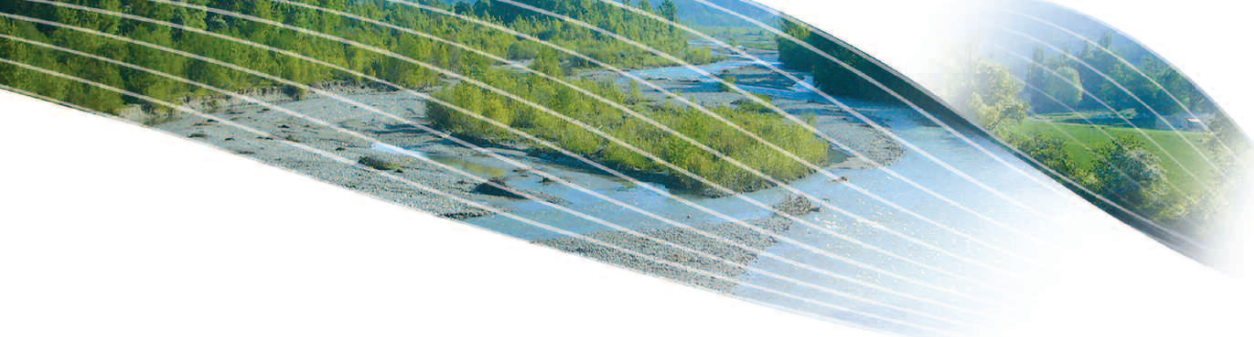


Figure 9. Ajustements réalisés et estimations du QMNA5 de la Scie associées sur l'ensemble de la période disponible (a, b, c). Evolution de l'estimation corrigée du biais QMNA5_{ciB} et de l'intervalle de confiance à 95% en fonction des années disponibles (d).

- relations ajustées par régression linéaire sur les logarithmes des débits (a, b, c)
- - - limites de l'intervalle de confiance IC95% à 95%
- couples de débits concomitants mesurés
- X estimation QMNA5* issue de la formule empirique
- estimation corrigée du biais QMNA5_{ciB}

L'utilisation du modèle d'incertitude générique conduit aux valeurs du Tableau 4. Les incertitudes mesurées par l'extension de l'IC95% sont proches de celles obtenues avec le modèle spécifique de la classe 1, mais sont légèrement plus fortes.

Tableau 4. Comparaison des intervalles de confiance établis à partir des paramètres génériques.

Station	F	r	QMNA5 _{cib} (m ³ /s)	IC95% (m ³ /s)
L'Authie à Dompierre-sur-Authie	2,538	0,847	1.18	1,04 1,31
Le Petit Thérain à Saint-Omer-en-Chaussée	2,297	0,835	1.19	1,05 1,34
L'Andelle à Vascoeuil	2,281	0,862	1.22	1,06 1,37
L'Avre à Muzy	2,206	0,783	1.16	0,99 1,34
L'Austreberthe à Duclair	2,581	0,854	1.17	1,01 1,32

F : fréquence annuelle de jaugeages

r : coefficient de corrélation entre les couples des logarithmes des débits jaugés $q_{cib}(t)$ et débits journaliers à la même date à la station de référence

IC95% : intervalle de confiance à 95%.

3.2 L'Asse, un exemple en contexte pluvio-nival sous climat méditerranéen

L'Asse est un affluent rive gauche de la Durance dont l'exutoire se situe entre les communes d'Oraison et de Manosque dans le département des Alpes-de-Haute-Provence. Au droit de la confluence avec la Durance, la surface drainée par le bassin atteint 692 km². L'altitude y varie entre 320 mètres à l'exutoire et 2 280 mètres à sa source sur la montagne du Cheval Blanc pour une altitude médiane de 780 mètres.

Des distinctions en rapport avec la géologie et la topographie (Figure 10) sont à souligner en termes :

- de contexte climatique, plutôt humide à dominante montagnarde en amont de la Clue de Chabrières et de type plus méditerranéen en aval de celle-ci ;
- d'hydrologie avec l'existence d'échanges actifs entre l'Asse et sa nappe d'accompagnement qui peut conduire à des assècs estivaux sur la partie du linéaire aval ;
- d'occupation des sols, avec une prédominance de la forêt dans les zones de relief et une prédominance des zones cultivées dans la plaine alluviale.

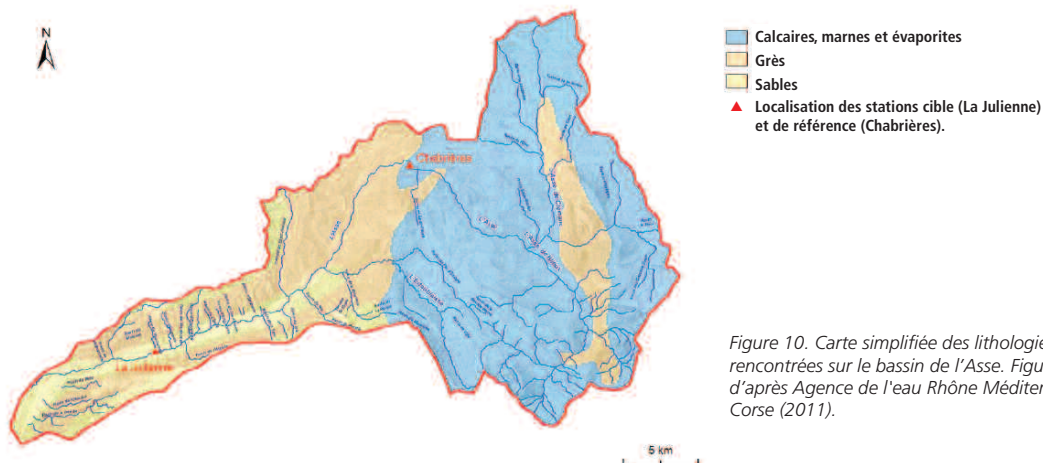
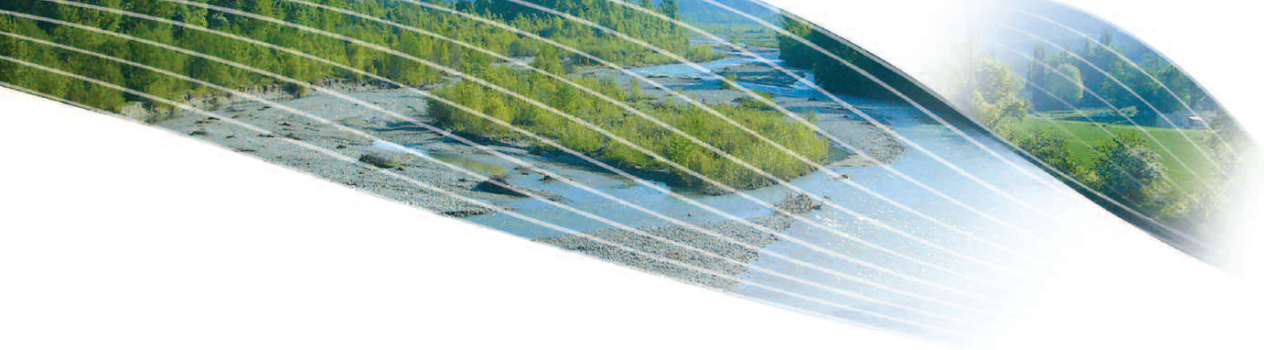


Figure 10. Carte simplifiée des lithologies rencontrées sur le bassin de l'Asse. Figure modifiée d'après Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse (2011).



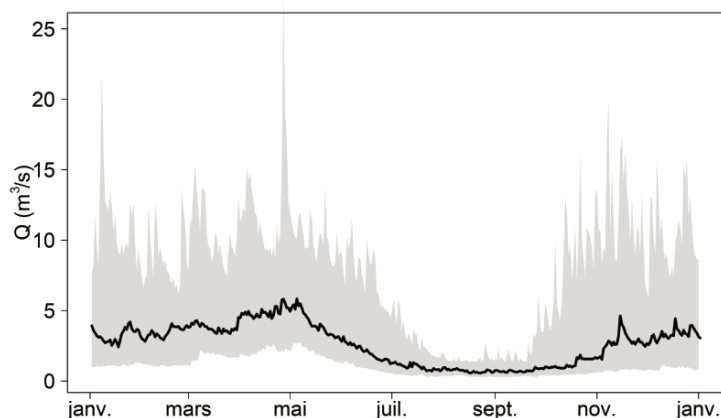
La présence de cultures irriguées vient altérer le régime naturel des eaux en période estivale (prélèvements en nappe notamment). L'étude volume prélevable (Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2011) fait état de prélèvements moyens de l'ordre de 12,4 millions de m³ par an à l'échelle du bassin versant, se concentrant dans la partie aval entre juin et septembre (à hauteur de 83 % du total) mais très variables d'une année à l'autre. Les prélèvements pour l'irrigation gravitaire sont majoritaires et les retours au milieu sont estimés à 73 % du total annuel.

Analyse des données disponibles

Données de la station hydrométrique de l'Asse à Chabrières

Le bassin de l'Asse est équipé d'une station hydrométrique pérenne située à hauteur de la Clue de Chabrières (code X1424010 de la banque HYDRO, $S = 375 \text{ km}^2$). Gérée par EDF, elle comporte plus de 50 années d'enregistrement disponibles. Le bassin amont est représentatif des cours d'eau au régime pluvio-nival avec une saison de basses eaux principale en été centrée autour du mois d'août, et un minimum secondaire en février, lié à la rétention d'une partie des précipitations sous forme solide en tête de bassin (Figure 11).

Figure 11. Médiane (—) et enveloppe (■) définie par les premiers et derniers déciles des débits journaliers de l'Asse à la Clue de Chabrières (période 1979-2011) - Source des données : HYDRO.



Le bassin peut être qualifié d'assez peu productif à la Clue de Chabrières avec un $QMNA5$ spécifique de l'ordre 1 l/s/km², inférieur aux valeurs observées sur les autres affluents de la Durance instrumentés en amont de la confluence avec le Verdon : de l'ordre de 3,5 l/s/km² pour le Bes à la Javie, 2 l/s/km² pour le Buech à Serre (Les Chambons) ou encore 4,5 l/s/km² pour l'Ubaye au Lauzet-Ubaye (Roche Rousse).

Données de jaugeages à la Julienne

Le site de la Julienne est situé dans la partie aval de l'Asse, à hauteur du hameau du même nom, en rive droite de la plaine alluviale. Ce point draine une surface de 624 km², soit 90 % de la surface totale du bassin de l'Asse. Le cours d'eau présente sur ce site une configuration en tresses avec évolution latérale de la position des chenaux, peu propice à l'implantation d'une station de mesures en continu.

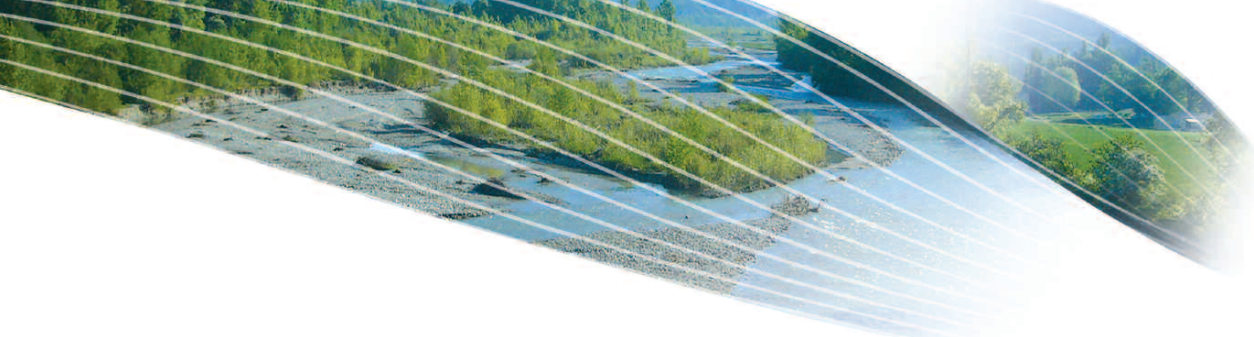
Ce site a fait l'objet d'un suivi par jaugeages sur la période allant de 2004 à 2010 par la Direction départementale des territoires des Alpes-de-Haute-Provence. Le nombre de jaugeages disponibles y est assez important avec un minimum de neuf mesures de débit réalisées dans une année civile (Tableau 5). L'analyse du régime observé à La Clue de Chabrières et de la carte des régimes présentée plus haut (Figure 3, page 11) invite à restreindre l'échantillon de données au trois mois juillet-août-septembre. Cette période concentre la majorité des campagnes de terrain. Des débits en dehors de l'été sont *a priori* moins représentatifs du régime de basses eaux. Sur la chronique observée à la Clue de Chabrières entre 1979 et 2011, nous enregistrons trois valeurs de *QMNA* en octobre et une seule en janvier (1981). Des étiages hivernaux plus sévères qu'en été restent exceptionnels sur ce bassin. Une analyse de sensibilité pourrait être engagée pour mesurer l'intérêt d'exploiter les données en dehors de la fenêtre, ici estivale, de trois mois.

Tableau 5. Dénombrement des jaugeages réalisés au site de la Julienne sur la période 2004-2010 - Source des données : Dreal PACA.

Année	Nombre de jaugeages	
	Dans l'année	Durant le trimestre le plus sec
2004	9	6
2005	11	10
2006	21	13
2007	13	11
2008	13	10
2009	9	7
2010	10	6
2011	17	13
Total	103	76

La confrontation des jaugeages aux débits de la Clue de Chabrières montre que toutes les mesures n'ont pas été réalisées en phase de tarissement et toutes ne sont donc pas exploitables. La concordance entre débits mesurés aux deux sites pourtant « emboîtés » n'est pas systématique, avec des écarts parfois positifs et parfois négatifs (Figure 12, page suivante).

Dans cette application, la critique des données est largement facilitée par l'existence d'un site de référence situé sur le même linéaire que le site cible et suffisamment proche de celui-ci. Cette configuration permet de replacer les jaugeages dans les conditions au moment des mesures. Notons ainsi le cas particulier des jaugeages du 6 juillet 2006. À ce jour correspond une hausse marquée de débit en amont (brève remontée des débits) qui n'est peut-être pas parvenue jusqu'au



site de la Julienne au moment du jaugeage. Cet exemple montre que confronter un débit instantané à un débit moyen journalier peut soulever des interrogations du fait notamment de l'existence d'une réponse à des précipitations différée entre les deux sites (du fait du temps de transit entre les points d'un même linéaire). Le contexte du jaugeage du 9 septembre 2006 est similaire. Les variations de débits constatées ont été importantes dans la journée. Ces jaugeages n'ont pas été retenus dans l'échantillon final.

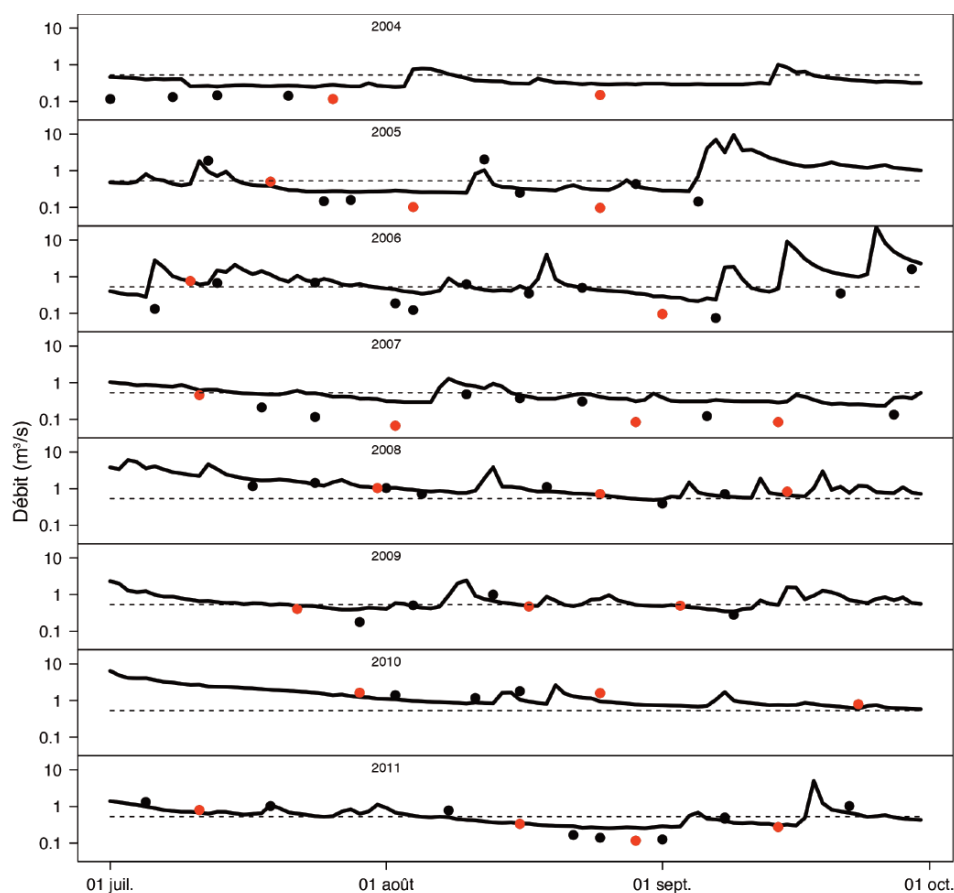
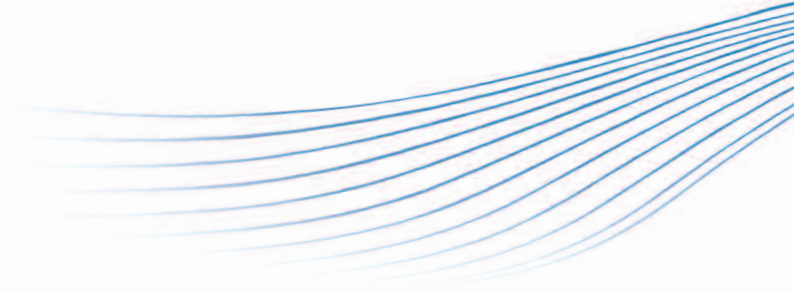


Figure 12. Examen visuel des jaugeages (• : non retenu ; • : conservé) et confrontation avec les débits journaliers de l'Asse à la Clue de Chabrières (—).
 ---- : valeur dépassée 90 % du temps pour la station de la Clue de Chabrières ; représentation semi-log.

Dans le cas présent, la disponibilité d'un jeu de données de jaugeages relativement étoffé peut autoriser la sélection de plusieurs échantillons pour l'estimation du QMNA5, selon les choix effectués par l'opérateur.



En premier lieu, nous avons cherché à identifier une mesure par épisode de tarissement, pour assurer une indépendance des valeurs au sein des échantillons. Pour certaines années, les séquences prolongées de tarissement sont relativement faciles à isoler (par exemple 2005 et 2010), moins pour d'autres (par exemple 2008). En second lieu, ont été privilégiés les débits aux dates pour lesquelles le débit observé à la station de référence était inférieur au quantile de la courbe de débits classés de fréquence au non-dépassement 10 % (0,53 m³/s), en respectant au mieux la contrainte d'espacement de 15 jours. Pour certaines années, peu d'enregistrements se situent au-dessous de 0,53 m³/s sur la saison estivale (par ex. 2008 et 2010), donc des données supérieures au seuil ont été malgré tout conservées (9 sur les 24 finalement retenues), représentatives d'un contexte plutôt humide. Enfin, la constitution de l'échantillon s'est appuyée sur l'expertise de la Dreal PACA (Fernandez, 2012), notamment sur les conditions de mesure (cf. commentaires plus haut sur la campagne de 2006).

A l'issue de l'étape de critique des données, un total de $N = 24$ jaugeages est conservé sur une durée de $D = 8$ ans, soit une fréquence moyenne $F = 3$ jaugeages/an.

Sélection du site de référence

Les coordonnées du centre de gravité du bassin drainé par le site de La Julienne sont $X_{cib} = 918500$ m ; $X_{cib} = 1891500$ m (Lambert 2 étendu). La recherche de stations de référence est circonscrite à 200 km de ce point pour garantir une homogénéité climatique, les stations candidates faisant partie des 632 sites mentionnés préalablement (Figure 1, page 7). Parmi les 48 stations présélectionnées, 34 présentent un caractère pluvio-nival (classes 7 à 9), comme présumé pour l'Asse à La Julienne ; elles forment le jeu de stations potentiellement de référence.

Les coefficients de corrélation entre les logarithmes des débits concomitants aux dates de jaugeage évoluent entre 0,01 et 0,96. Sans réelle surprise, la station de la Clue de la Chabrières présente dans les sites potentiels est celle pour laquelle la corrélation est la plus forte. Cette station constitue donc le site de référence. Il est peu vraisemblable que ce choix soit remis en cause par un autre échantillon de jaugeages : une partie des débits de la Julienne hérite des contributions de la Clue de Chabrières et les corrélations avec les autres stations restent inférieures à 0,8.

Estimation du QMNA5 et des incertitudes associées

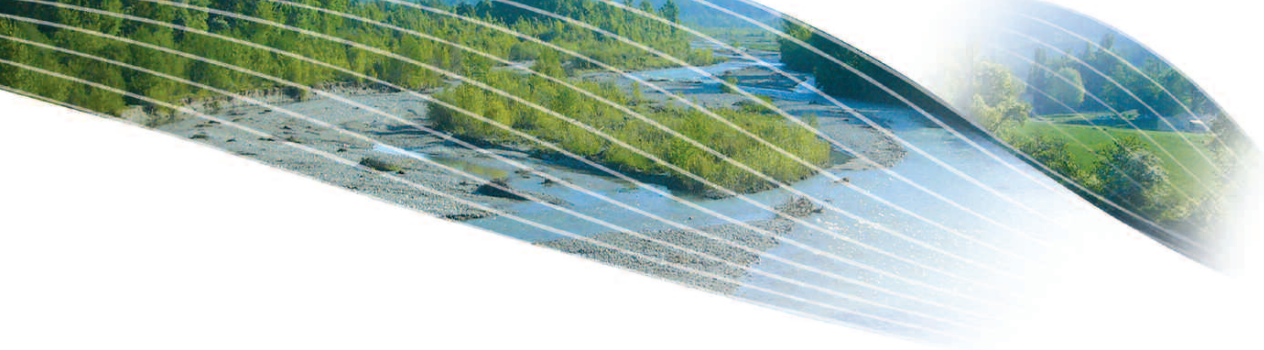
Une régression sur les logarithmes des débits a été ajustée sur les couples de débits concomitants. Le coefficient de corrélation atteint $r = 0,92$ et la relation empirique entre les débits des deux sites est la suivante :

$$q_{cib}(t) = 1,478 [q_{ref}(t)]^{1,965} \text{ (Eq. 16)}$$

Cette relation appliquée au QMNA5 de référence calculé à la Clue de Chabrières sur la période complète 1979-2011 (les années antérieures présentant des débits en paliers successifs en été ont été exclues) fournit l'estimation au site cible :

$$QMNA5^* = 1,478 [QMNA5_{ref}]^{1,965} = 0,294 \text{ m}^3/\text{s} = 0,472 \text{ l/s/km}^2 \text{ (Eq. 17)}$$

avec $QMNA5_{ref} = 0,440$ m³/s en considérant la surface drainée de 624 km² à La Julienne.



Une incertitude forte pèse sur le régime hydrologique au droit de la Julienne. L'amont de bassin présente une composante pluvio-nivale observée à la Clue de Chabrières, mais les échanges nappes-rivières actifs rendent incertaine l'attribution à une classe de régime parmi les 11 référencées ; de plus les interactions humaines interrogent quant à la légitimité d'appliquer des modèles d'incertitude sur des données influencées. Toutes ces réserves étant exprimées, nous avons choisi d'appliquer, malgré tout, les modèles les plus neutres et les plus génériques.

Avec les paramètres $F = 3$, $N = 24$, $r = 0,922$, en considérant les abaques du Tableau 1, page 14, il vient un biais attendu de :

$$\mu(r,N,F) = \mu(0,922;24;3) = -0,94 \cdot 0,922 + 1,15 = 0,283 \text{ l/s/km}^2 \quad (\text{Eq. 18})$$

et un écart-type de :

$$\sigma(r,N,F) = \sigma(0,922;24;3) = -0,26 \cdot \ln(24) + 0,82 \cdot (1 - 0,922) + 1,44 = 0,678 \text{ l/s/km}^2 \quad (\text{Eq. 19})$$

L'estimation corrigée du biais est :

$$QMNA5_{cib} = 0,472 - 0,283 = 0,189 \text{ l/s/km}^2 = 0,118 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{Eq. 20})$$

et l'intervalle de confiance à 95 % (IC95%) se déduit de l'écart-type et du quantile normal centré réduit $u_{0,975}$ de fréquence au non-dépassement 97,5 % (= 1,960) :

$$IC95\% = [0,189 - u_{0,975} \sigma(0,922;24;3) ; 0,189 + u_{0,975} \sigma(0,922;24;3)] \\ = [-1,140 ; 1,518] \text{ l/s/km}^2 \quad (\text{Eq. 21})$$

Les valeurs de débit étant positives, finalement, l'intervalle IC95 % retenu est :

$$IC95\% = [0 ; 1,518] \text{ l/s/km}^2 = [0 ; 0,946] \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{Eq. 22})$$

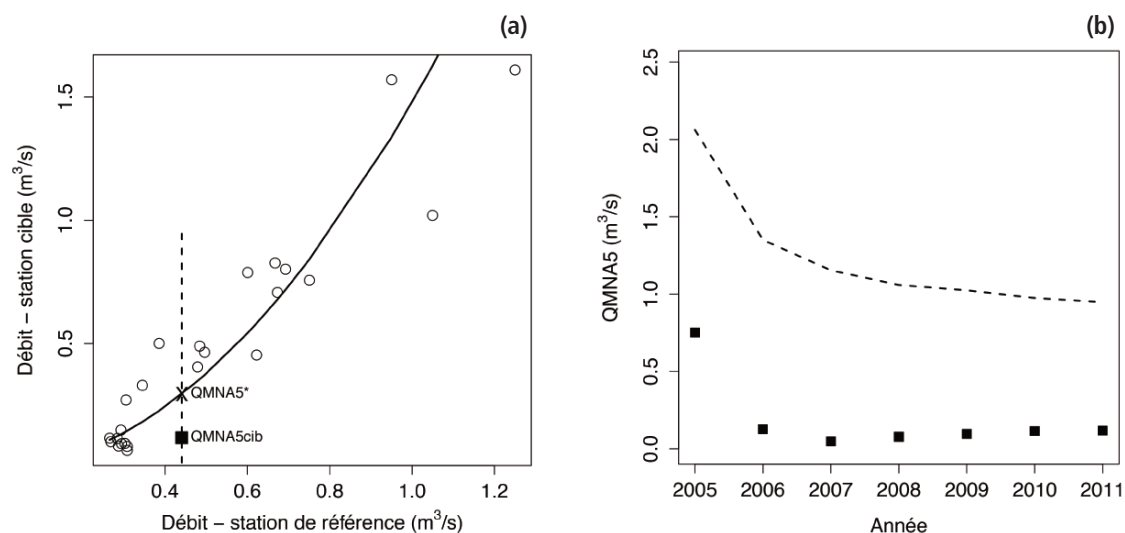
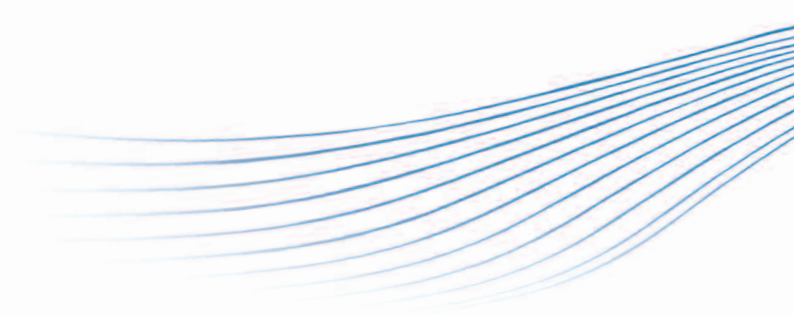


Figure 13. Ajustements réalisés et estimations du QMNA5 de l'Asse associées sur l'ensemble de la période disponible (a). Évolution de l'estimation corrigée du biais QMNA5_{cib} et de l'intervalle de confiance à 95 % en fonction des années disponibles (b).

- relation ajustée par régression linéaire sur les logarithmes des débits (a)
- - - limites de l'intervalle de confiance IC95% à 95 %
- couples de débits concomitants mesurés
- X estimation QMNA5* issue de la formule empirique
- estimation corrigée du biais QMNA5_{cib}



La Figure 13 synthétise l'ensemble des opérations et calculs réalisés.

La question de la sensibilité de l'estimation aux caractéristiques des jaugeages a été examinée. Le Tableau 6 illustre l'évolution des estimations au fil des années, en tenant compte également de l'évolution des valeurs de $QMNA5$ du site de référence. Les calculs débutent après 2005 ; il est en effet hasardeux de mettre en œuvre une corrélation linéaire sur moins de quatre couples de points. L'analyse de sensibilité montre que :

- l'écart-type α est le paramètre qui varie le plus. Ce dernier diminue avec le nombre de jaugeages N et la réduction est rapide au cours des six premières années ;
- les estimations sont stabilisées à partir de 2010, lorsqu'au moins 20 jaugeages ont été réalisés.

Année	D (an)	N	F	r	QMNA5 _{ref} (m ³ /s)	μ (l/s/km ²)	α (l/s/km ²)	QMNA5 _{cib} (m ³ /s)	IC95% (m ³ /s)
2005	2	5	2.5	0.927	0.451	0.28	1.07	0.75	0 2.06
2006	3	7	2.333	0.891	0.452	0.31	1.00	0.13	0 1.35
2007	4	11	2.75	0.879	0.436	0.32	0.90	0.05	0 1.15
2008	5	14	2.8	0.928	0.440	0.28	0.80	0.08	0 1.06
2009	6	17	2.833	0.921	0.444	0.28	0.76	0.10	0 1.02
2010	7	20	2.857	0.938	0.449	0.27	0.70	0.12	0 0.98
2011	8	24	3.	0.922	0.440	0.28	0.68	0.12	0 0.95

Tableau 6. Détail des résultats d'estimation obtenus sur la plus longue période disponible pour les stations candidates - Source des données : HYDRO, Agence de l'eau Seine Normandie, Dreal Haute-Normandie.

D : durée de suivi

N : nombre de jaugeages

F : fréquence annuelle de jaugeages

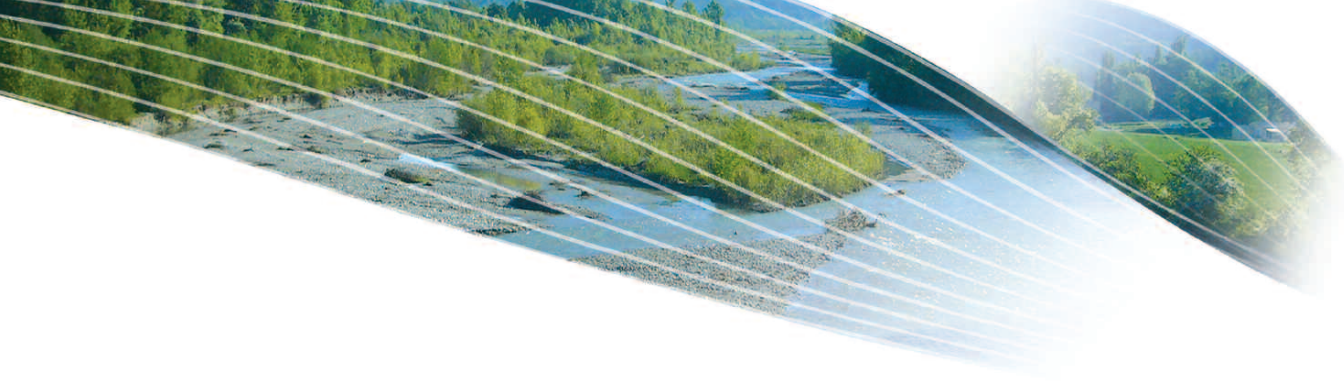
r : coefficient de corrélation entre les couples des logarithmes des débits jaugés $q_{cib}(t)$ et débits journaliers à la même date à la station de référence

μ : biais d'estimation

α : écart-type des erreurs d'estimation

IC95% : intervalle de confiance à 95%.

Le $QMNA5$ calculé sur huit ans à la Clue de Chabrières serait connu à +/- 0,150 m³/s (intervalle de confiance à 95 % déduit de l'ajustement à la loi log-normale). Même si cet intervalle de confiance n'est pas tout à fait comparable à l'IC95% du $QMNA5$ estimé à la Julienne, les ordres de grandeur des IC sont bien différents et ceci démontre, s'il le fallait, qu'une série de jaugeages ne pourra pas produire des débits caractéristiques d'étiage avec une précision équivalente à celle obtenue avec une chronique de mesures en continu. Même si les campagnes se poursuivaient avec une fréquence moyenne de trois jaugeages par an, en conservant les mêmes valeurs de corrélation r de $QMNA5$ au site de référence, le seul terme à modifier dans le calcul de σ est le premier $a_{(F)} \ln(N)$ et la borne supérieure de l'IC95% serait diminuée de 0,06 l/s chaque année supplémentaire, l'estimation corrigée du biais n'évoluant pas.



Discussion

Les valeurs estimées s'avèrent relativement stables mais particulièrement faibles et nettement inférieures à la valeur observée en amont à Chabrières. Elles sont cohérentes avec le fonctionnement aval du bassin versant soumis à des échanges nappes-rivières actifs et à des prélèvements d'origine agricole.

Malgré un niveau de corrélation élevé et malgré un nombre conséquent de jaugeages, l'intervalle de confiance à 95 % est large.

Le résultat obtenu ici à l'aide des jaugeages reste néanmoins plus fiable et plus réaliste qu'une estimation sommaire sur la base de rapport des surfaces ($QMNA5_{ref}(S_{cib}/S_{ref}) = 0,732$ m³/s) et que l'estimation obtenue au moyen d'un modèle régressif régional établi entre le *QMNA5* exprimé en débit spécifique (en l/s/km²) et un ensemble de variables explicatives (c'est-à-dire descripteurs du bassin se rapportant au climat, à la géologie ou à l'occupation des sols). Ces deux modes d'estimation ne peuvent représenter des effets locaux comme ici des échanges nappes-rivières particulièrement actifs.

Le choix a été fait d'exploiter les modèles malgré les prélèvements sur le cours d'eau. Ce choix a été guidé par l'absence d'information sur le poids relatif des interactions nappes-rivières et des actions humaines sur la variabilité spatiale des débits d'étiage.

Conclusion

La méthode présentée dans ce guide est destinée à valoriser des données de jaugeages volants pour l'estimation du débit caractéristique d'étiage $QMNA5$ en site peu jaugé. Cette estimation s'appuie sur une relation établie entre débits jaugés au point d'intérêt (« site cible ») et débits observés à la même date au droit d'une station hydrométrique voisine (« site de référence ») corrigés par un biais.

L'hypothèse a été faite que cette relation constitue une bonne approximation de la relation entre la valeur de $QMNA5$ recherchée au site cible et celle connue au site d'appui.

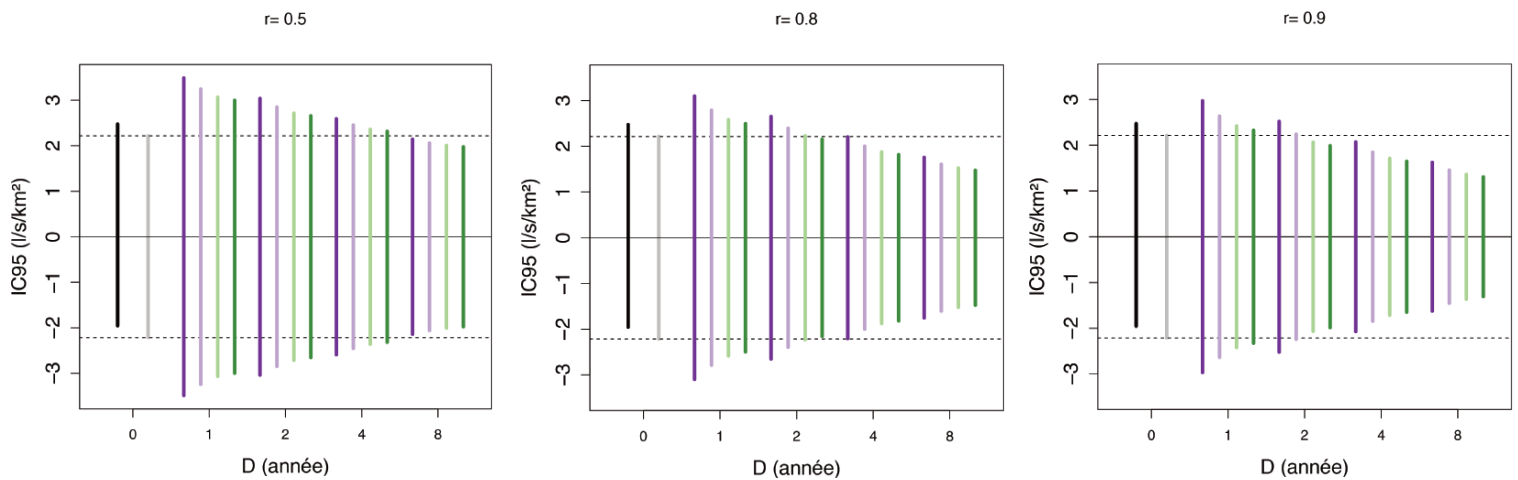
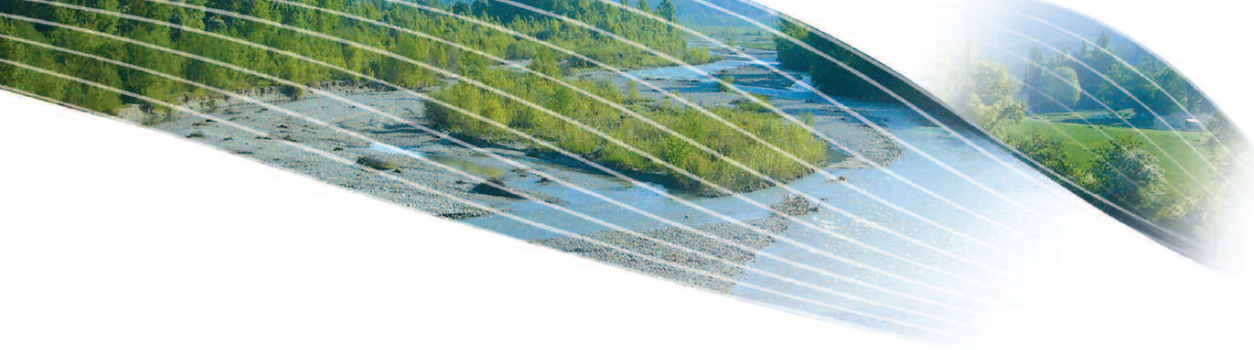


Figure 14. Intervalles de confiance IC95% associés à la carte nationale de consensus, en absence de données de jaugeages ($D = 0$ en noir sans correction du biais et en gris avec correction du biais) et à la méthode exploitant les jaugeages épisodiques (en couleur, violet foncé $F=1$; violet clair $F=2$; vert clair $F=3$; vert foncé $F=4$) selon les différents paramètres le coefficient de corrélation r , la fréquence annuelle de jaugeages F et la durée de suivi D .

Les estimations sont assorties d'un intervalle de confiance dont les bornes sont fonctions :

- de la stratégie de jaugeages adoptée au site cible (nombre de jaugeages réalisés, fréquence annuelle de jaugeage, nombre d'années de suivi) ;
- du choix d'un site référence voisin (réalisé sur la base de la corrélation entre les logarithmes des débits jaugés et ceux observés à la même date).

La confrontation des résultats obtenus avec ceux issus d'une méthode d'estimation en sites non jaugés appliquée à l'échelle nationale montre l'intérêt de la valorisation des données de jaugeages volants, notamment vis-à-vis de la fiabilité des valeurs estimées.



La comparaison est effectuée en termes d'intervalle de confiance à 95 % en $l/s/km^2$ pour différentes combinaisons de r , N et D (paramètres du Tableau 1, page 14). En Figure 14, deux estimations pour l'IC95% associé à la carte de consensus sont proposées : la première sans considérer le biais ; la seconde en corrigeant le biais (l'IC95% est ainsi centré en zéro comme pour la méthode exploitant les jaugeages). L'intérêt à exploiter les jaugeages volants est manifeste lorsque la durée D est supérieure à quatre ans pour les deux corrélations les plus fortes. Sans surprise, il est moindre quand la corrélation est très modeste ($r = 0,5$).

La méthode s'appuyant sur les données de jaugeages constitue une alternative moins coûteuse à l'implantation d'une station pérenne sur les bassins à enjeu ou sur les sites difficiles à instrumenter (par ex. lits en tresse, sections instables...). Cette méthode ne peut s'appliquer en l'absence totale de réseau de mesure, car elle repose sur l'identification d'un site de référence géographiquement voisin présentant une dynamique en étiage similaire à celle du site cible. Son efficacité dépend de la corrélation entre le site cible et le site de référence, de la fréquence des jaugeages et du nombre d'années d'observation.

Dans une perspective de mise en place ou de poursuite de campagnes de jaugeage, notons que le gain de performance apporté par l'augmentation du nombre de jaugeages est significatif jusqu'à 20 mesures environ, puis ce gain s'atténue assez rapidement au-delà. Parallèlement, il apparaît que la réalisation de nombreux jaugeages au cours d'une même saison d'étiage n'est pas gage de meilleure estimation en raison de la dépendance intra-annuelle des débits en basses eaux. La réalisation de trois jaugeages chaque année ($F = 3$) semble constituer le meilleur compromis, en visant si possible des phases de tarissement distinctes.

Deux exemples contrastés illustrent la méthode : le premier concerne un site d'intérêt sur la Scie, cours d'eau pluvial océanique forment régulé par les apports souterrains et le second un site de jaugeage de l'Asse, cours d'eau pluvio-nival réactif. Ces deux cas d'étude permettent d'illustrer le protocole d'estimation du *QMNA5* et de l'incertitude associée. Il faut souligner que la méthode n'est pas « fermée ». Sa performance fait appel à l'expertise, notamment lors de la constitution de l'échantillon des données de jaugeages (sélection des jaugeages pertinents) et lors du choix de la station de référence. Ce guide propose des pistes pour orienter les choix.

L'application des modèles régionaux d'incertitude dépend fortement de la confiance dans l'attribution du régime au site à une des douze classes référencées en France. En cas de doute, il est vivement recommandé d'engager des tests de sensibilité (en confrontant les résultats de calculs obtenus à partir de plusieurs stations de référence, comme ce qui a été présenté sur le cas d'étude de la Scie).

Des travaux complémentaires restent à engager. Il s'agit d'améliorer les modèles décrivant les incertitudes, en enrichissant notamment le jeu de données peut-être avec des stations d'autres pays. La méthode est applicable à d'autres variables d'étiage (débit minimum sur d jours consécutifs *VCNd* de période de retour T) ; cependant des modèles d'incertitude doivent être créés spécifiquement. Des tests ont été opérés sur le module mais cette variable montre plus de facilité à l'interpolation et de ce fait l'exploitation de jaugeages présente moins d'intérêt.



Bibliographie

Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2011. Études d'estimation des volumes prélevables globaux, sous bassin versant de l'Asse. Rapport final phases 1 et 2, octobre 2011, 78 pages

Anonyme, 2015. Guide technique relatif aux modalités de prise en compte des objectifs de la DCE en police de l'eau, http://www.ineris.fr/aida/consultation_document/23088

Arts I., Sary M., 2000. Cartographie des débits d'étiage : application au bassin de la Meurthe, *Revue Géographique de l'Est* [en ligne]. 40(1-2), mis en ligne le 05 août 2013, consulté le 15 septembre 2016. URL : <http://rge.revues.org/4175>

Catalogne C., 2012. Amélioration des méthodes de prédétermination des débits de référence d'étiage en sites peu ou pas jaugés. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 285 pages

Catalogne C., Sauquet E., Lang M., 2014. Valorisation des données de jaugeages épisodiques pour l'estimation du débit de référence d'étiage *QMNA5*. *La Houille Blanche*, 4, 78-87, doi: 10.1051/lhb/2014042

Fernandez A., 2012. Étude de la pratique des jaugeages volants pour l'estimation de débits de référence d'étiage. Mémoire de stage 1ère année, Master Eau, Spécialité « Eau Ressource », Université de Montpellier 2, 42 pages.

MEDD 2003. Mise en œuvre de la DCE : Identification des pressions et des impacts. Guide méthodologique version 4.1. Aquascop, 147 pages

Oberlin G., Galéa G.C., Toni J.T., 1973. Intérêt des jaugeages épisodiques pour l'estimation des étiages de petits bassins non équipés. *Cahiers de l'ORSTOM, sér. Hydrol.* X(4) : 349-368

Onema, 2011. Guide « pressions-impacts » pour la mise à jour des états des lieux DCE Partie II Dispositifs de caractérisation des pressions et impacts sur les eaux de surface. Onema - Collection Guide et protocole, 86 pages.

Plasse J., Drogue G., François D., Battaglia P., Conan C., 2014. Apport des jaugeages ponctuels à la reconstitution des chroniques de débits par simulation pluie-débit : l'exemple du bassin Rhin-Meuse. *La Houille Blanche*, 1, 45-52, doi: <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/2014007>

Riffard M., Andréassian V., Nicolle P, Peschard J., 2012. Combinaison multi-modèle et cartographie de consensus du débit de référence d'étiage et du débit moyen à l'échelle de la France. Rapport d'étude Cemagref-Onema, 36 pages

Sauquet E., Catalogne C., 2011. Guide méthodologique en vue de l'estimation du module d'un cours d'eau Interpolation des modules : quelles évolutions depuis la note technique de 1987 ? Annexe 3 à la circulaire relative à l'application de l'article L.214-18 du code de l'environnement, 29 pages

Sauquet E., Gottschalk L., Krasovskaia I., 2008. *Estimating mean monthly runoff at ungauged locations: an application to France. Hydrology Research*, 39(5-6): 403-423



Citation : Sauquet E., Catalogne C., Plasse J., Lang M., 2016.
Guide pour l'exploitation des jaugeages en hydrologie. Application
à la prédétermination des débits caractéristiques d'étiage
Onema, collection Guides et protocoles, 34 pages.

Contact : eric.sauquet@irstea.fr

ISBN : 979-10-91047-55-5

Édition : Véronique Barre (veronique.barre@onema.fr)

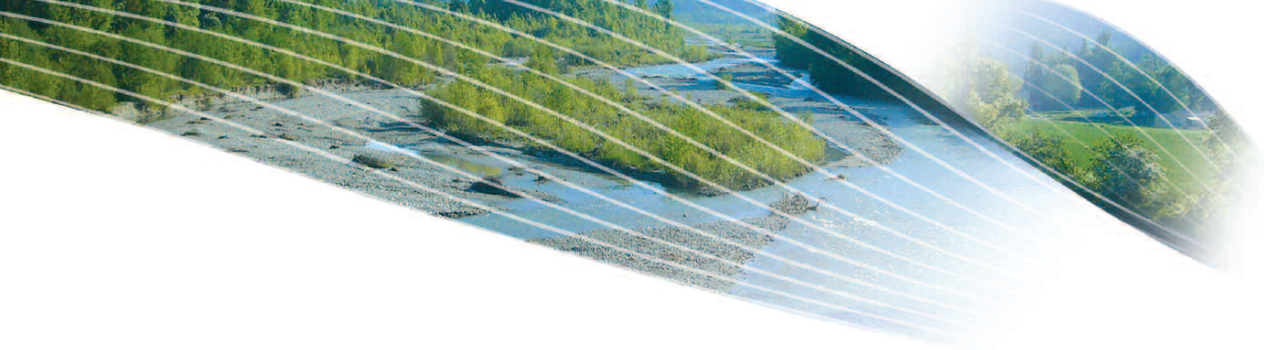
Création et mises en forme graphiques : Béatrice Saurel - Emman

Impression : IME by Estimprim

Cet ouvrage a été réalisé avec des encres végétales
et imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement.

Ce guide est téléchargeable sur le site de l'Onema :
www.onema.fr/guides-et-protocoles

Septembre 2016



Ce guide technique a pour objectif principal de présenter une méthode développée pour estimer le débit mensuel minimum de période de retour cinq ans d'un cours d'eau (*QMNA5*), un des débits caractéristiques d'étiage, à partir de campagnes de jaugeages (mesures du débit d'un cours d'eau) épisodiques réalisés au point d'intérêt.

Il contient, outre la procédure d'estimation, des compléments permettant de quantifier l'incertitude associée à l'estimation obtenue et de mesurer l'intérêt à poursuivre l'acquisition de jaugeages pour affiner ultérieurement l'estimation. Un ensemble de recommandations pratiques est proposé au travers de deux exemples concrets.

Ce guide s'adresse en priorité aux gestionnaires de bassin versant et aux services en charge de l'hydrométrie qui possèdent déjà des données de jaugeages en certains points de leur réseau hydrographique et souhaitent les exploiter pour mieux estimer les débits d'étiage. Ce guide peut également être utilisé pour dimensionner les campagnes de jaugeages à prévoir sur des points encore non jaugés.