



HAL
open science

Amélioration des méthodes de prédétermination des débits de référence d'étiage en sites peu ou pas jaugés

Clotaire Catalogne

► **To cite this version:**

Clotaire Catalogne. Amélioration des méthodes de prédétermination des débits de référence d'étiage en sites peu ou pas jaugés. Hydrologie. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GRENU030 . tel-01547922

HAL Id: tel-01547922

<https://theses.hal.science/tel-01547922>

Submitted on 27 Jun 2017

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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Océan, Atmosphère, Hydrologie**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Clotaire CATALOGNE

Thèse dirigée par **Michel Lang**

Et encadrée par **Eric Sauquet**

Préparée au sein de l'**Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique de l'Institut National en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (Irstea, centre de Lyon)**

Dans le cadre de **L'école doctorale Terre, Univers et Environnement**

Amélioration des méthodes de prédétermination des débits de référence d'étiage en sites peu ou pas jaugés

Thèse soutenue publiquement le **11 décembre 2012**
devant le jury composé de :

Anne-Catherine FAVRE-PUGIN

Professeur au LTHE (Grenoble) – Présidente du Jury

Pierre RIBSTEIN

Professeur à l'UPMC (Paris) – Rapporteur

Emmanuel GILLE

Maître de conférence, Directeur du CEGUM (Metz) – Rapporteur

Christel PRUDHOMME

Senior Scientist au CEH (Wallingford, UK) – Examinatrice

Martin GERBAUX

Docteur, Ingénieur / Chef de projet à Artelia (Echirolles) – Examineur



Résumé

Cette thèse a pour objectif d'apporter une contribution scientifique et technique à la problématique opérationnelle visant l'évaluation de la ressource en eau disponible en période d'étiage. Cet état des lieux constitue en effet un pré-requis indispensable à toute action de gestion destinée à concilier et équilibrer les différents usages à l'échelle du bassin versant. Il est alors essentiel de tenir compte des particularités du milieu en question pour adapter les différents dispositifs de gestion au contexte hydro-climatique local. A cet égard, l'indicateur statistique retenu par la réglementation française pour caractériser l'état de la ressource en période de basses eaux correspond au débit moyen mensuel minimum annuel de fréquence quinquennale sèche (noté QMNA5). Ce dernier constitue donc notre principal objet d'étude. Dans l'idéal, la détermination d'un tel débit de référence requiert néanmoins un suivi des débits en continu sur une période suffisamment longue pour constituer une archive statistiquement exploitable et n'est par conséquent possible qu'au droit d'un nombre limité de stations hydrométriques. Ailleurs il est alors nécessaire de faire appel à des techniques d'estimation que l'on souhaite aussi fiables que possible.

Cette problématique offre encore à l'heure actuelle de nombreuses perspectives de recherche auxquelles cette thèse, en s'inscrivant dans la continuité de travaux analogues réalisés ces dernières années aussi bien en France qu'à l'étranger (décennie PUB), tente d'apporter quelques éléments de réponse et de réflexion. Au cours de ces travaux nous nous sommes ainsi donnés pour objectif d'élaborer et d'optimiser, sur la base des techniques existantes, un cadre méthodologique cohérent adapté à l'estimation du QMNA5 et passant notamment par la valorisation de l'ensemble de l'information à caractère hydrologique disponible localement le long du réseau hydrographique, que ce soit sous la forme de jaugeages épisodiques ou de chroniques courtes. Cet effort d'exhaustivité et de synthèse, s'il n'est pas tout à fait novateur, reste assez peu courant et constitue probablement l'un des principaux points forts de ce travail. Parallèlement et quelle que soit l'approche d'estimation envisagée, nous nous sommes constamment attachés à fournir une indication sur la fiabilité de chaque valeur estimée au travers d'un intervalle de confiance. Bien qu'apparaissant comme un critère essentiel pour apprécier la validité des résultats obtenus, la détermination d'une incertitude encadrant les valeurs estimées s'avère le plus souvent négligée dans la littérature scientifique relative à la régionalisation de variables hydrologiques ; cette démarche apparaît ainsi comme le second point fort de ces travaux. Pour répondre à ces objectifs, les modalités optimales d'estimation du QMNA5 ont été identifiées au travers d'une procédure systématique de validation croisée et finalement appliquées pour notamment aboutir à une cartographie nationale du QMNA5 spécifique en tout point du réseau hydrographique.

A l'issue de cette application, l'un des résultats présentant sans doute le plus d'intérêt passe par la comparaison des performances d'estimation selon la quantité d'information disponible au site cible. Celle-ci montre bien que la valorisation d'une information hydrologique locale, même très fragmentaire, est susceptible d'accroître de manière significative la fiabilité des estimations obtenues par rapport à une estimation en sites non jaugés. Bien entendu le gain de performance est d'autant plus intéressant que la quantité de données disponible est importante. Ainsi l'exploitation de chroniques courtes apparaît logiquement comme plus avantageuse que la valorisation de données de jaugeages. Néanmoins, les bénéfices offerts par ces dernières, tant en termes de coût que vis-à-vis des possibilités de suivi de sites difficiles à équiper d'une station hydrométrique permanente, en font une source d'information particulièrement précieuse qu'il sera souhaitable de voir se généraliser à l'avenir.

Abstract

Estimating water availability along the river network is a pre-requirement for water management purposes before defining water allocation at catchment scale. In France, rules for water allocation is partly based on QMNA5, the annual minimum monthly flow with a return period of 5 years ; QMNA5 is derived from time series with extended records of natural or naturalized discharges at gauged sites. In most cases, such data is not available. Three contexts can be identified: (i) gauged site with short records, (ii) site with spot gauging data and (iii) ungauged location.

This thesis aims at developing a general framework for estimating QMNA5 by using all the hydrological data available in the neighbouring of the location of interest (including short discharge records and spot gauging data). Different methods and strategies were adapted to data availability and tested on a large dataset. Their efficiency and sensitivity to the data collection strategy, the definition of neighbouring,... were assessed by cross validation and uncertainties were provided through a confidence interval. Lastly the most efficient methods for deriving QMNA5 are used to draw a national map with estimates along the main river network.

In conclusion, a comparison of the efficiency of the estimates according to the quantity of information available on the target location is made. Results show that a significant gain in accuracy in the estimated QMNA5 values, even when using only a few sporadic measurements to supplement regional information. The improvement depends on the amount of available data and the use of short time series is more advantageous than the valuation of spot gauging data. Nevertheless, spot gauging data may offer obvious advantages in terms of monitoring at locations where both artificial and natural channel stability is not warranted. Therefore using spot gauging data can be seen as a possible cost-effective trade-off to supply a reliable enough estimation for particular locations of interest.

Remerciements

« AGATHOS – *Ab ! Ce n'est pas dans la science qu'est le bonheur, mais dans l'acquisition de la science* »

E.A Poe - Puissance de la parole *in* Nouvelles histoires extraordinaires.

Je tiens évidemment à adresser mes plus vifs remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail et sans qui rien n'aurait pu se concrétiser. Ainsi, je souhaite en premier lieu exprimer toute ma gratitude envers mes deux encadrants, Michel et Eric, qui m'ont épaulé, guidé et conseillé de manière judicieuse tout au long de cette thèse en me laissant néanmoins une grande latitude de décision et en m'accordant leur confiance à cet égard. Je souhaite également remercier sincèrement les membres du jury qui ont consenti à examiner ces travaux : Anne-Catherine Favre-Pugin, Pierre Ribstein, Emmanuel Gille, Christel Pruhomme et Martin Gerbaux.

Quelques remerciements particuliers : à Etienne tout d'abord pour avoir conçu un logiciel aussi formidable qu'ésotérique et que j'ai par conséquent sollicité à de nombreuses reprises ; à Benjamin pour avoir toujours su répondre à mes incertitudes et autres états d'âme en matière de stats, même avachi dans son fauteuil de ministre un lundi matin, le nez au raz du clavier ; à Jean-Phi (R addict s'il en est) pour m'avoir, parmi bien d'autres subtilités, invité à franchir les portes du zoo() et enfin à LYP1114 qui m'a accompagné sans broncher tout au long de ces trois années.

Je tiens aussi à remercier Nathalie F. pour ses précieuses contributions et Vazken A. pour cette collaboration, pas toujours complètement consensuelle mais faite d'échanges et de débats enrichissants et instructifs. Merci également à Taha O., Jean-Pierre L. et Mathieu R. pour m'avoir consacré un peu de leur temps et tenté (en vain) de m'initier au dogme bayésien. J'en profite également pour remercier une fois encore Taha pour son accueil très chaleureux à l'INRS qui restera comme l'un des bons souvenirs de mon début de thèse.

Un grand merci enfin à tout les membres de l'équipe Hydrologie-Hydraulique et plus largement à l'ensemble du personnel du Cemagref pour m'avoir accueilli durant de ces trois années (et même un peu plus) en me permettant de mener à bien mes travaux dans les meilleures conditions possibles.

Je n'oublie pas d'adresser un clin d'œil à mes collègues, Brûleurs de Loups et Savoisiens de souche ou d'adoption, qui n'ont sans doute jamais cru que j'en arriverais là... mouarf.

Table des matières

INTRODUCTION	13
Basses eaux, étiages et sécheresses hydrologique : un peu de terminologie.....	15
Vers une gestion raisonnée de la ressource en eau : cadre réglementaire et définition des débits de référence.....	16
Vers l'élaboration d'outils d'aide à la décision : une cartographie nationale du QMNA5	19
Contexte scientifique, objectifs de la thèse et orientation générale des travaux	20
Plan du manuscrit.	22
Références bibliographiques.....	24
PREMIERE PARTIE – DONNEES EMPLOYEES ET ETUDE DES REGIMES D'ETIAGE EN FRANCE	27
Chapitre I. Recueil et critique des données	29
I.1 Données à caractère hydrologique.....	29
I.1.1 Période de référence et durée des chroniques.....	31
I.1.2 Qualité des données et caractère influencé de l'écoulement.....	35
I.1.3 Représentativité des stations sélectionnées.....	39
I.1.4 Cas particulier des données de jaugeages volants	43
I.2 Données descriptives des bassins.....	45
I.2.1 Processus hydro-climatiques à l'origine du phénomène d'étiage	45
I.2.2 Variables retenues, source des données et modalité d'extraction.....	47
I.3 Conclusion du chapitre	53
Références bibliographiques.....	54
Chapitre II. Analyse des régimes d'étiage en France sur la période 1970-2005	57
II.1 Outils pour la description des régimes d'étiage : inventaire des indices d'étiage et modalités d'extraction	58
II.1.1 Indices relatifs au module interannuel.....	58
II.1.2 Indices de débits minimums annuels.....	59
II.1.3 Indices extraits de la courbe des débits classés	64
II.1.4 Indices de durées et déficits	67
II.1.5 Indices de débit de base.....	73
II.1.6 Indices de récession.....	76
II.1.7 Indices de saisonnalité.....	80
II.2 Aperçu général des régimes d'étiage en France sur la période 1970-2005.....	82
II.2.1 Définition d'un espace hydrologique parcimonieux par analyse en composante principale	84
II.2.2 Classification des régimes d'étiage	85
II.3 Conclusion du chapitre	88
Références bibliographiques.....	89

DEUXIEME PARTIE – ESTIMATION DU QMNA5 EN SITES PEU JAUGES 95

Chapitre III. Estimation du QMNA5 par valorisation de chroniques courtes	97
III.1 Eléments de méthodologie.....	98
III.1.1 <i>Etat de l'art des méthodes d'estimation</i>	98
III.1.2 <i>Application à l'estimation du QMNA5</i>	100
III.1.3 <i>Sélection des sites de référence</i>	103
III.2 Résultats de la validation croisée.....	108
III.2.1 <i>Influence du mode de sélection des sites de référence</i>	108
III.2.2 <i>Influence de la méthode de réajustement</i>	111
III.2.3 <i>Influence de la longueur des chroniques</i>	114
III.3 Application à l'échantillon de chroniques courtes.....	115
III.4 Conclusion du chapitre.....	118
Références bibliographiques.....	120

Chapitre IV. Estimation du QMNA5 par valorisation de données de jaugeages volants 123

IV.1 Eléments de méthodologie.....	124
IV.1.1 <i>Etat de l'art des méthodes d'estimation</i>	124
IV.1.2 <i>Stratégies de jaugeage simulées</i>	126
IV.1.3 <i>Sélection d'un site de référence</i>	128
IV.1.4 <i>Quantification des incertitudes</i>	129
IV.2 Résultats de la validation croisée et modélisation de l'incertitude.....	131
IV.2.1 <i>Analyse et modélisation de l'écart type des erreurs d'estimation</i>	131
IV.2.2 <i>Analyse et modélisation du biais d'estimation</i>	139
IV.3 Comparaison avec les performances d'estimation du QMNA5 à partir de chroniques courtes.....	141
IV.4 Conclusion du chapitre.....	142
Références bibliographique.....	144

TROISIEME PARTIE – ESTIMATION DU QMNA5 EN SITES NON JAUGES 145

Chapitre V. Première estimation en sites non jaugés 147

V.1 Eléments de méthodologie.....	148
V.1.1 <i>Etat de l'art des méthodes d'estimation</i>	148
V.1.2 <i>Aperçu des méthodes de définition de voisinages</i>	156
V.1.3 <i>Application à l'estimation du QMNA5</i>	160
V.2 Résultats de la validation croisée.....	169
V.2.1 <i>Démonstration de l'intérêt de la définition de voisinages dans le cas de voisinages idéalement connus</i>	170
V.2.2 <i>Comparaison des méthodes de définition de voisinage en sites non jaugés</i>	173
V.2.3 <i>Comparaison avec les performances d'estimation en sites peu jaugés</i>	176
V.2.4 <i>Comparaison avec une approche par régionalisation des paramètres d'un modèle hydrologique</i>	178
V.2.5 <i>Discussion autour de l'application des techniques de krigeage pour l'estimation du QMNA5</i>	181
V.3 Première cartographie du QMNA5 spécifique en sites non jaugés.....	183
V.4 Conclusion du Chapitre.....	187
Références bibliographiques.....	190

Chapitre VI. Estimation en sites non jaugés consolidée	195
VI.1 Eléments de méthodologie.....	195
VI.1.1 <i>Etat de l'art des méthodes permettant l'introduction de données incertaines dans les procédures d'estimation en sites non jaugés ..</i>	<i>195</i>
VI.1.2 <i>Application à l'estimation du QMNA5 ..</i>	<i>196</i>
VI.2 Résultats de la validation croisée.....	201
VI.2.1 <i>Résultats de la consolidation sans renouvellement des modèles régressifs régionaux.....</i>	<i>201</i>
VI.2.2 <i>Résultats de la consolidation avec renouvellement des modèles régressifs régionaux.....</i>	<i>203</i>
VI.3 Cartographie finale du QMNA5 spécifique en sites non jaugés.....	205
VI.4 Conclusion du chapitre.....	208
Références bibliographiques.....	210

CONCLUSION GENERALE	211
----------------------------	------------

Une contribution scientifique en réponse à une problématique opérationnelle.....	211
Synthèse des méthodes mises en œuvre et principaux résultats.....	212
Perspectives.....	218
Références bibliographiques.....	221

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	223
------------------------------------	------------

ANNEXES	237
----------------	------------

Annexe I - Glossaire des sigles et abréviations.....	239
Annexe II - Liste des stations de l'échantillon de référence.....	241
Annexe III - Liste des stations de l'échantillon de chroniques courtes.....	255
Annexe IV - Ré-interprétation des catégories d'occupation des sols de la nomenclature Corine Land Cover.....	280
Annexe V - Synthèse des caractéristiques des Hydro-Eco-Region telles que décrites par Wasson <i>et al.</i> (2001).....	282

INTRODUCTION

Parmi les risques liés au cycle de l'eau, le phénomène de sécheresse constitue probablement l'un des aléas dont les conséquences sur le plan humain, économique et environnemental s'avèrent les plus critiques. Celles-ci sont en effet susceptibles d'affecter de larges territoires sur une période prolongée et ainsi de toucher une population nombreuse. Malgré la mise en place d'aménagements permettant de se prémunir du risque lié au manque d'eau (réservoirs, aqueducs, canaux, dérivations...), l'aléa persiste et peut encore à l'heure actuelle engendrer des crises majeures, en particulier dans les pays dépourvus d'infrastructures appropriées.

A cet égard l'année 2011 constitue un exemple édifiant. Au cours cette seule année, l'ONU alerte la communauté internationale sur la situation critique de la Somalie, de l'Ethiopie et du Kenya où un épisode de sécheresse inégalé depuis 60 ans est à l'origine d'une crise alimentaire majeure avec jusqu'à 12 millions de personnes touchées par la famine. La Chine connaît également un épisode particulièrement prononcé dans le bassin du Yangtze avec 35 millions de personnes affectées et des pertes économiques estimées à 2.3 milliards de dollars. Aux Etats-Unis la « National Oceanic and Atmospheric Administration » considère, à l'issue du mois d'août, que 26 % du territoire américain se trouve en état de sécheresse sévère à extrême et 31% en état de sécheresse modéré à sévère.

Dès le printemps, l'Europe se trouve également confrontée à un épisode de sécheresse de grande ampleur en raison d'un déficit pluviométrique particulièrement prononcé et durable. Le Royaume-Uni connaît par exemple des conditions extrêmement sèches en mars et avril, notamment dans les régions du sud-est, avec le mois de mars le plus sec observé depuis 1953. Dans les autres régions d'Europe, la sécheresse perdure depuis le mois de février jusqu'au mois d'avril. En Suisse, l'année 2011 est jusqu'à aujourd'hui l'une des 10 années les plus sèches depuis 1864. Le mois d'avril 2011 est le 10^{ème} mois d'avril le plus sec observé en Allemagne depuis 1881. Les niveaux des rivières sont très bas, notamment sur le

Rhin où la navigation est affectée selon l'Agence fédérale d'hydrologie allemande. A l'Est de l'Europe, l'Ukraine, l'un des plus grand producteur de céréales de la région, voit sa production de blé tomber à 13 millions de tonnes, contre 24 millions l'année précédente, avec pour conséquence une envolée des prix à l'échelle mondiale.

La France n'est pas épargnée par le phénomène avec, là aussi, des conséquences de nature essentiellement agricole. Des arrêtés préfectoraux limitant l'usage de l'eau sont mis en place dans un nombre croissant de départements : 8 départements sont touchés par ces restrictions au 22 avril 2011, puis 33 au 17 mai, 42 le 21 mai (Figure 1), 54 le 27 mai, 60 le 3 juin, pour atteindre 72 départements au 15 juillet. Les restrictions s'appliquent alors à l'ensemble de la société : aux particuliers (interdictions de remplissage des piscines privées ou de lavage des véhicules en dehors d'une station de lavage), aux agriculteurs (interdiction de l'irrigation des cultures en journée), aux collectivités (interdiction de l'arrosage des espaces verts et des stades en journée) et aux industries.

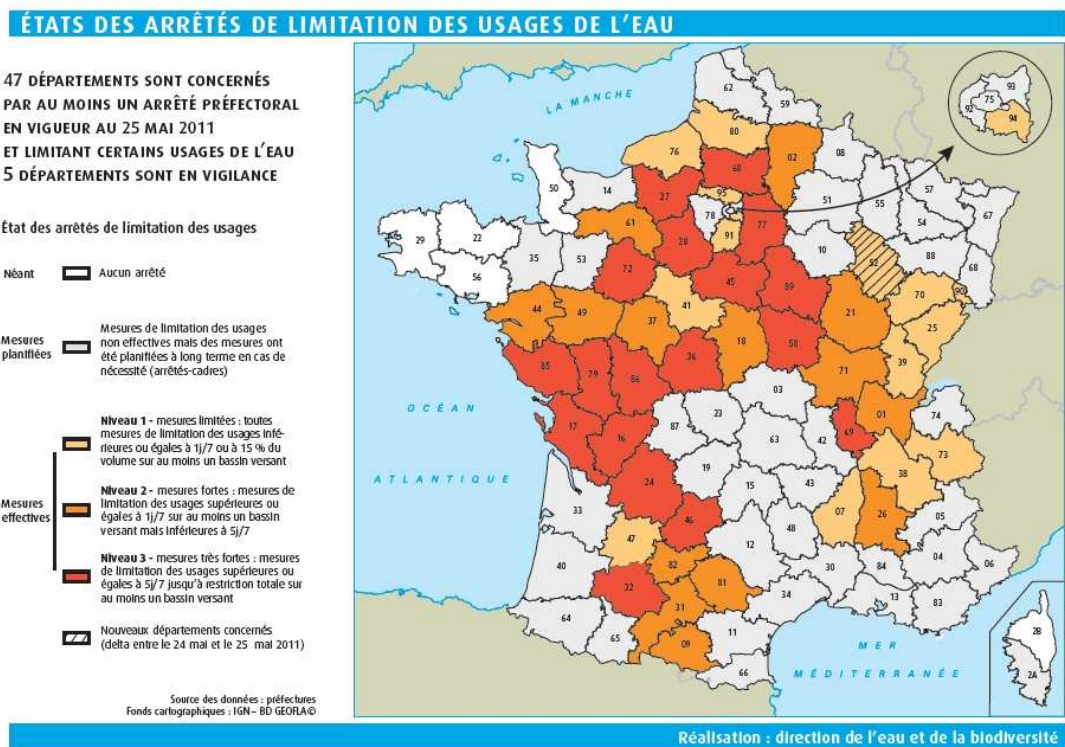


Figure 1 : Carte des départements concernés par des arrêtés de limitation de l'usage de l'eau au 25 mai 2011

Dans ce contexte, qui sera susceptible de se trouver aggravé dans un proche avenir par les effets conjugués du changement climatique et d'une forte croissance démographique à l'échelle mondiale, les problématiques de manque d'eau constituent une préoccupation majeure dans de nombreux pays. Cette préoccupation s'est notamment exprimée ces dernières années au travers d'une vaste réflexion sur le plan international pour faire le bilan des connaissances scientifiques aujourd'hui disponibles (WMO (2008)).

Basses eaux, étiages et sécheresses hydrologique : un peu de terminologie

Au cours d'épisodes tels que celui de l'année 2011, les ressources en eaux continentales en général et les ressources en eau de surface en particulier (cours d'eau, lacs) se trouvent particulièrement affectées. Il est alors fréquent de parler d'étiage. Cependant ce terme et les différentes définitions qui s'y rapportent restent relativement vagues (il n'existe d'ailleurs pas d'équivalent dans le vocabulaire anglo-saxon où les termes « low flow » ou « hydrological drought » sont employés) et nous nous proposons par conséquent d'en préciser ici la signification.

Le Glossaire International d'Hydrologie¹, s'inspirant du sens donné au plus bas niveau atteint par la marée descendante en contexte maritime, définit par exemple l'étiage de manière très laconique comme le *"plus bas niveau atteint par un cours d'eau ou un lac"*. Le Dictionnaire français d'hydrologie de surface (Roche (1986)) apporte lui une précision en remplaçant le phénomène d'étiage dans une perspective temporelle : *"niveau annuel le plus bas atteint par un cours d'eau en un point donné"*. Si l'on voit émerger ici une première référence à la saisonnalité du phénomène, cette définition ne permet pas encore de distinguer clairement la différence entre les notions de basses eaux et d'étiage ; il en résulte parfois une confusion entre ces deux termes comme le souligne Dacharry (1996) en considérant l'étiage comme un *"débit exceptionnellement faible d'un cours d'eau, qu'il ne faut pas confondre avec les basses eaux saisonnières, même s'il en est l'exacerbation"*. Ainsi dans le premier cas il s'agit d'un phénomène saisonnier faisant partie intégrante du cycle annuel de variabilité du débit, lui même lié aux caractéristiques intrinsèques du climat régional. De manière relativement simpliste, la gamme des débits étudiée comprend alors l'ensemble des débits inférieurs au débit moyen interannuel ou, de manière plus rigoureuse, inférieurs au débit médian (Smakhtin (2001)). L'étiage correspond en revanche à un phénomène naturel que l'on pourra qualifier d'extrême et résulte généralement d'un déficit pluviométrique prolongé pouvant affecter un espace géographique relativement étendu (sécheresse au sens météorologique). Il s'agit par conséquent d'une anomalie par rapport à une situation dite « normale » et, en ce qui nous concerne, une période de basses eaux particulièrement longue et sévère (que l'on pourra donc assimiler à la notion de sécheresse hydrologique). Le phénomène d'étiage apparaît ainsi comme relatif à un « seuil » qui ne peut être considéré comme absolu mais susceptible de varier selon le contexte géographique ou historique et se réfère avant tout à la disponibilité en eau pour satisfaire les différents usages mais aussi, si l'on s'affranchit d'une vision souvent trop anthropocentrique, aux conséquences pour le milieu aquatique lui-même. De là, la description du phénomène d'étiage doit bien entendu refléter son caractère extrême mais aussi les processus mis en jeu. Ainsi, s'il est fréquemment fait référence à la notion de sévérité (ou de magnitude), qui décrit le débit minimum atteint au cours d'un épisode d'étiage, il peut également être fait référence aux aspects relatifs à la durée de l'épisode, au déficit, qui exprime le volume manquant vis-à-vis d'un besoin donné, à la fréquence d'occurrence, qui décrit la probabilité qu'un événement d'intensité donnée se produise, à la saisonnalité, qui permet de définir la période de l'année pendant laquelle se produisent les étiages ou encore à la notion de résilience qui traduit la faculté du cours d'eau à résister aux conditions de sécheresse (au sens météorologique) ou à retrouver un état normal.

¹ <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/HINDENHY.HTM>

Vers une gestion raisonnée de la ressource en eau : cadre réglementaire et définition des débits de référence d'étiage

Jusqu'à une période relativement récente, les enjeux liés aux problématiques d'étiage étaient principalement associés aux activités humaines parmi lesquels on trouve l'approvisionnement en eau potable (AEP), l'irrigation, la production énergétique (énergie hydraulique mais aussi refroidissement des centrales thermiques et nucléaires), la navigation ou encore les activités de loisirs. Aujourd'hui, les plans de gestion se doivent également d'intégrer les problématiques environnementales (la Directive Cadre Européenne sur l'eau (DCE) du 23 octobre 2000 fixe par exemple des objectifs qualitatifs et quantitatifs de maintien ou de retour au bon état écologique d'ici 2015). Les écosystèmes aquatiques se révèlent en effet particulièrement sensibles au stress occasionné par les périodes de sécheresse. Les conditions d'habitat des différentes espèces subissent d'importantes perturbations qui se traduisent le plus souvent par l'augmentation de la température et/ou la modification des conditions chimiques de l'eau (principalement en raison du plus faible potentiel de dilution) et dans les cas extrêmes par l'absence d'écoulement sur une période prolongée. Les activités humaines, par l'effet de prélèvements ou de rejet d'effluents dans le milieu, sont bien entendu susceptibles d'aggraver l'ensemble de ces phénomènes.

Compte tenu de ces différents aspects, la gestion des crises et des tensions liées à la diminution de la ressource en eau en période d'étiage se traduit dans la plupart des pays concernés par la mise en œuvre de mesures réglementaires destinées à concilier les différents usages avec la préservation du milieu aquatique. Sur le plan national, on citera la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (loi LEMA réunissant la Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992¹ et la Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006²). Cette loi, pour qui « *l'eau fait partie du patrimoine commun de la nation* », fixe un certain nombre d'objectifs parmi lesquels on retrouve la préservation des écosystèmes aquatiques, la protection contre toute pollution et la restauration de la qualité des eaux, la valorisation de l'eau comme ressource économique et la répartition de cette ressource de manière à satisfaire ou à concilier :

- les exigences de la santé, de la salubrité publique, de la sécurité civile et de l'alimentation en eau potable de la population ;
- les besoins en eau de l'agriculture, de la pêche et de l'aquaculture, de l'industrie, de la production d'énergie, du transport et des loisirs.

Pour parvenir à ces objectifs la loi LEMA prévoit la mise en place d'unités de gestion dans chaque bassin ou groupement de bassins par le biais de Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), chargés de fixer les orientations fondamentales pour une gestion équilibrée des ressources en eau. Des Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) viennent par ailleurs compléter le dispositif à l'échelle des sous-bassins. L'essentiel de la gestion passe alors par un contrôle administratif des usages au moyen de procédures de déclaration et d'autorisation.

¹ <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT00000173995&dateTexte=&categorieLien=id>

² <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT00000649171>

En ce qui concerne la problématique des étiages, la loi sur l'eau prévoit en particulier de prendre des mesures de limitation ou de suspension provisoire des usages de l'eau pour faire face à une menace de sécheresse et prévenir les déséquilibres entre prélèvements et ressources disponibles. L'activation de ces mesures, formalisées à l'échelle de l'unité de gestion au moyen de « plans cadres sécheresse », est soumise à la décision du préfet après concertation sur la situation globale de la ressource en eau sur les différents bassins du SDAGE concerné¹. Le suivi de la situation hydrologique est alors établi sur la base de quatre niveaux de gestion relatifs au franchissement de seuils de débit constaté aux différents points de suivi répartis le long du réseau hydrographique (points nodaux définis dans chaque SDAGE) (Tableau 1, selon l'interprétation de plusieurs documents et sites internet relatifs aux plans cadres sécheresse).

Si ces niveaux sont définis de manière « qualitative » sur le plan national, les valeurs de débits associées ne présentent pas de définition précise au sens statistique (à l'exception du débit minimal). Ce choix est alors laissé aux gestionnaires de bassins pour tenir compte du contexte local (*i.e.* en fonction de la disponibilité de la ressource et des différents usages de l'eau). Il en résulte parfois une certaine hétérogénéité selon les territoires considérés. A ce titre on signalera les travaux récents de Lang Delus (2011) où il est proposé une classification de différents indicateurs statistiques pouvant être utilisés pour déterminer l'état de la situation hydrologique (Figure 2).

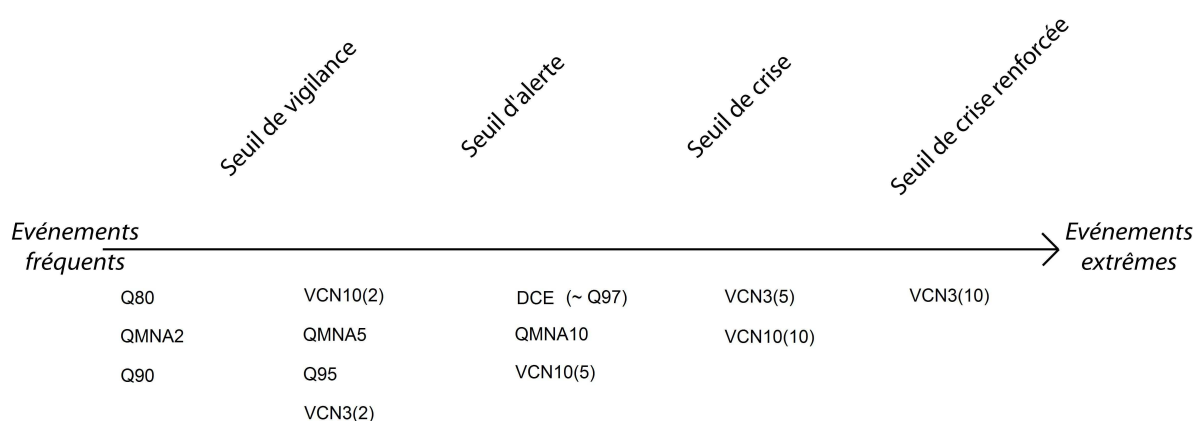


Figure 2 : Indicateurs statistiques de débit suggérés par Lang Delus (2011) pour déterminer l'état de la situation hydrologique en étiage (Q_f = Quantile de fréquence au dépassement f extrait de la courbe de débit classé, DCE = débit égalé ou non dépassé 10 jours par an, $QMNA_T$ = débit moyen mensuel minimum annuel de période de retour T , $VCNd(T)$ = débit minimum sur d jours consécutifs de période de retour T). Figure modifiée d'après Lang Delus (2011).

¹ Depuis juin 2011, les préfets enregistrent leurs arrêtés dans un nouvel outil en ligne baptisé PROPLUVIA (<http://propluvia.developpement-durable.gouv.fr/propluvia/faces/index.jsp>) et destiné à centraliser les informations relatives aux problématiques de sécheresse.

Niveau de gestion	Seuil de débit associé	Mesures de restriction
Vigilance	Laissé à l'appréciation des gestionnaires de bassins	A ce stade, des mesures de communication et de sensibilisation à l'économie d'eau sont mises en place auprès des différents usagers, sans pour autant que des mesures de limitations soient prises
Alerte	Débit Objectif d'Etiage (DOE) : valeur de débit d'étiage en un point pour laquelle il est considéré que l'ensemble des usages en aval est en équilibre avec le bon fonctionnement du milieu aquatique (basé sur le concept de débit minimum biologique). Il doit permettre la satisfaction du bon état des eaux et de l'ensemble des usages en moyenne 8 années sur 10 et donne notamment lieu dans chaque unité de gestion à la mise en œuvre « d'études volumes prélevables ».	En cas de franchissement de ce niveau, les premières mesures de limitation des usages de l'eau doivent être prises (ex. interdiction du remplissage des piscines, de l'arrosage diurne des jardins, de l'irrigation entre 8 heure et 20 heure...)
Crise	Débit de Crise (DCR) : correspond à la valeur de débit d'étiage au-dessous de laquelle l'alimentation en eau potable pour les besoins indispensables à la vie humaine et animale, ainsi que la survie des espèces présentes dans le milieu sont mises en péril.	Renforcement des mesures de limitation des prélèvements, voire suppressions de certains usages. A ce stade, l'objectif est de ne pas atteindre le niveau de crise renforcé
Crise renforcée	Débit de Crise Renforcée (DCRF) : correspond à la valeur de débit qui doit permettre de garantir en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces aquatiques. Débit minimal admissible (ou débit réservé) : est notamment défini pour la gestion des débits en aval de tout ouvrage transversal dans le lit mineur d'un cours d'eau (seuil et barrages) et ne doit pas être inférieur au 1/10ème du module. Il est parfois assimilé au débit minimum biologique au sens de l'article L-232-5 du code rural (loi "Pêche" de 1984) mais s'avère de plus en plus remis en question car parfois jugé peu pertinent de ce point de vue.	Arrêt total des prélèvements sauf raison expresse de sécurité.

Tableau 1 : Niveaux de gestion, seuils de débits associés et mesures de restriction correspondantes selon l'interprétation de plusieurs documents et sites internet relatifs aux plans cadres sécheresse

Parmi ces indicateurs, le débit moyen mensuel minimum annuel de fréquence quinquennale sèche (*i.e.* de période de retour 5 ans), couramment noté QMNA5, est le seul à être officiellement défini dans la réglementation à l'échelle nationale (ce choix reste malgré tout obscur et ne s'appuie à ce jour sur aucune justification technique). Il constitue, selon le décret nomenclature n°93-743 de la loi sur l'eau de 1992, le débit d'étiage de référence pour l'application de la police de l'eau et vise en particulier à :

- fixer les volumes des prélèvements et rejets en eaux superficielles en fonction de la sensibilité des milieux naturels concernés ;
- évaluer, en cas de sécheresse, la gravité de la crise et aider à la prise de mesures permettant une répartition quantitative des eaux en fonction des milieux et des usages.

Enfin il correspondrait sensiblement au débit biologique garanti, qui permet le maintien des espèces et le bon déroulement de leur cycle biologique. Ainsi le QMNA5 recouvre pratiquement l'ensemble des notions et usages énumérés précédemment. Il a par conséquent été retenu comme l'indicateur clé de ce travail pour la caractérisation des étiages.

On remarquera pour finir que l'ensemble des indicateurs d'étiages considérés ici correspondent à des notions de sévérité et l'on peut regretter que les aspects relatifs à la durée, à la saisonnalité ou la répétition d'épisodes sévères au cours d'une même saison (ou sur plusieurs années consécutives), pourtant fondamentaux vis-à-vis de leurs impacts sur les écosystèmes aquatiques, ne soient pas ou peu pris en compte.

Vers l'élaboration d'outils d'aide à la décision : une cartographie nationale du QMNA5

Des éléments évoqués précédemment, il ressort que les besoins de gestions en période d'étiage s'expriment en premier lieu par la nécessité de connaître les débits de référence d'étiage le long du réseau hydrographique et en particulier aux points nodaux définis dans les différents SDAGE. Il s'agit alors de faire un état des lieux de la ressource disponible qui se doit d'être représentatif d'un régime naturel¹, c'est à dire non soumis aux perturbations d'origine anthropique tels que les prélèvements (à noter que cet état des lieux rejoint les préconisations fixées par la DCE pour atteindre les objectifs de bon état écologique).

Cette tâche se révèle cependant délicate. Dans l'idéal, la détermination fiable des débits de référence d'étiage requiert en effet un suivi des débits en continu sur une période suffisamment longue pour constituer une archive exploitable (au même titre que la détermination de n'importe quelle statistique hydrologique) et n'est par conséquent seulement possible qu'au droit de certaines stations hydrométriques. Ces dernières ne permettent évidemment pas de couvrir l'ensemble des besoins exprimés sur le territoire (on rappellera notamment que, pour les raisons évoquées précédemment, les sites instrumentés implantés sur les cours d'eau soumis à une influence anthropique doivent être exclus).

Pour combler ces lacunes, une solution existe. Elle consiste à fournir, par le biais de méthodes appropriées, une estimation aussi fiable que possible de la variable recherchée. En 2008, la France était

¹ Il convient de remarquer par ailleurs que la notion d'état des lieux se réfère ici à un « état actuel » qui ne tient pas compte d'une éventuelle dérive de moyen à long terme, en particulier sous hypothèse de changement climatique.

en retard sur ce point par rapport à certains de ses voisins européens. Le meilleur exemple en est probablement l'atlas hydrologique Suisse qui fait sans doute référence en la matière (http://hades.unibe.ch/hades_f/index.htm, Aschwanden et Kan (1999), Pfaundler *et al.* (2011)). On signalera également l'effort d'exhaustivité des travaux autrichiens qui ont en particulier cherché à valoriser l'ensemble des données de débit disponibles le long du réseau hydrographique (jaugeages volants, chroniques courtes) dans un cadre méthodologique consolidé (Laaha et Blöschl, (2005, 2006a, 2006b, 2007)) ou encore les travaux initiés au Royaume-Unis dès 1980 (Institute of Hydrology (1980)) qui ont abouti à l'implémentation d'un logiciel baptisé Low Flows 2000 permettant l'estimation de différentes grandeurs hydrologiques en sites non jaugés (Gustard *et al.* (1992), Holmes *et al.* (2002), Gustard *et al.* (2004)).

A l'image de ces différentes initiatives, l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) a engagé en 2009 un certain nombre d'actions sur le territoire français en chargeant notamment Irstea de réaliser une cartographie nationale de différents descripteurs hydrologiques incluant les débits de référence d'étiage, en l'occurrence le QMNA5, (Sous-action 3.1 : prédétermination des débits de référence d'étiage incluse dans l'Action n°3 : Hydrologie des étiages de la convention ONEMA-Cemagref 2009) mais aussi le module (Cipriani et Sauquet (2012)), la courbe de débits classés (Catalogne et Sauquet (2009)) et les descripteurs de crue QIXA10 et de durée caractéristique (Cipriani *et al.* (2012)). Ces actions arrivent aujourd'hui à leur terme et les résultats obtenus sont en voie d'être mis à disposition des gestionnaires de bassins via un outil de consultation en ligne.

Contexte scientifique, objectifs de la thèse et orientation générale des travaux

Cette thèse participe pleinement à la contribution de l'Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique du centre Irstea de Lyon pour répondre aux objectifs énoncés dans la convention ONEMA-Cemagref précitée. Elle fait suite et s'appuie sur l'expérience acquise par l'unité au gré des travaux de prédétermination du QMNA5 (parmi d'autres indicateurs hydrologiques) initiés dès 2008 sur le secteur du bassin Seine-Normandie par Chopart et Sauquet (2008), puis sur les bassins pilotes de la Loire amont et de la Durance par Plasse et Sauquet (2009) mais aussi pour une ébauche de la cartographie du QMNA5 à l'échelle nationale. Elle s'inscrit également dans un exercice d'intercomparaison avec les travaux réalisés par l'Unité de Recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés d'Antony et l'Unité de Recherche Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie basée à Aix-en-Provence, exercice qui a finalement abouti à l'établissement d'une cartographie « de consensus » à l'échelle du territoire métropolitain.

Enfin, pour compléter l'aperçu du contexte scientifique de ces travaux, il est également intéressant de les replacer dans un contexte international, en particulier dans le cadre du programme scientifique « Prediction in Ungauged Basins » (PUB) proposé en 2003 à l'initiative de l'Association Internationale Association des Sciences Hydrologiques (AISH) (Sivapalan *et al.* (2003)) mais aussi dans le programme de recherche FRIEND (Flow Regime from International Experiment and Network Data), placé sous l'égide de l'UNESCO et dont le thème 3 s'attache à l'étude de la variabilité spatio-temporelle des régimes hydrologiques pour notamment en cartographier les principales caractéristiques.

Parmi les principaux objectifs de cette thèse et à l'image des travaux entrepris par Laaha et Blöschl (2005, 2006a, 2006b, 2007) en Autriche, nous nous sommes efforcés au cours de ce travail de valoriser autant que possible toute l'information disponible le long du réseau hydrographique. Ainsi, parmi les bassins examinés (ou sites cibles), il convient dès à présent de faire une distinction entre les bassins non jaugés, dépourvus de tout type d'observation à caractère hydrologique, et les bassins peu jaugés, pour lesquels on dispose d'une information de débit fragmentaire, soit sous la forme de mesures de débit ponctuelles (jaugeages volants ou jaugeages épisodiques) soit sous la forme de chroniques courtes.

De cette distinction résultent évidemment des différences en matière de méthodologie et de performances d'estimation. Dans le second cas et comme le suggère la littérature existant à ce sujet, il est en effet attendu que l'exploitation appropriée de l'information de débit disponible localement permette d'accroître la fiabilité des estimations obtenues.

Sur le plan méthodologique, malgré des différences de fond, on remarquera que l'ensemble des techniques mises en œuvre reposent sur le concept de régionalisation. Celui-ci consiste à faire appel à l'information « régionale » disponible dans le voisinage du site cible, c'est-à-dire issue d'un ou plusieurs sites instrumentés de référence (ou sites d'appui, disposant d'une chronique suffisamment longue pour la détermination d'un QMNA5 fiable), pour décrire la variabilité spatiale de l'information hydrologique étudiée, par exemple au travers de relations régionales entre la variable d'intérêt et une information disponible localement (qu'elle soit de nature hydrologique ou non), et, sur cette base, parvenir à fournir une estimation au site cible. De là, la sélection des sites d'appui appropriés (*i.e.* la définition d'un voisinage) constitue, comme le suggère la littérature, une des problématique essentielle pour l'obtention de résultats performants.

Une seconde préoccupation majeure était de déterminer, d'abord dans un but de comparaison, les performances relatives de chacune des méthodes d'estimation testées au cours de ce travail mais aussi d'être à même de fournir une indication sur la fiabilité de chaque valeur estimée (par exemple au travers d'un intervalle de confiance). Pour ce faire la démarche employée tout au long de nos travaux repose sur la mise en œuvre d'une procédure de validation croisée consistant à considérer tour à tour chaque site de référence à notre disposition comme un site cible (soit non jaugé, soit peu jaugé) pour y fournir une estimation et comparer celle-ci avec la valeur effectivement observée.

Enfin, afin de bien clarifier les choix effectués pour orienter nos travaux, on précisera qu'il a été privilégié les méthodes permettant d'estimer directement la variable d'intérêt, le QMNA5, sans passer par l'intermédiaire de techniques permettant l'extension ou la reconstitution de chroniques de débit comme le permettrait l'emploi de modèles hydrologiques pluie-débit (*e.g.* Engeland et Hisdal (2009)). Ce choix tient avant tout au fait que nous nous intéressons ici à une unique variable. Cependant on entrevoit naturellement l'avantage offert par les approches permettant l'obtention du maximum d'information à l'issue de la procédure d'estimation, notamment pour ce qui est de la reconstitution de chroniques de débits et la possibilité d'en déduire tout un panel de statistiques hydrologiques. Ce type de raisonnement reste toutefois à modérer dans la mesure où la complexité de la chaîne d'estimation (et *a*

priori la fiabilité des estimations obtenues) est à mettre en rapport direct avec la complexité de l'information estimée. On signalera en particulier que, dans le cas de la reconstitution de chroniques au moyen de modèles hydrologiques, se posent un certain nombre de problèmes annexes (choix du modèle, phase de calage des paramètres du modèle choisi puis régionalisation de ceux-ci, nécessité de disposer d'une information complémentaire sur les bassins cibles et de référence (dans les cas les plus simples il s'agira généralement des précipitations au pas de temps requis dans le modèle), qui complexifient fortement la généralisation de ce type de démarche dans le cas d'un grand nombre de bassins, c'est pourquoi il a été choisi de ne pas examiner cette solution (on signalera toutefois qu'il est proposé dans ce document une confrontation d'une telle approche, expérimentée au sein de l'UR OHAX, avec nos propres résultats).

Plan du manuscrit

Les objectifs étant posés, il est possible de résumer l'organisation de ce manuscrit au travers de six chapitres eux même regroupés en trois parties principales (Figure 3).

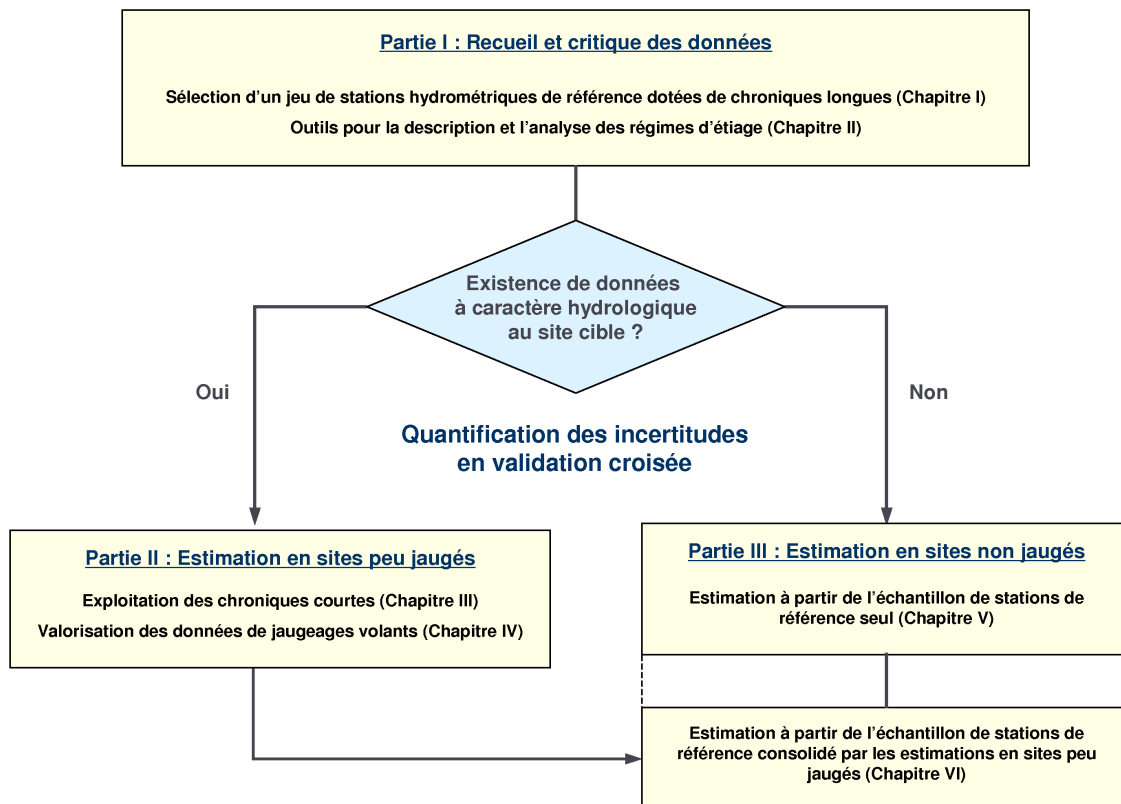


Figure 3 : Schéma simplifié de l'organisation du manuscrit

La première d'entre elles sera tout d'abord consacrée à la présentation des données employées au cours de ces travaux. Ainsi il y est fait état, entre autre chose, de l'importante étape de critique et de sélection des données à caractère hydrologique ayant permis de parvenir à la constitution d'un jeu de stations de référence (Chapitre I). Il y sera également question du recueil de données auxiliaires pour la

description des bassins en termes de climat, de topographie, de géologie, etc. Nous aborderons ensuite le travail préliminaire effectué à partir de ces données en vue de caractériser les régimes d'étiage en France au travers de l'analyse de différents indicateurs statistiques relatifs aux basses-eaux (Chapitre II).

La seconde partie de ce manuscrit est dédiée à la présentation et la confrontation en validation croisée des méthodes employées pour estimer le QMNA5 en sites peu jaugés, c'est-à-dire en cherchant à valoriser au mieux l'information de débit disponible localement lorsqu'elle existe. Il sera ainsi détaillé, dans deux chapitres distincts, les éléments relatifs à l'exploitation des chroniques courtes d'une part (Chapitre III) et à la valorisation des données de jaugeages volants d'autre part (Chapitre IV).

Le cas des sites non jaugés sera ensuite traité dans une troisième partie où l'on distinguera tout d'abord une première étape visant à fournir une estimation de référence à partir du seul jeu de stations hydrométriques dotées de chroniques longues (Chapitre V). Cependant celle-ci ne constituera qu'une étape intermédiaire et, dans un second temps, nous envisagerons de faire appel à une démarche peu usitée consistant à introduire des données complémentaires issues des estimations préalablement obtenues en sites peu jaugés, sous réserve de tenir compte de leurs incertitudes, pour consolider l'échantillon de référence et éventuellement permettre d'améliorer la fiabilité des estimations en sites non jaugés (Chapitre VI).

Enfin sera proposée une conclusion générale des travaux permettant de faire le bilan des résultats obtenus mais aussi, en guise de perspectives, de déterminer les pistes de recherche à approfondir pour améliorer encore nos résultats et éventuellement élargir notre démarche à d'autres catégories de descripteurs du régime d'étiage.

Références bibliographiques

- Aschwanden H., Kan C. (1999). Le débit d'étiage Q347 – Etat de la question. Service hydrologique et géologique national, Communications hydrologique No. 27, 132 pp.
- Catalogne C., Sauquet E., (2009). Interpolation des courbes de débits classés. Rapport d'étude, Cemagref, 97 pp.
- Chopart S., Sauquet E. (2008). Using spot gauging data to interpolate low flow characteristics. *Journal of Water Science*, Vol. 21(3), pp. 267-281.
- Cipriani T., Toilliez T., Sauquet E., (2012). Estimation régionale des débits décennaux et durées caractéristiques de crue en France. *La Houille Blanche*, 4/5, sous presse.
- Cipriani T., Sauquet E. (2012). Cartographie des débits de référence – Interpolation du module. Rapport d'étude, Irstea, 54 pp.
- Dacharry M. (1996). Dictionnaire français d'hydrologie (<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/indexdic.htm>)
- Dumas P., Macaire A., Chavarot A., Dimitrov C., Quefellec C., Legrand H., Martin X. (2005). Mission d'enquête sur le régime d'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles. Rapport du Ministère des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer, 757 pp. (<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/064000106/index.shtml>)
- Engeland K., Hisdal H. (2009). A comparison of low flow estimates in ungauged catchments using regional regression and the HBV-model. *Water Resources Management*, Vol. 23(12), pp. 2567-2586.
- Gustard A., Bullock A., Dixon J.M. (1992). Low flow estimation in the United Kingdom. Institute of Hydrology, Report No. 108, 88 pp., append.
- Gustard A., Young A.R., Rees G., Holmes M.G.R. (2004). Operational hydrology. In: *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater* (ed. by L. M. Tallaksen & H. A. J. van Lanen), *Developments in Water Science* 48, Elsevier, The Netherlands., pp. 455-484.
- Holmes M.G.R., Young A.R., Gustard A., Grew R. (2002). A Region of Influence approach to predicting Flow Duration Curves within ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 6(4), pp. 721-731.
- Institute of Hydrology (1980). Low-flow studies. Report No. 1, Wallingford, Oxon, U.K.
- Laaha G., Blöschl, G. (2005). Low flow estimates from short stream flow records - a comparison of methods. *Journal of Hydrology*, Vol. 306(1-4), pp. 264-286.
- Laaha G., Blöschl G. (2006a). A comparison of low flow regionalisation methods - catchment grouping. *Journal of Hydrology*, Vol. 323(1-4), pp. 193-214.

- Laaha G., Blöschl G. (2006b). The value of seasonality indices for regionalizing low flows. *Hydrological Processes*, Vol. 20(18), pp. 3851-3878.
- Laaha G., Blöschl G. (2007). A national low flow estimation procedure for Austria. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 52(4), pp. 625-644.
- Lang Delus C. (2011). Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. *Cybergeog : European Journal of Geography [En ligne]*, Environnement, Nature, Paysage, article 571.
- Merz R., Blöschl G. (2004). Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, Vol. 287(1-4), pp. 95-123.
- Pfaundler M., Dübendorfer C., Zysset A. (2011). Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau. *Hydrologie – régime d'écoulement niveau R (région)*. Office fédéral de l'environnement, Berne. *L'environnement pratique n° 1107*, 113 pp.
- Plasse J., Sauquet E. (2009). Interpolation des débits de référence d'étiage. Rapport d'étude, Cemagref, 166 pp.
- Roche M. (1986). Dictionnaire français d'hydrologie de surface avec équivalents en anglais, espagnol, allemand. Masson Editeur, 288 pp.
- Sivapalan M., Takeuchi K., Franks S.W., Gupta V.K., Karambi H., Lakshmi V., Liang X., McDonnell J.J., Mendiondo E.M., O'Connell P.E., Oki T., Pomeroy J.W., Schertzer D., Uhlenbrook S., Zehe E. (2003). IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 48(6), pp. 857-880.
- Smakhtin V.Y. (2001). Low flow hydrology : a review. *Journal of hydrology*, Vol. 240(3-4), pp. 147-186.
- WMO (2008). Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report n°50. 136 p.

PREMIERE PARTIE

DONNEES EMPLOYEES ET ETUDE DES REGIMES D'ETIAGE EN FRANCE

Chapitre I.

Recueil et critique des données

Dans ce premier chapitre sont exposés les éléments relatifs à l'étape de critique et de sélection des données nécessaires à la réalisation de nos travaux ; étape qui s'avère essentielle et doit être menée avec soin pour asseoir nos résultats sur des fondements solides. Un important travail de critique a donc été effectué en ce sens. Les données à caractère hydrologique ont notamment fait l'objet d'une attention particulière pour parvenir à la constitution d'un échantillon de stations hydrométriques de référence exploitable dans le cadre de la régionalisation. Parallèlement ont été recueillies des données destinées à décrire les caractéristiques des bassins versants en termes de climat, de morphologie, d'occupation des sols et de géologie. L'ensemble représente une masse de données considérable au sein de laquelle il est difficile d'avoir conscience de chaque spécificité locale, néanmoins une analyse plus globale semble montrer que les échantillons constitués s'avèrent suffisamment représentatifs des principaux contextes hydro-climatiques existant sur le plan national.

I.1 Données à caractère hydrologique

Les données dont il est question ici se présentent sous la forme de chroniques datées de débits moyens journaliers (exprimés en l/s) issues de mesures en continu, généralement à pas de temps variable, réalisées en divers points du réseau hydrographique français (incluant les territoires d'Outre-Mer). Ces données ont été recueillies auprès de la Banque HYDRO (Banque nationale de données pour l'hydrométrie et l'hydrologie¹) qui recense et rassemble à l'heure actuelle les données de près de 4000

¹ <http://www.hydro.eaufrance.fr> L'importation des données a été réalisée au cours de l'année 2010, les changements apparus dans la base de données depuis cette date n'ont pas été pris en compte.

sites instrumentés dont la gestion est assurée par les services de l'état (DREAL, SPC, SHAPI) mais aussi par divers organismes publics ou privés dotés de compétences en hydrométrie (EDF, CNR, Irstea...). Chacune des stations inventoriées est désignée par un code constitué d'une lettre, relative à l'un des 22 grands bassins hydrographiques définis dans la nomenclature nationale de la Banque HYDRO (Figure I-1), suivie de sept chiffres se rapportant aux différents sous-bassins inclus dans le secteur considéré (e.g. la station X1424010 correspond au site de l'Asse à Beynes [Chabrières], un affluent rive gauche de la Durance (Secteur X) compris entre le Buëch et le Verdon (Sous-secteur X1))

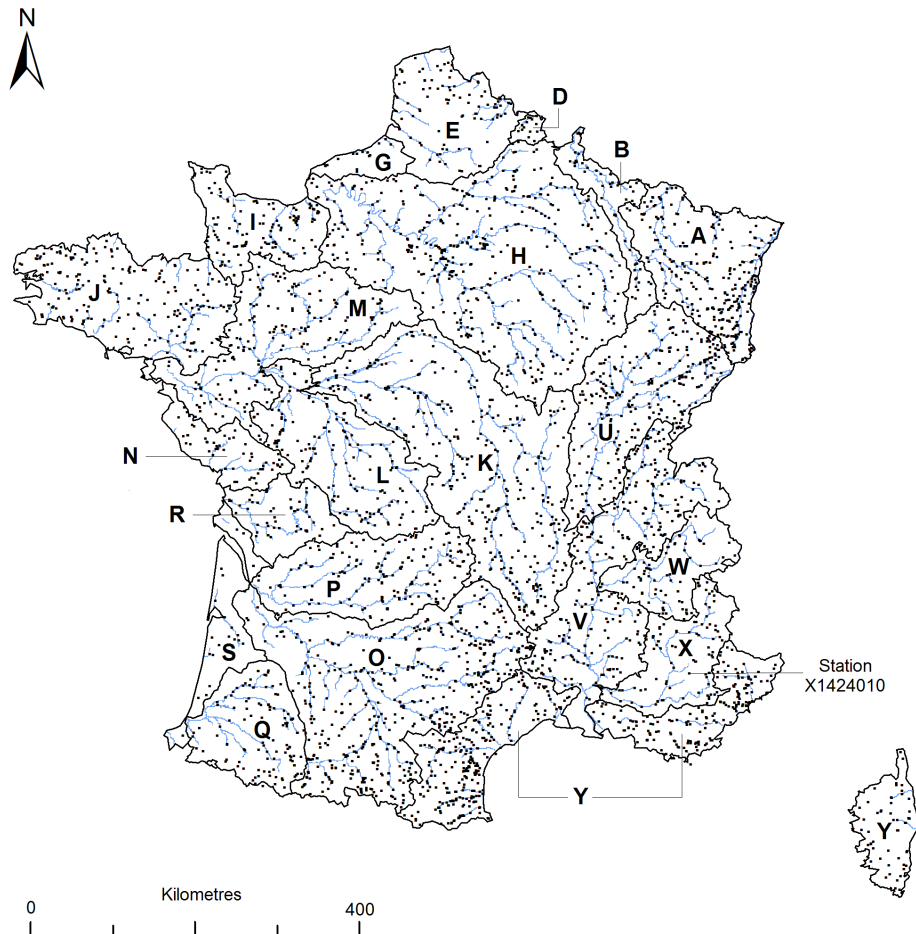


Figure I-1 : Localisation des stations recensées dans la Banque HYDRO sur le territoire métropolitain et contours des 22 grands secteurs hydrographiques

Afin de dégager un jeu de stations de référence adapté à nos objectifs, il a été procédé à un travail de vérification et de sélection des données disponibles en tentant d'adopter une démarche aussi rigoureuse que possible compte tenu des informations parfois insuffisantes (voire erronées !) relatives aux stations hydrométriques. Ainsi s'il s'agit généralement de disposer d'un jeu de données suffisamment étoffé pour répondre aux exigences de représentativité nécessaires pour assurer l'efficacité des méthodes de régionalisation, il est également indispensable d'exclure les données ne présentant pas une fiabilité suffisante ou relatives à des cours d'eau perturbés par les activités anthropiques (rappelons qu'il s'agit d'une des conditions imposées pour réaliser un état des lieux de la ressource disponible, cf. Introduction).

Notons que la notion de représentativité se réfère ici à trois aspects importants qui ont été examinés en détail au cours de la sélection :

- la représentativité statistique, qui requiert l'emploi de chroniques suffisamment longues pour assurer la robustesse des statistiques hydrologiques calculées ;
- la représentativité spatiale, qui sous-entend une répartition homogène des sites de référence ;
- la représentativité « comportementale » permettant de rendre compte de la diversité des contextes hydro-climatiques.

Toute la difficulté consiste alors à trouver le meilleur compromis entre représentativité spatiale ou comportementale et représentativité statistique (*i.e.* longueur des chroniques) qui constitue probablement le critère le plus contraignant en terme de sélection des données.

I.1.1 Période de référence et durée des chroniques

La période allant du 1^{er} janvier 1970 au 31 décembre 2005 a été choisie comme période de référence (soit un maximum de 36 années de suivi) pour la détermination du QMNA5 et des autres statistiques hydrologiques qui seront employées au cours de ces travaux. Elle représente en effet la période pour laquelle le nombre de stations en fonctionnement est le plus élevé avec un maximum atteint au cours de l'année 2005 et succède notamment à une importante période d'expansion du réseau de mesure au cours des années 60 (Figure I-2). Ce choix permettra de travailler sur des données récentes (étude de l'état « actuel » comme énoncé dans les objectifs de ce travail, *cf.* Introduction) et d'assurer un maximum de concomitance entre les chroniques sélectionnées.

Etant donné que le nombre de sites disposant de données sur la totalité de la période de référence est pratiquement nul, il a été examiné la possibilité d'employer des chroniques plus courtes sans affecter significativement la détermination des statistiques hydrologiques relatives aux étiages. On trouve dans la littérature quelques recommandations à ce sujet. Cependant ces recommandations restent souvent subjectives et diffèrent parfois fortement selon les auteurs : Tallaksen et Van Lanen (2004) recommandent par exemple de travailler avec des chroniques disposant d'au moins 15 à 20 années d'observation, Ashwanden et Kan (1999) considèrent 10 années comme suffisantes (sur la base de la réglementation Suisse concernant la détermination du Q347, débit dépassé en moyenne 347 jours chaque année) tandis que Dyck (1976) juge les chroniques de 3 années « déjà » exploitables en contexte climatique humide.

En pratique les besoins doivent s'exprimer en fonction de la variable d'intérêt, c'est pourquoi, afin de déterminer objectivement la longueur de chronique requise pour la détermination fiable des statistiques d'étiage sur la période de référence 1970-2005, il a été choisi de réaliser une analyse de sensibilité vis-à-vis de la longueur des chroniques disponibles.

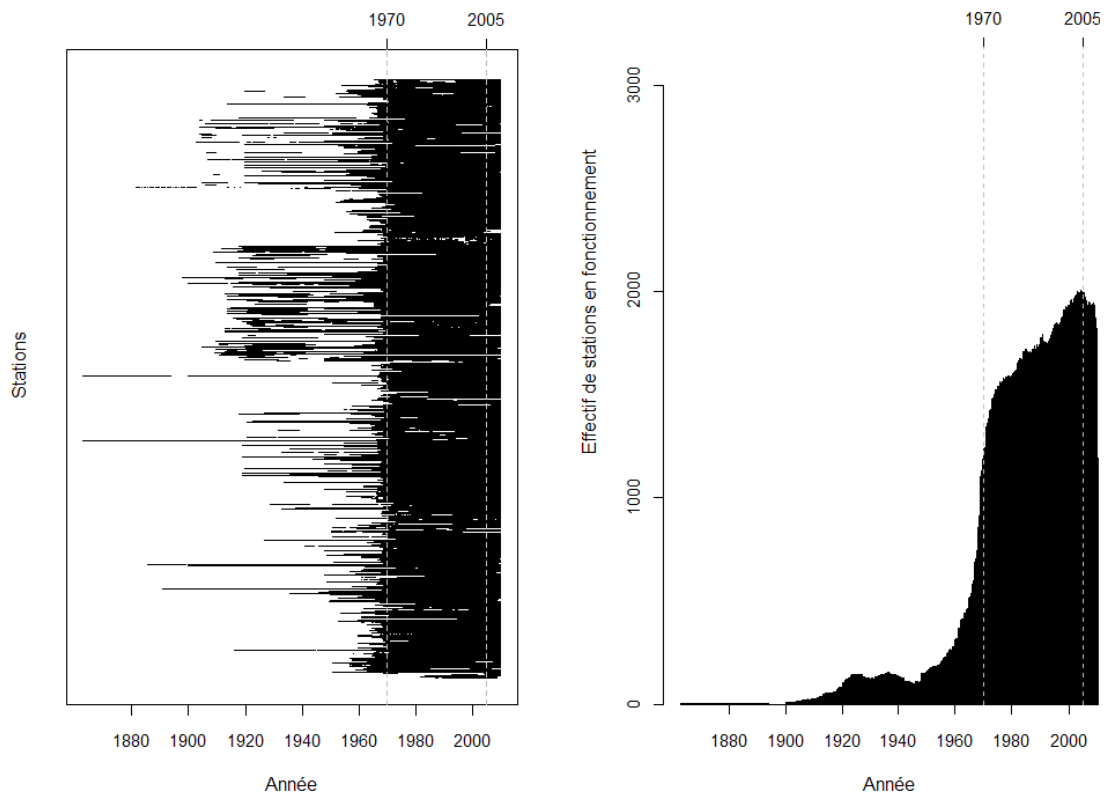


Figure I-2 : Disponibilité des données pour l'ensemble des stations recensées dans la Banque HYDRO (en noir : année disponible) et effectif de stations en fonctionnement sur la période 1860-2010

Pour mener à bien cette analyse, un échantillon pilote constitué de 274 sites instrumentés déjà critiqués de manière approfondie, disposant de chroniques réputées fiables, suffisamment longues (*i.e.* au moins 30 années d'enregistrements sans lacunes sur la période de référence) et relativement bien répartis sur l'ensemble du territoire a été exploité¹. Plusieurs statistiques hydrologiques, représentatives de différents aspects du régime hydrologique², ont ainsi été calculées successivement en simulant des longueurs de chronique comprises entre $D = 5$ et $D = 30$ années d'enregistrement consécutives (*i.e.* échantillonnage par blocs de D années) :

- le module interannuel (noté QA) ;
- le quantile Q95 extrait de la courbe de débits classés interannuelle (valeur de débit dépassée en moyenne 95% du temps, proche du QMNA5, *cf.* section II.1.3) ;
- la date moyenne des jours où $Q < Q95$ (pris à titre d'indicateur de saisonnalité, noté SI) ;
- le « Base Flow Index » (proportion de l'écoulement de base par rapport à l'écoulement total, noté BFI).

Un écart relatif à la valeur de référence obtenue sur la totalité de la chronique disponible (*i.e.* jusqu'à 36 années) est ensuite calculé à l'issue de chaque échantillonnage.

¹ Echantillons de référence employés dans l'étude menée à l'échelle nationale par Giuntoli et Renard (2010) et dans l'étude menée sur le secteur Seine-Normandie par Plasse et Sauquet (2009).

² Ces différentes variables et leurs modalités d'extraction à partir des chroniques sont présentées plus en détail en section II.1.

Pour chaque site examiné, il a été décidé que la longueur de chronique appropriée devait permettre de trouver 75 % des valeurs dans un intervalle de ± 10 % autour de la valeur de référence dans le cas des variables de débit QA et Q95, de ± 10 jours dans le cas de l'indice de saisonnalité et de ± 0.05 pour le BFI. Ces critères, quoique arbitraires, nous ont paru suffisamment exigeants pour assurer dans la majorité des cas la bonne représentativité statistique des indices calculés.

Dans l'exemple donné ci-dessous pour la station P3234010 (La Loyre à Voutezac [Pont de l'aumonerie]) (Figure I-3) la longueur de chronique acceptable pour la détermination des quatre statistiques examinées approche 15 années pour le QA, 16 années pour le Q95 et 12 années pour l'indice de saisonnalité SI ; elle est inférieure à 5 années pour le BFI (graphiques de gauche¹). Cette figure permet également d'illustrer l'impact de la variabilité climatique sur la détermination des statistiques hydrologiques (graphiques de droite) et, par extension, la sensibilité des variables étudiées à la période échantillonnée. Le choix d'une longueur de chronique permettant d'obtenir 75 % de valeurs dans un intervalle de moins de 10 % autour de la valeur de référence (tracé noir) assure que la sensibilité à la période d'observation effectivement disponible restera limitée et permettra de s'affranchir d'une stricte concomitance entre les chroniques.

Les résultats obtenus pour l'ensemble de l'échantillon pilote sont illustrés sur la Figure I-4 sous la forme de « boxplots ». On constate malheureusement qu'il existe de fortes disparités dans les longueurs de chroniques appropriées selon la variable examinée ou le bassin considéré. Ces disparités ne permettent pas de fixer une longueur de chronique adéquate de manière « universelle », il a cependant été choisi de retenir la valeur obtenue pour 75% de l'échantillon soit 18 ans pour le module interannuel, 26 ans pour le Q95, 15 ans pour l'indice de saisonnalité et moins de 5 années pour le BFI.

De là on remarque que le Q95, relatif à la sévérité des étiages, se révèle beaucoup plus sensible à la longueur de chronique disponible que la statistique représentative du comportement moyen (QA), cette sensibilité étant par ailleurs souvent accrue pour les bassins faiblement productifs en période d'étiage (probablement en raison de leur plus forte sensibilité aux variations climatiques locales). A l'inverse une variable telle que la saisonnalité, se rapportant à une caractéristique intrinsèque du climat local (cycle annuel assez peu variable sur cette échelle de temps), s'avère plus stable. Cette observation est d'autant plus vraie pour le BFI qui peut être considéré comme une caractérisation des propriétés intrinsèques du bassin (considéré comme un filtre) et ne présente par conséquent qu'une faible sensibilité aux variations climatiques à moyen et long terme.

Dans tous les cas il sera privilégié la valeur la plus exigeante dégagée ci-dessus pour sélectionner les sites appartenant à l'échantillon de référence. Les chroniques d'une durée inférieure à 26 années seront alors considérées comme des chroniques courtes et exploitées en tant que telles.

¹ Ici les distributions des écarts à la valeur de référence sont résumées sous forme de boxplots dont les différents figurés indiquent la valeur médiane (trait gras), les premiers et troisièmes quartiles (« boîte »), les bornes entre lesquelles sont inclus environ 95 % des valeurs (« moustaches » correspondant à la médiane +/- 1.58 fois la distance interquartile).

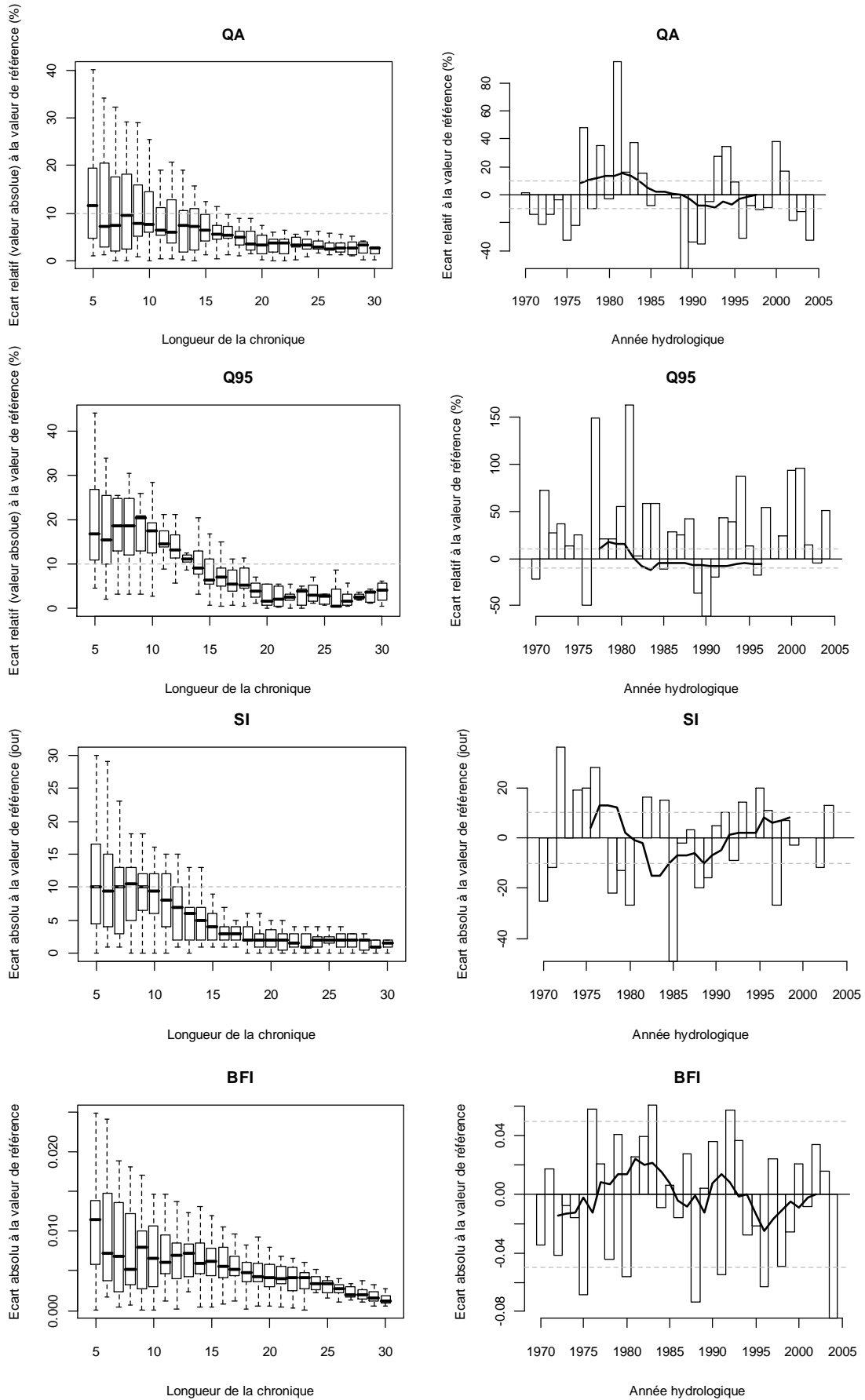


Figure I-3 : Distributions des écarts à la valeur de référence pour les quatre statistiques hydrologiques examinées et pour l'ensemble des ré-échantillonnages par blocs de 5 à 30 ans (à gauche), évolution de l'écart à la valeur de référence chaque année (à droite) et écarts pour la longueur de chronique jugée acceptable (tracé noir) pour la station P3234010 (La Loyre à Voutezac [Pont de l'Aumonerie])

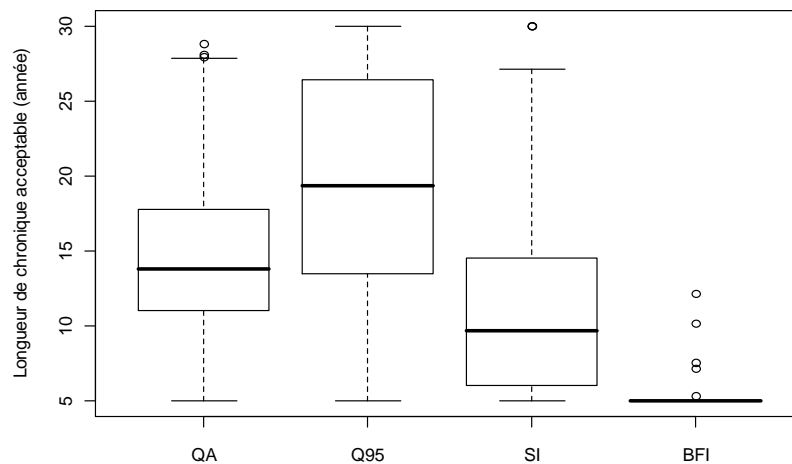


Figure I-4 : Distributions des longueurs de chroniques jugées adéquates pour les 274 sites de l'échantillon pilote

1.1.2 Qualité des données et caractère influencé de l'écoulement

Parmi les exigences relatives à la sélection des chroniques de débit, la bonne qualité des données s'avère être un critère indispensable pour assurer la validité de nos résultats. Malheureusement les sources d'imprécision sur les données de débit peuvent s'avérer nombreuses et restent souvent assez mal quantifiées ou difficilement identifiables à partir de la seule analyse des chroniques. Parmi les principales causes à l'origine de ces imprécisions il est possible de citer :

- la modification plus ou moins progressive de la section de mesure (envasement, incision, présence d'embâcles ou développement saisonnier de végétation) ;
- la modification de la position du capteur suite à une panne ou lors d'un changement de matériel ;
- la modification ou la réactualisation de la courbe de tarage permettant de faire la conversion entre hauteurs mesurées et débits (suite par exemple à un changement de gestionnaire de la station, l'ajout de nouveaux jaugeages...) ;
- l'imprécision de la courbe de tarage.

Dans ce dernier cas l'imprécision en question peut elle-même avoir plusieurs origines dont l'imprécision des jaugeages eux-mêmes ou un nombre de jaugeages insuffisants, notamment dans les gammes de débits extrêmes pour lesquels la courbe est alors extrapolée avec une forte incertitude.

L'hydrométrie des débits d'étiage se révèle particulièrement sensible à certains des problèmes métrologiques énoncés ci-dessus. En effet les sections de mesures s'avèrent souvent peu appropriées pour la mesure des très faibles débits (historiquement, de nombreuses stations ont été implantées pour la surveillance et l'annonce des crues, celles-ci n'avaient alors pas vocation à fournir des données précises en étiage). Lorsque la section n'est pas équipée d'un dispositif de concentration des écoulements (*e.g.* seuil calibré), les faibles variations de hauteurs d'eau peuvent se révéler difficiles à mesurer avec précision tandis que les vitesses d'écoulement et/ou hauteurs d'eau peuvent s'avérer insuffisantes pour les moyens

de jaugeages traditionnels¹. En tout état de cause, la précision des données de débits fournies par la banque HYDRO est de 1 l/s, il en résulte notamment que les débits de cet ordre de grandeur peuvent être assimilés à des débits nuls.

Parmi les critères de sélection des stations hydrométrique et comme énoncé dans les conditions de réalisation d'un état des lieux représentatif d'un régime hydrologique naturel, un second aspect se réfère au caractère influencé ou non du cours d'eau jaugé, c'est à dire à l'existence de perturbations significatives des écoulements par les activités humaines en amont de la station. De nombreux cours d'eau se trouvent en effet aménagés de plus ou moins longue date (barrages, retenues collinaires, dérivation, canaux, prélèvements, rejets de stations d'épuration) et les régimes hydrologiques volontairement modifiés afin de satisfaire différents besoins tels que la production d'électricité, la navigabilité, l'écrêtement des crues ou l'irrigation. Encore une fois, l'impact de ces modifications reste le plus souvent difficilement quantifiable. On peut toutefois distinguer le cas des ouvrages permanents tels que les barrages dont la localisation, la date de construction (et éventuellement la date d'effacement) sont bien connues (Figure I-5). Dans le meilleur des cas l'impact de ce type d'aménagement sur les écoulements sont quantifiables, permettant ainsi une reconstitution des débits « naturels » (le plus souvent grâce à un bilan entrées/sorties avec prise en compte des variations de stock de la retenue en question). Si la qualité de ces reconstitutions reste parfois douteuse (dans le cas de retenue de grande capacité, une petite imprécision sur la détermination des variations de réserve peut générer une forte erreur sur le débit calculé), il a néanmoins été choisi de conserver les stations concernées. Il est en revanche beaucoup plus difficile d'estimer l'impact des influences à caractère diffus tels que les prélèvements (en particulier les prélèvements agricoles), dont la localisation et l'importance varient d'une année sur l'autre (voire au cours d'une même année) et s'avère par ailleurs rarement quantifiée avec précision (du moins pas au pas de temps journalier).

S'il n'existe pas dans la Banque HYDRO de mention précise et quantitative concernant l'incertitude affectant les données de débits ou l'influence exercée sur le régime hydrologique, un certain nombre d'informations de nature qualitative, mises à disposition parallèlement aux données de débit, ont tout de même permis de réaliser une première sélection visant à dégrossir notre échantillon pour ne conserver que les sites répondant aux critères suivants : « mesures à signification hydrologique », « caractère peu ou pas influencé » et « bonne qualité des mesures en basses eaux »².

Néanmoins une rapide vérification des données a permis de constater que certaines de ces informations devaient être prises avec précaution (l'existence d'une influence significative mais non signalée dans la banque HYDRO s'avère par exemple courante). Ainsi un travail de critique approfondi a été mené de manière à identifier les sites les plus douteux, en premier lieu grâce au recueil d'informations sur l'existence d'aménagements susceptibles d'impacter significativement le régime d'écoulement en amont des stations (Figure I-6).

¹ En revanche, contrairement aux crues, la mesure en continu des débits d'étiage autorise un pas de temps d'enregistrement relativement grossier sans répercussion importante en terme de perte d'information.

² Selon la terminologie adoptée dans la banque HYDRO

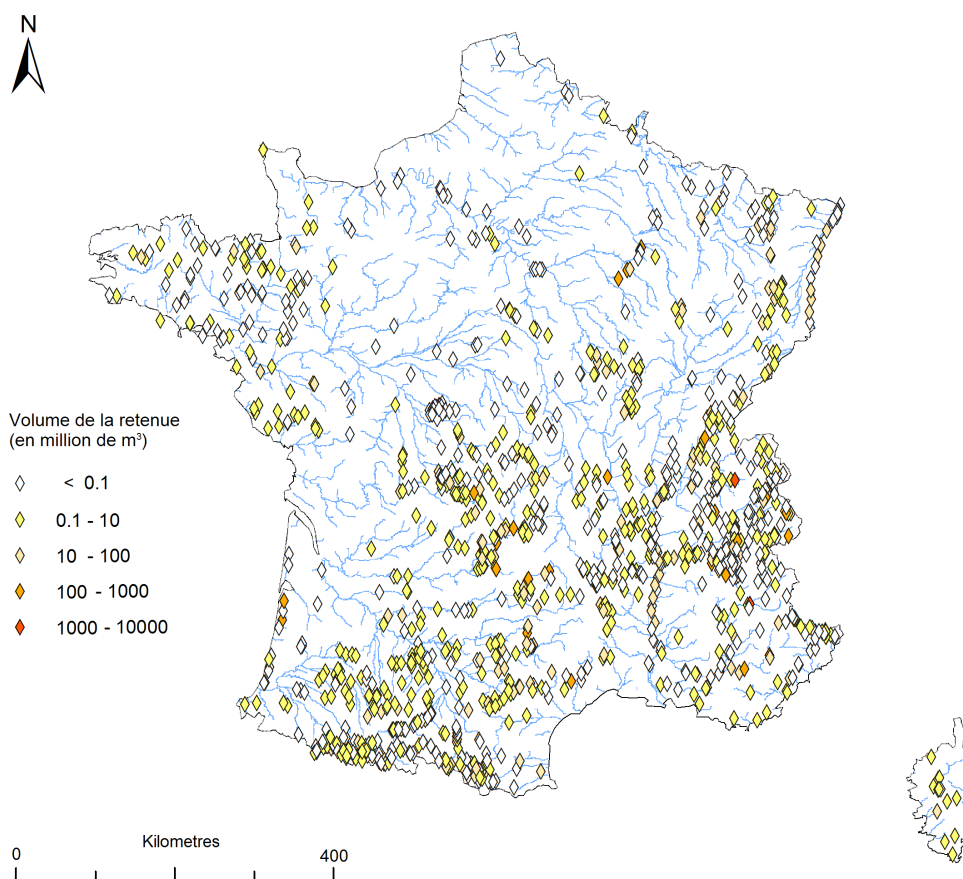


Figure I-5 : Localisation des principaux barrages et retenues susceptibles d'affecter le régime hydrologique des cours d'eau (Chandesris, communication personnelle)

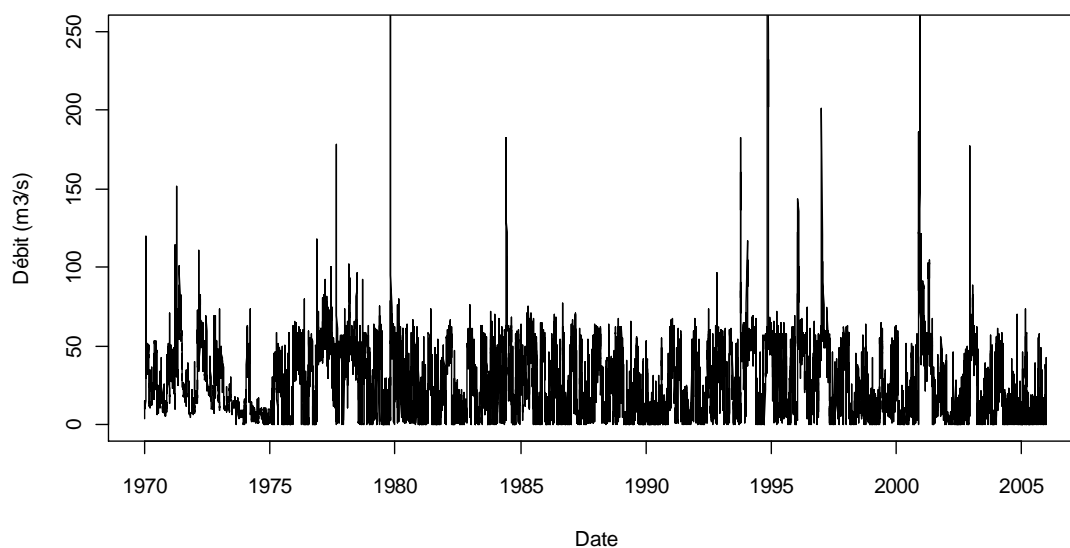


Figure I-6 : Chronique du Verdon à Vinon-sur-Verdon (X2812010) sur la période 1970-2005 montrant l'effet des aménagements hydroélectriques situés en amont (station qualifiée de « pas ou faiblement influencée » dans la Banque HYDRO)

Parallèlement, nous avons complété cette analyse par un examen visuel des chroniques et l'utilisation de tests statistiques de rupture (test de Pettitt (1979)) et de tendance (test de Mann-Kendall modifié, Hamed et Rao (1998)) sur les séries annuelles de débits moyens annuels (QA) et de débits moyens mensuels minimaux annuels (QMNA). Si ces tests ont ici pour objectif de détecter certains des problèmes métrologiques mentionnés précédemment (*e.g.* une modification de la position du capteur ayant entraîné une rupture dans la chronique), l'interprétation en est cependant rendue difficile en raison de la possible juxtaposition de ces problèmes avec les dérives et ruptures d'origine naturelles (*i.e.* le plus souvent attribuées aux variations climatiques ou éventuellement à une modification de l'occupation des sols). Ainsi, à l'exception de quelques cas particulièrement pathologiques et nettement visibles sur la chronique (l'Isle à Saint-Laurent-des-Hommes (P7181510) présente par exemple une rupture significative à la hausse en 1983 contrairement à ce qui est observé dans son voisinage immédiat, Figure I-7), et en l'absence d'arguments valables (modification de la section, re-actualisation de la courbe de tarage, changement de gestionnaire), le choix d'un rejet basé sur les tests de stationnarité reste délicat¹.

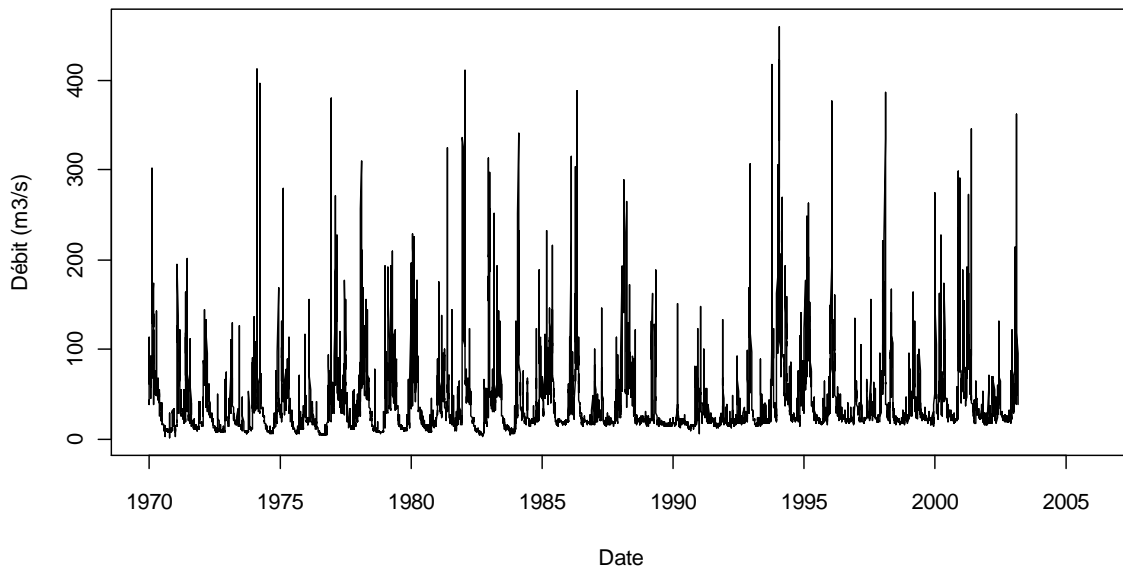


Figure I-7 : Chronique de l'Isle à Saint-Laurent-des-Hommes (P7181510) sur la période 1970-2005 montrant une rupture nette à la fin de l'année 1983

A l'issue de ce travail de critique et en croisant l'ensemble des critères de sélection, il a été finalement dégagé deux jeux de données distincts, l'un constitué de 632 stations dotées de chroniques longues (comprenant au moins 26 années d'observation complètes, *i.e.* sans lacunes) qui sera employé comme échantillon de référence au cours de nos travaux (Annexe II), notamment aux cours des démarches de validation croisée, et l'autre constitué de 1257 stations disposant de moins de 26 années d'enregistrement complètes qui seront considérées comme des sites peu jaugés dotés de chroniques courtes (Annexe III).

¹ Plusieurs chroniques présentent par exemple une rupture associée à une lacune de mesure, il est cependant difficile de déterminer si cette rupture est liée à la lacune proprement dite (*e.g.* remplacement de la station) ou si cette dernière masque simplement une évolution naturelle.

Notons que la validité d'un certain nombre de ces stations pourrait être encore remise en cause, notamment vis-à-vis de la fiabilité des mesures qui constitue probablement l'une des principales faiblesses des données sélectionnées en raison du manque d'informations disponibles à ce sujet. Néanmoins on signalera qu'une démarche de vérification de notre sélection auprès des gestionnaires a été engagée par N. Folton de l'UR OHAX au cours de l'année 2011. A ce jour, cette enquête a permis de valider au moins la moitié des stations conservées dans nos échantillons (pour l'autre moitié, les sollicitations sont restées sans réponse). Les quelques sites remis en question (au nombre de sept), s'ils n'ont pas été exclus de nos échantillons en raison de l'avancée des travaux, ont néanmoins fait l'objet d'une attention particulière quant aux résultats obtenus en validation croisée.

1.1.3 Représentativité des stations sélectionnées

Les cartes reportées sur la Figure I-8 et la Figure I-9 donnent un aperçu de la localisation des stations des deux échantillons de stations sélectionnées à l'issue de l'étape de critique des données ainsi que des contours de leurs bassins versants respectifs. En complément le Tableau I-1 fournit les caractéristiques relatives à la densité spatiale et la couverture du territoire (hors bassins emboîtés) de chacun des deux échantillons.

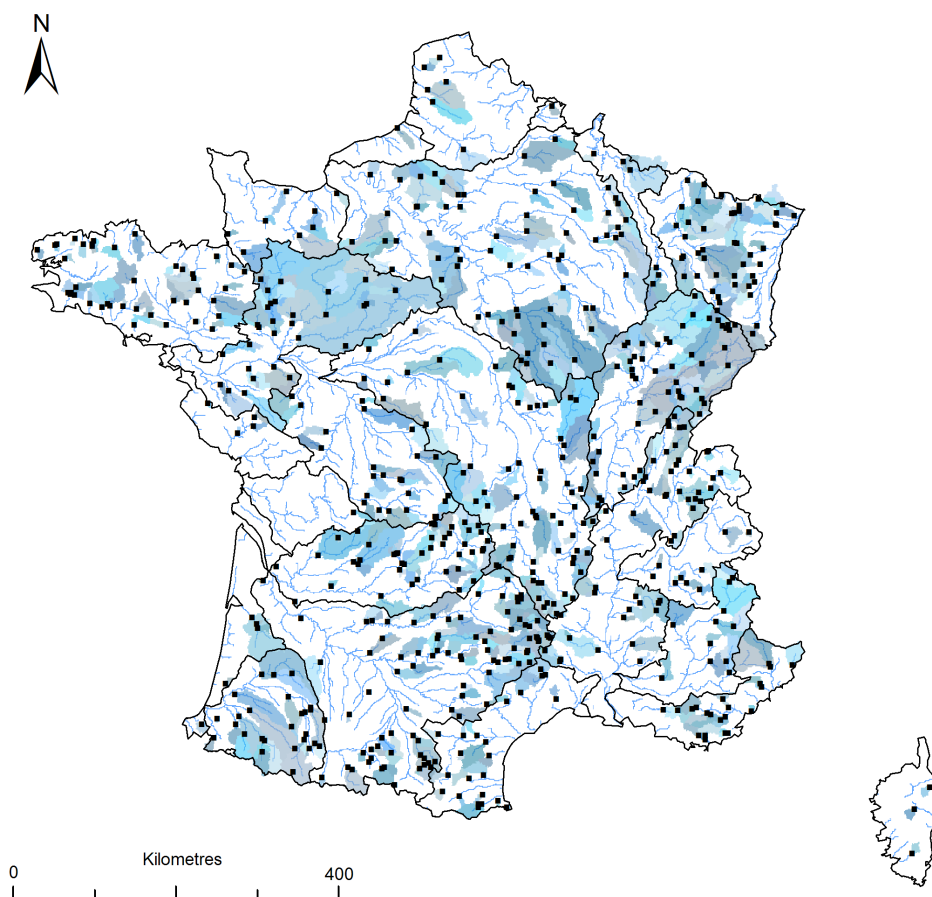


Figure I-8 : Localisation des bassins de l'échantillon de référence

On constate ici que, si la répartition spatiale des stations s'avère relativement homogène sur le territoire, de vastes portions de celui-ci ne sont pas couvertes par les bassins de l'un ou l'autre des deux échantillons. On signalera en particulier la faible représentativité de nos jeux de données dans les bassins de la Charente et de la Sèvre Niortaise mais également vis-à-vis des cours d'eau frontaliers du Nord, de certains cours d'eau méditerranéens et plus largement dans tous les grands bassins ayant fait l'objet d'aménagements hydrauliques importants (partie aval du bassin de la Dordogne et de la Garonne ; bassins de l'Isère, du Rhône et de la Durance ; bassins de la Loire, de l'Allier et de la Creuse ; bassins de la Seine et de la Marne..., cf. Figure I-5). On remarque en revanche que le jeu de données de chroniques courtes permet de combler certaines des lacunes laissées par l'échantillon de référence, notamment dans le bassin de la Saône aval, le bassin de la Moselle, les bassins côtiers normands, en Corse et plus généralement vis-à-vis des cours d'eau situés en tête de bassin. Ainsi la densité de station s'en trouve nettement améliorée (la densité totale est presque trois fois supérieure à celle de l'échantillon de référence), en revanche le fort recouvrement entre les bassins des deux échantillons ne permet pas d'accroître dans la même mesure la proportion de territoire couverte par ceux-ci (de 35 à 55 % de territoire couvert).

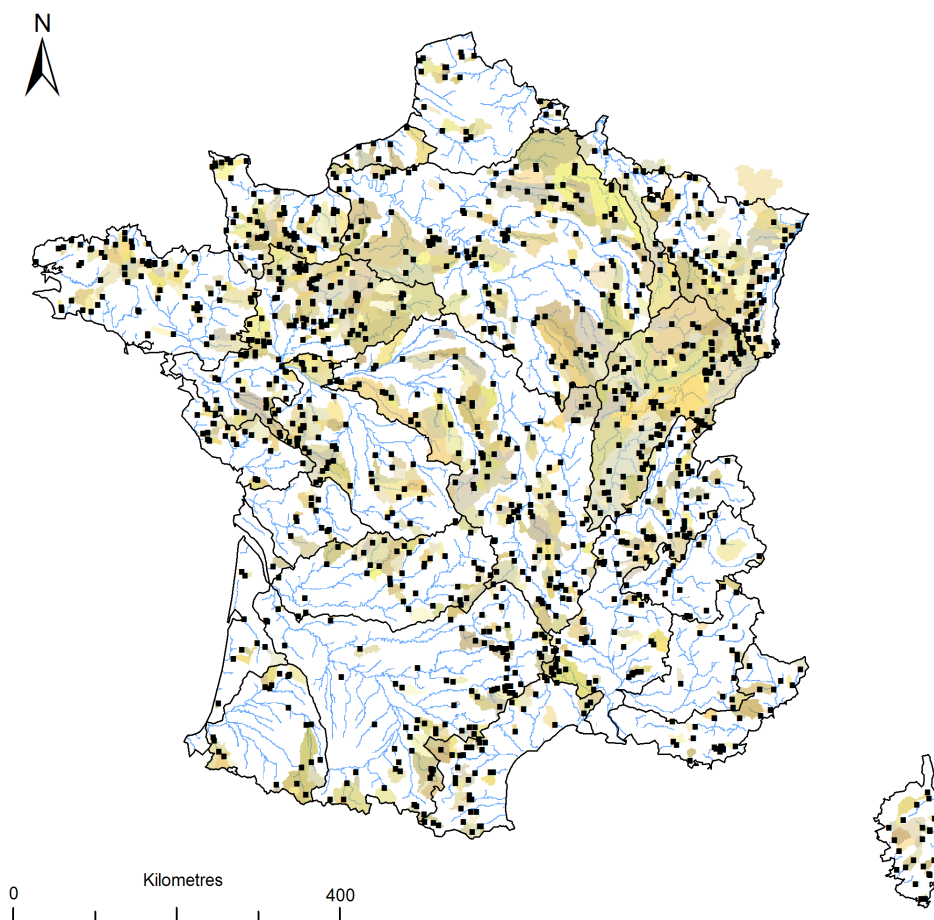


Figure I-9 : Localisation des bassins de l'échantillon de chroniques courtes

	Densité spatiale	Couverture du territoire (hors bassins emboîtés)
Echantillon de référence	1 station pour 865 km ²	35 %
Echantillon de chroniques courtes	1 station pour 435 km ²	37.5 %
Total	1 station pour 289 km ²	55 %

Tableau I-1 : Densité spatiale et couverture du territoire (hors bassins emboîtés) de l'échantillon de référence et de l'échantillon de chroniques courtes

Concernant les surfaces drainées, la Figure I-10 montre en premier lieu que la gamme de surface comprise entre 50 et 1000 km² est la mieux représentée dans l'échantillon de référence (à gauche) tandis que l'échantillon de chroniques courtes (à droite) rassemble globalement des bassins de plus petite taille (entre 20 et 500 km²). La comparaison avec la distribution des surfaces drainées à l'échelle nationale indique en revanche une assez faible représentativité vis-à-vis des grands et très grands bassins ($S > 5000$ km²) qui s'avèrent encore une fois être les bassins les plus fortement anthropisés. On constate également une représentativité relativement médiocre de notre échantillon de référence vis-à-vis des petits ($S < 20$ km²) et très petits bassins ($S < 5$ km²) dont la fréquence est par nature la plus importante le long du réseau hydrographique. Contrairement aux grands bassins, cette mauvaise représentativité ne peut être imputée à la sélection réalisée mais est avant tout inféodée à la stratégie de positionnement des stations hydrométriques (les enjeux de suivi des débits sur les très petits bassins étant généralement considérés comme marginaux).

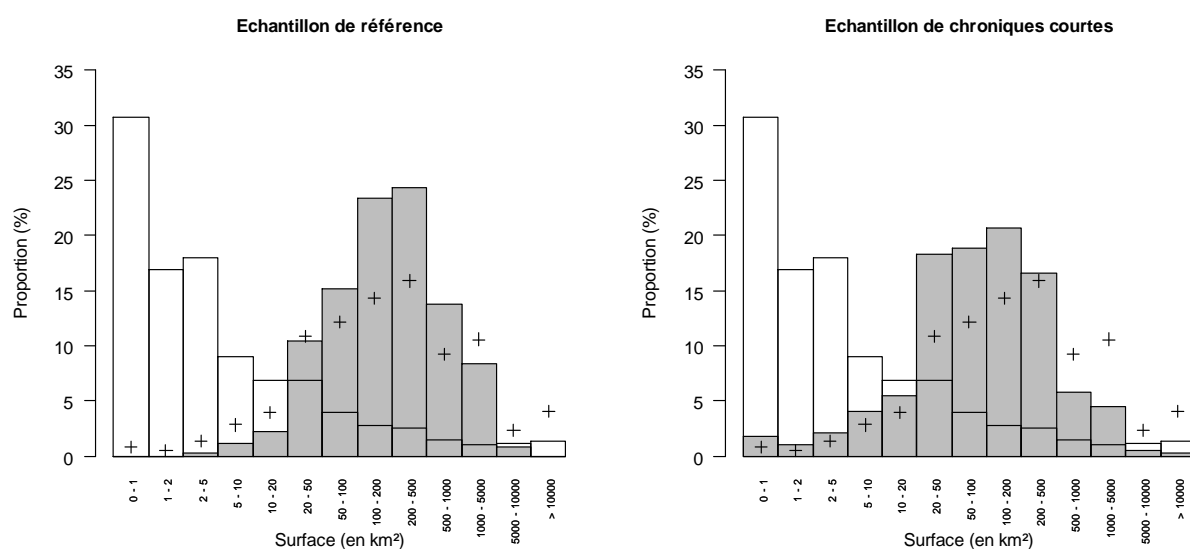


Figure I-10 : Comparaison des proportions de surfaces drainées à l'échelle nationale (en blanc), par l'ensemble des stations recensées dans la banque HYDRO (croix) et par les stations de chacun des deux échantillons (en gris)

Pour achever cette analyse préliminaire de nos jeux de données, il nous a paru pertinent d'examiner ici la représentativité des échantillons de stations hydrométriques vis-à-vis des régimes hydrologiques. Il s'agit ainsi de s'assurer que la répartition spatiale des stations permet bien de refléter la diversité des contextes hydro-climatiques rencontrés à l'échelle nationale. Pour ce faire il a été choisi d'exploiter la cartographie des régimes hydrologiques mensuels proposée par Sauquet *et al.* (2008) à l'échelle nationale (bien qu'elle soit issue d'une procédure d'estimation et s'accompagne d'un certain degré d'incertitude) et dont les différentes classes sont rappelées sur la Figure I-11.

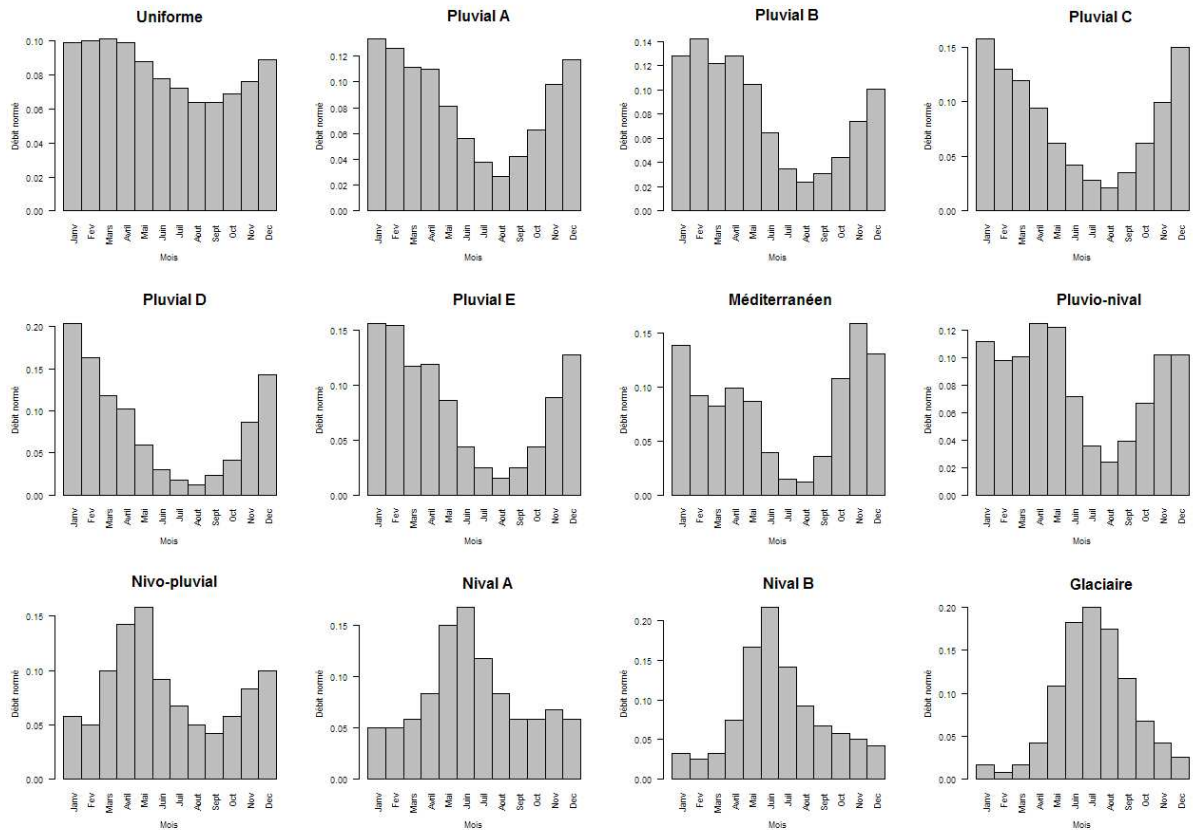


Figure I-11 : Evolution des débits moyens mensuels (normés) pour les 12 classes de régimes hydrologiques définies par Sauquet *et al.* (2008)

La Figure I-12 permet de comparer la proportion de chaque type de régime existant sur le plan national et au sein de chacun des deux échantillons de station sélectionnés précédemment. Cette comparaison montre que nos jeux de données satisfont relativement bien nos exigences en terme de représentativité « comportementale » en restituant assez correctement la diversité des régimes rencontrés en France à l'exception peut-être du régime uniforme (régime de nappe) et du régime pluvial E. Ainsi nos échantillons, et en particulier l'échantillon de référence qui sera utilisé pour comparer les différentes approches de prédétermination du QMNA5 et quantifier leurs incertitudes respectives, peuvent être considérés comme relativement appropriés pour mener à bien nos travaux de régionalisation. Leur principal inconvénient se révèle probablement être la faible représentativité vis-à-vis des très grands et très petits bassins pour lesquels les estimations fournies devront être prises avec précaution.

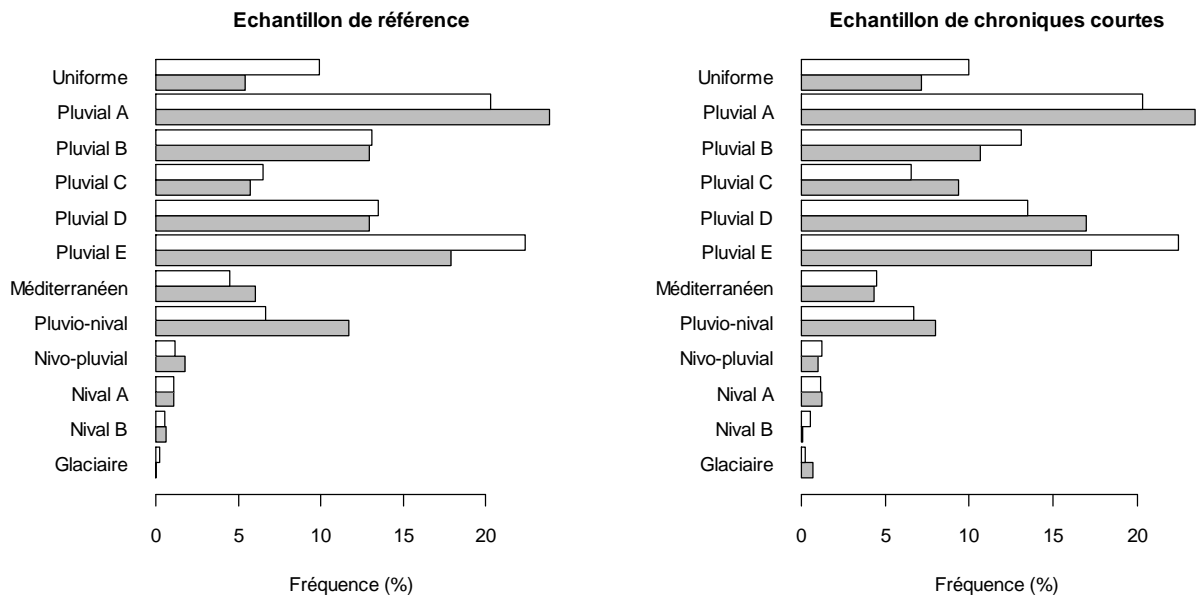


Figure I-12 : Proportion de chaque type de régime hydrologique mensuel représenté sur le plan national (en blanc) et pour les stations de chacun des deux échantillons (en gris)

I.1.4 Cas particulier des données de jaugeages volants

En complément des chroniques de débits issues de mesures en continu, il était question de réunir des données de débits issues de campagnes de jaugeages ponctuelles dans le temps (ou jaugeages volants), l'avantage étant que de telles campagnes, bien que fournissant une information très fragmentaire, couvrent généralement de nombreux bassins non instrumentés et permettent d'accroître sensiblement la densité spatiale des données à caractère hydrologique. A ce jour, seules deux bases de données de jaugeage ont été recueillies auprès de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (secteur SN) et de la DREAL Rhône-Alpes (secteur RA). Celles-ci ont permis de mieux connaître les pratiques de jaugeages dans ces deux régions. Ainsi, pour chaque site jaugé (1446 sites dans le secteur SN et 1189 sites dans le secteur RA) ont été déterminés le nombre total de mesures effectuées, la durée de la période de suivi en année (les années sans jaugeage(s) n'ont pas été comptabilisées de manière à disposer d'un indicateur de la durée effective de suivi) et la fréquence annuelle moyenne des jaugeages sur la période de suivi. Ces informations sont résumées sur la Figure I-13 sous la forme de distributions cumulées.

Dans le secteur SN on constate que les situations rencontrées d'un point à l'autre sont très diverses, tant en termes de nombre de mesures réalisées qu'en termes de durées. Certains points de suivi présentent en effet un nombre élevé de jaugeages (> 100 voir proche de 500) tandis que d'autres ne disposent que d'une unique mesure. La majorité des campagnes (75% de l'échantillon) comptent moins de 30 mesures pour une durée de suivi généralement inférieure à 10 années. Parallèlement la fréquence moyenne de jaugeage reste souvent inférieure à 4 (pour environ 80 % des sites), cependant le nombre de jaugeages réalisés s'avère assez variable d'une année sur l'autre et peut dépasser 20 mesures au cours d'une même année.

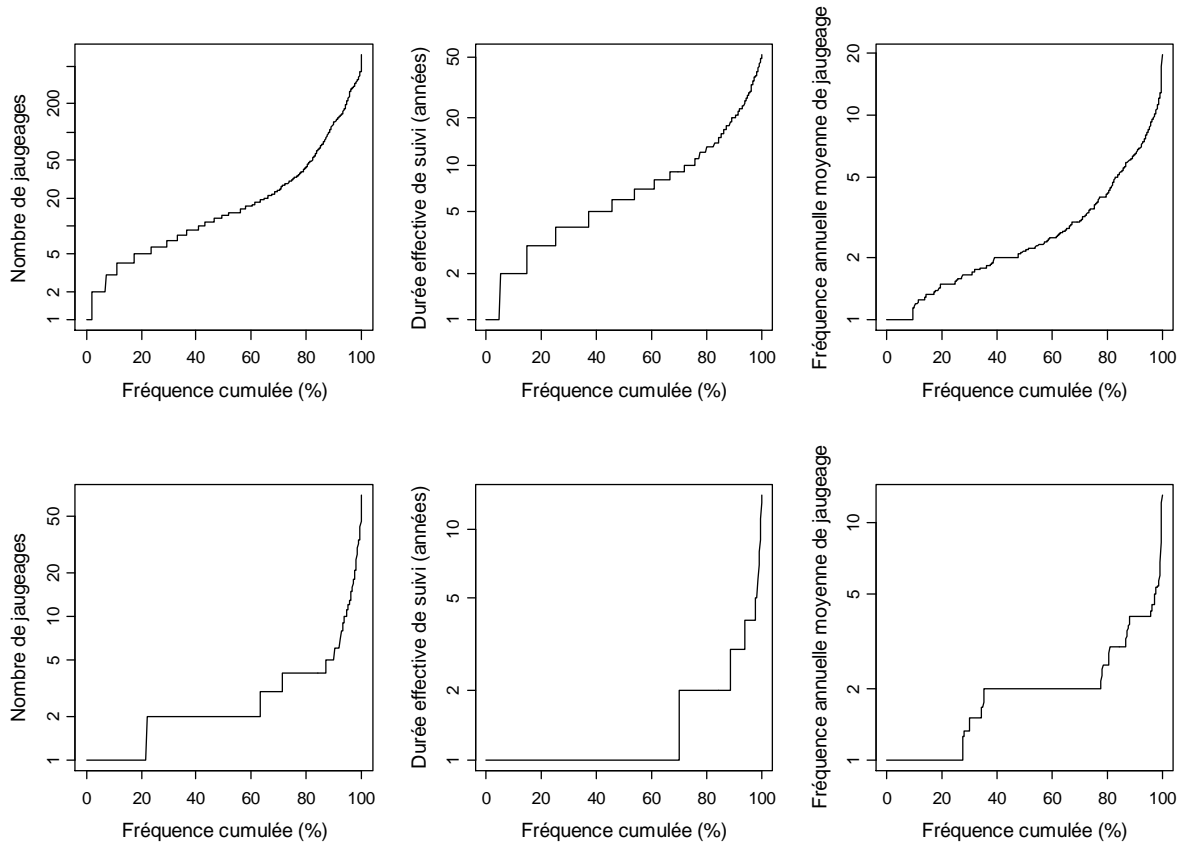


Figure I-13 : Caractéristiques des jaugeages réalisés sur le secteur Seine-Normandie (en haut) et le secteur Rhône-Alpes (en bas)

Dans le secteur RA, la grande majorité des campagnes de suivi sont de courte durée (≤ 1 an) avec relativement peu de mesures (moins de 4 mesures pour 90 % des sites), il en résulte une fréquence moyenne de jaugeage assez faible (en général inférieure à 2 mesures par année). Ce constat révèle en réalité une volonté d'assurer une bonne couverture spatiale des sites suivis par jaugeage au détriment d'un suivi dans le temps permettant de mieux connaître la variabilité temporelle des débits. De nouvelles campagnes de jaugeages sont toutefois mises en œuvre actuellement dans ce secteur suite notamment aux besoins de quantification de la ressource disponible dans le cadre des études « volumes prélevables » initiées par l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse.

Enfin dans les deux cas la répartition des jaugeages dans l'année s'avère très variable. Certains points ont par exemple fait l'objet d'un suivi très régulier avec la réalisation d'au moins une mesure chaque mois durant une même année, d'autres, moins fréquents, montrent la volonté de réaliser le suivi sur une saison particulière (notamment au cours de la saison de basses eaux).

I.2 Données descriptives des bassins

Si la couverture du territoire par les stations de l'échantillon de référence (et secondairement l'échantillon de chronique courtes) s'avère nettement insuffisante pour répondre à l'ensemble des besoins de gestion, il est néanmoins possible de recueillir un certain nombre d'informations auxiliaires pour décrire les caractéristiques des bassins versants (notamment dans le cas des bassins non jaugés) en termes de climat, de morphologie, de géologie ou encore d'occupation des sols. Celles-ci pourront alors être valorisées dans le cadre des approches de régionalisation (*cf.* Chapitre V et VI).

I.2.1 Processus hydro-climatiques à l'origine du phénomène d'étiage

Le choix de variables descriptives des bassins susceptibles de posséder un intérêt vis-à-vis de la caractérisation des étiages, notamment dans une perspective de régionalisation, requiert bien entendu une certaine compréhension des mécanismes à l'origine de ce phénomène.

Smakhtin (2001) introduit par exemple le fonctionnement d'un bassin versant, de manière conceptuelle, comme étant la résultante des interactions « d'une série de réservoirs possédant chacun leurs propres caractéristiques en termes de recharge, de stockage et de vidange ». La recharge de l'ensemble du système est assurée par les précipitations et dépend donc fortement du climat tandis que les termes de stockage et de vidange se réfèrent à des mécanismes plus complexes en lien avec les propriétés topographiques, morphologiques, géologiques ou encore pédologiques du bassin (Figure I-14). Partant de cette interprétation, il apparaît qu'en période d'étiage le premier facteur de diminution du débit est naturellement imputable à l'absence du terme de recharge, c'est-à-dire au manque de précipitations (ceci inclut également l'absence d'écoulement lorsque les précipitations se produisent sous forme de neige ou de glace qui restent stockées sur le bassin)¹. Le débit résultant ne provient alors que de la vidange progressive des différents réservoirs, lorsque ceux-ci existent, et de l'état des réserves disponibles sur le bassin versant. Ce débit est généralement désigné sous le terme de débit de base.

Dans la majorité des cas le débit de base est assuré par la vidange des réservoirs souterrains (aquifères) ou de sub-surface. La géologie et la couverture pédologique du bassin constituent donc deux facteurs importants dans les mécanismes d'étiage et de nombreux travaux montrent l'existence de relations entre le débit d'un cours d'eau durant la période d'étiage et le type de roche et/ou de sols couvrant le bassin (*e.g.* Armbruster (1976), Smith (1981), Musiak *et al.* (1984), Bingham (1986), Aucott *et al.* (1987), Roger et Armbruster (1990)). Les autres facteurs permettant d'entretenir le débit durant les périodes sans précipitation reposent sur l'existence de stocks neigeux et/ou glaciaires, de lacs, de zones humides dont la vidange progressive limite généralement la sensibilité du cours d'eau à la sécheresse (*e.g.* Gerasimenko (1972), Gustard *et al.* (1989), Sakovitch (1990)).

¹ On voit clairement se dégager ici la notion de saisonnalité, avec d'une part les étiages estivaux liés au déficit pluviométrique et d'autre part les étiages hivernaux imputables au stockage des précipitations solides sur le bassin.

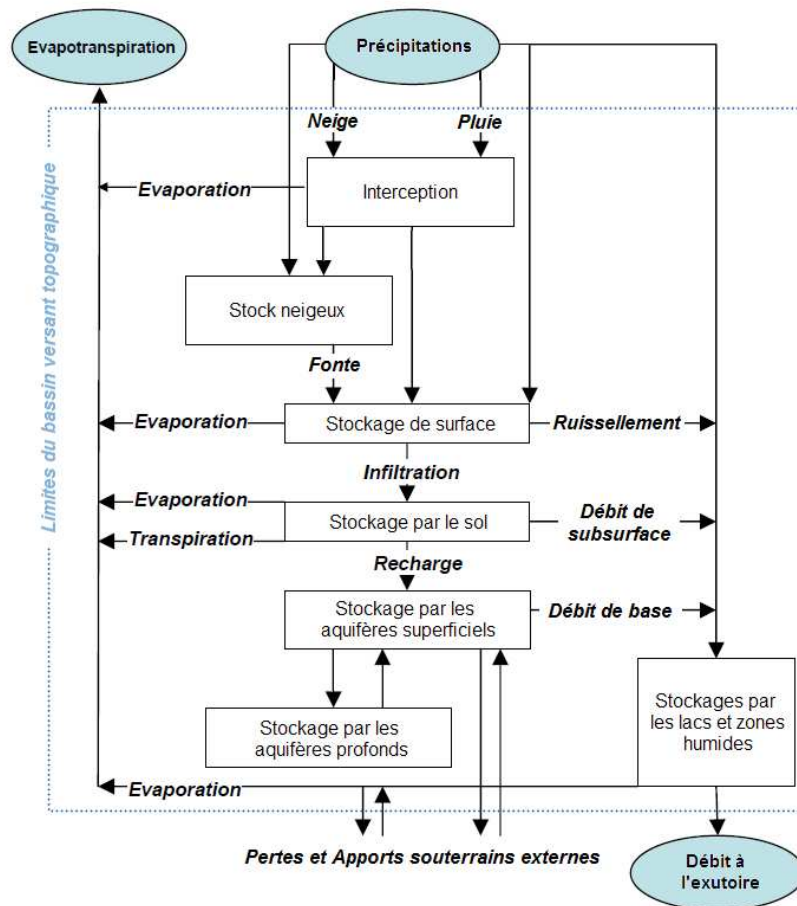


Figure I-14 : Schéma du cycle de l'eau sur un bassin versant représentant les termes d'entrée et sortie, les différents réservoirs et échanges d'eau. Figure modifiée d'après WMO (2008)

Parallèlement aux mécanismes d'apport, un certain nombre de pertes peuvent intervenir et impacter considérablement l'intensité des épisodes d'étiage. Il s'agit en premier lieu des prélèvements par interception et par évapotranspiration depuis les couches superficielles du sol, pilotés par les conditions de température, de vent, de rayonnement et le type de couvert végétal existant sur le bassin. En milieu perméable un second type de perte se produit lorsque la baisse du niveau des nappes est suffisante pour induire un drainage du cours d'eau. Le rôle des propriétés géologiques et pédologiques du bassin dans les processus de mise à l'étiage apparaît ainsi comme relativement complexe : un cours d'eau peut à la fois bénéficier d'apports et se trouver affecté par des pertes selon la zone et la période considérée (il s'agit typiquement du fonctionnement des cours d'eau en milieu karstique). D'autre part on remarquera que si la vidange des réservoirs souterrains permet d'assurer un débit en l'absence de précipitations, la recharge de ces mêmes réservoirs lors d'un événement pluvieux sera également susceptible de retarder le transfert d'une partie plus ou moins importante des précipitations vers les cours d'eau et par conséquent de prolonger l'épisode d'étiage (WMO (2008)).

I.2.2 Variables retenues, source des données et modalité d'extraction

Le choix des variables employées pour résumer les processus décrits précédemment peut se révéler particulièrement vaste. A ce sujet, on trouve dans la littérature un grand nombre de descripteurs différents et il serait laborieux d'en faire ici un inventaire exhaustif, on citera néanmoins les grandes catégories suivantes (Tableau I-2) :

Catégorie de descripteurs	Exemples de descripteurs
Morphologie/Topographie	Localisation, surface, altitude moyenne, pente, longueur du talweg principal, forme du bassin...
Climat	Précipitations, température, évapotranspiration...
Géologie/pédologie	Type de roche/sol, épaisseur de sol, perméabilité, porosité, capacité d'infiltration du sous-sol...
Occupation des sols	Proportion du bassin couverte par les lacs, les glaciers, la forêt, les zones agricoles ou urbaines...

Tableau I-2 : Grandes catégories de descripteurs du bassin versant et exemple de descripteurs associés

La fréquence de tel ou tel descripteur résulte essentiellement de la disponibilité des données sur le secteur étudié mais aussi de la plus ou moins grande complexité du traitement visant à extraire ces données pour chaque bassin. Ainsi les variables les plus facilement accessibles (surface ou altitude moyenne du bassin, précipitations annuelles) sont généralement les plus répandues.

En ce qui nous concerne, l'objectif était avant tout de disposer de descripteurs pouvant être extraits en tout point du territoire national et, dans le cas des descripteurs climatiques, couvrant la période de référence 1970-2005. Ces contraintes ont orienté nos choix vers les sources de données suivantes :

- un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution kilométrique (données de l'U.S. Geological Survey modifiées par Sauquet *et al.* (2000)) pour les données de morphologie ;
- l'archive SAFRAN (Quintana-Seguí *et al.* (2008)) mise à disposition par MétéoFrance pour les données à caractère climatique ;
- la base de données Corine Land Cover 1990 (accessible via Internet¹) pour les données d'occupation des sols ;
- la ré-interprétation lithologique simplifiée des cartes et notices géologiques du BRGM élaborée par Wasson *et al.* (2001) pour les données se rapportant à la géologie.

¹ http://www.stats.environment.developpement-durable.gouv.fr/clc/CORINE_Land_Cover_-_Condition_Utilisation.htm . Une ré-interprétation des catégories d'occupation des sols initialement proposées dans la nomenclature officielle a été réalisée de manière à ramener le nombre de classes de 44 à 6 (Annexe IV). On signalera par ailleurs que cette base de données a fait l'objet de mises à jour en 2000 et 2006, cependant la version de 1990 reste ici la plus pertinente compte tenu de l'étendue de la période de référence retenue pour ces travaux.

Une seconde préoccupation était l'extraction de variable de bassins, c'est-à-dire l'extraction de variables représentatives de l'intégration des différents processus sur l'ensemble du bassin versant et non de valeurs ponctuelles prises à l'exutoire de celui-ci. Pour ce faire il est évidemment nécessaire de disposer d'un outil permettant la description des dépendances amont/aval qui structurent le réseau hydrographique et l'identification des bassins versants. Cette étape a été réalisée à l'aide du logiciel Hydrodem¹, qui sur la base d'un traitement du MNT, a permis d'identifier les contours des bassins versants associés à chaque point d'un réseau hydrographique lui-même reconstitué par l'intermédiaire d'un plan de drainage conçu pour décrire la direction d'écoulement en chaque maille dans un plan horizontal.

La bonne reconstitution du réseau hydrographique par le plan de drainage a fait l'objet d'une vérification sur un jeu de 2728 sites² incluant l'ensemble des stations de notre échantillon de référence. Le critère retenu pour cette validation, inspiré des travaux de Sauquet *et al.* (2006), a été défini tel que l'écart entre la surface reconstituée (notée S_{optim}) et la surface officielle fournie par la Banque HYDRO (notée S_{ref}) doit être inférieur à la surface d'un disque équivalent de rayon r multiplié par la résolution du plan de drainage ($a = 1 \text{ km}^2$) :

$$\left| S_{ref} - S_{optim} \right| \leq a \cdot 2\pi r \quad \text{où} \quad r = \sqrt{\frac{S_{ref}}{\pi}} \quad (I.1)$$

En cas de non-respect de ce critère, il a été procédé à une vérification des coordonnées géographiques fournies par la banque HYDRO permettant ainsi de replacer certaines stations mal positionnées (les corrections des coordonnées géographiques ont porté sur 74 sites dont 31 ont été repositionnés à plus de 1 km de la position annoncée pour la Banque HYDRO). Pour les autres sites, le plan de drainage a pu faire l'objet de corrections manuelles pour ajuster le réseau hydrographique reconstitué au réseau du référentiel CARTHAGE (CARTographie Thématique des Agences de l'Eau mise à disposition sur le site Internet du Service d'Administration National des Données et Référentiels sur l'Eau³). L'ensemble des corrections réalisées a permis de ramener à 50 (initialement 98) le nombre de stations ne répondant pas au critère fixé et de diminuer de moitié l'écart médian de reconstitution des surfaces des bassins versants (de 6 km² à 3 km²).

Si, après vérification, la concordance avec le réseau de référence CARTHAGE peut être jugée satisfaisante pour les bassins de grande ou moyenne dimension, elle reste beaucoup plus incertaine pour les petits bassins en raison de la résolution du MNT utilisé mais aussi par la difficulté à restituer l'effet de la géologie sur l'existence ou non d'écoulement en surface (indépendamment du relief). Il s'agit là de la principale raison qui nous conduira par la suite à limiter nos estimations aux points du réseau drainant une surface supérieure à 50 km².

¹ Logiciel élaboré par E. Leblois dans le cadre de ses activités de recherche au sein de l'Unité de Recherche Hydrologie Hydraulique du centre Irstea de Lyon (Leblois (2012))

² Ce travail avait déjà été réalisé pour 2517 stations par Sauquet *et al.* (2006)

³ <http://www.sandre.eaufrance.fr/>

Ce travail effectué, différentes variables de bassin ont été extraites en tout point du réseau hydrographique selon les spécificités de chacune d'entre elles. Celles-ci sont résumées dans les Tableaux I-3 à I-5. On signalera en revanche que les valeurs obtenues pour certains cours d'eau frontaliers (en particulier pour le Rhin, le Rhône et le Doubs) se révèlent incorrectes. Les données utilisées ne sont en effet pas toujours disponibles sur la partie amont de ces bassins puisque située en dehors du territoire français.

Catégorie	Variable	Unité	Notation
Morphologie	Coordonnées du centre de gravité du bassin (exprimées dans le système de projection Lambert II étendu)	m	Xcg
			Ycg
	Surface du bassin (surface topographique)	km ²	S
	Indice de pente moyenne de Roche (1963) :	Sans unité	Ip
	$Ip = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sqrt{\frac{a_i - a_{i-1}}{x_i}}$ <p>Avec l la longueur du rectangle équivalent, a_i les courbes de niveau cotées entre 1 et n et x_i la distance séparant deux courbes de niveau successives</p>		
	Quantile d'altitude à 25, 50 et 75 % extraits de la courbe hypsométrique	m (NGF)	Z25
			Z50
Z75			
Indice de compacité de Gravelius obtenu en assimilant le périmètre du bassin à celui du rectangle équivalent de longueur l et de surface S :	Sans unité	Kg	
$K_G = 0.28 \cdot \frac{2l + 2\frac{l}{S}}{\sqrt{S}}$			
Densité de drainage	(km de linéaire par km ²)	DD	

Tableau I-3 : Descripteurs des bassins versants se rapportant à la morphologie

Catégorie	Variable	Unité	Notation
Climat (Sur la période 1970-2005)	Pluies moyennes interannuelles	mm	PA
	Pluies saisonnières moyennes interannuelles		Pwinter
			Pspring
			Psummer
			Pautumn
	Variabilité (écart-type) des précipitations moyennes mensuelles	VarP	
	Nombre de jours sans pluie moyen interannuel	jour	nP0
	Durée sans pluies maximale annuelle moyenne		dP0_max
	Rapport des précipitations solides sur précipitations totales (liquides + solides)	Sans unité	Snow_ratio
	Températures moyennes interannuelles	°C	TA
	Températures saisonnières moyennes interannuelles		Twinter
			Tspring
			Tsummer
Tautumn			
Variabilité (écart-type) des températures moyennes mensuelles	VarT		
Evapotranspiration potentielle moyenne sur Juillet-Août (Oudin <i>et al.</i> (2005))		ETPsummer	
Evapotranspiration réelle interannuelle calculée selon la formule de Turc (1954) en fonction des pluies moyennes interannuelles PA et températures moyennes interannuelles TA : $ETRA = \frac{PA}{\sqrt{0.9 + \frac{PA^2}{L^2}}}$ Avec $L^2 = 0.05 \cdot TA^3 + 25 \cdot TA + 300$	mm	ETRA	

Tableau I-4 : Descripteurs des bassins versants se rapportant au climat

Catégorie	Variable	Unité	Notation
Géologie	Pourcentage du bassins versants couvrant une surface imperméable	%	%imp
Occupation des sols	Pourcentage du bassin occupé par la forêt	%	%forest
	Pourcentage du bassin occupé par la prairie et/ou de la végétation basse		%grass
	Pourcentage du bassin occupé par les surface agricoles		%agro
	Pourcentage du bassin en zone urbaine		%urban
	Pourcentage du bassin sans végétation		%rock
	Pourcentage du bassin occupé par les plans d'eau et/ou marais		%water

Tableau I-5 : Descripteurs des bassins versants se rapportant à la géologie et l'occupation des sols

Le choix de ces variables reflète notre volonté d'être aussi exhaustif que possible vis-à-vis de la description des bassins versants. Toutes pourront ne pas se révéler utiles tandis que des variables plus complexes ont été négligées ou envisagées trop tardivement pour être prises en compte dans nos travaux (e.g. précipitations mensuelles minimales annuelles de période de retour 5 ans).

S'il apparaît évident que certaines des variables retenues présentent un caractère redondant (par exemple les caractéristiques de pluies et températures qui s'avèrent fortement dépendantes de l'altitude), on constate en revanche que nous ne disposons ici que d'une unique variable pour décrire les caractéristiques géologiques du bassin, or comme nous l'avons vu ce type de caractéristique semble essentiel dans l'explication des processus d'étiage (cf. section I.2.1). La densité de drainage, bien qu'elle soit considérée ici dans la catégorie des descripteurs relatifs à la morphologie des bassins, pourra permettre de remédier indirectement à cette insuffisance. En effet l'organisation du réseau hydrographique, s'il dépend avant tout de la pente et du relief, s'avère également fortement révélatrice de la nature des formations géologiques qui supportent le bassin (un bassin formé de matériaux très perméables aura en général une densité de drainage faible, à l'inverse, un bassin formé de roches imperméables mais suffisamment meubles comme des marnes ou des argiles, présentera généralement une densité de drainage élevée).

Enfin pour compléter la description des bassins versants, on signalera la possibilité de valoriser la typologie en Hydro-Eco-Régions (HER) élaborée par Wasson *et al.* (2001) pour répondre aux préconisations de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau vis-à-vis de la caractérisation des écosystèmes aquatiques.

Cette typologie, au sein de laquelle sont distingués deux niveaux emboîtés, désigne un ensemble d'entités géographiques définies comme ayant des caractéristiques communes, principalement en termes de relief, de géologie et de climat, à l'origine de similitudes dans le fonctionnement biologique des milieux aquatiques (Figure I-15). Les caractéristiques de chacune de ces régions telles que décrites par Wasson *et al.* (2001) sont reportées en Annexe V. Cette information, quoique de nature qualitative, sera donc reprise ici comme une indication susceptible d'aider à l'identification des ressemblances entre bassins en termes de contextes hydro-climatiques (elle sera traitée, comme dans le cas de l'occupation des sols, au travers de proportions de bassin occupées par telle ou telle HER).

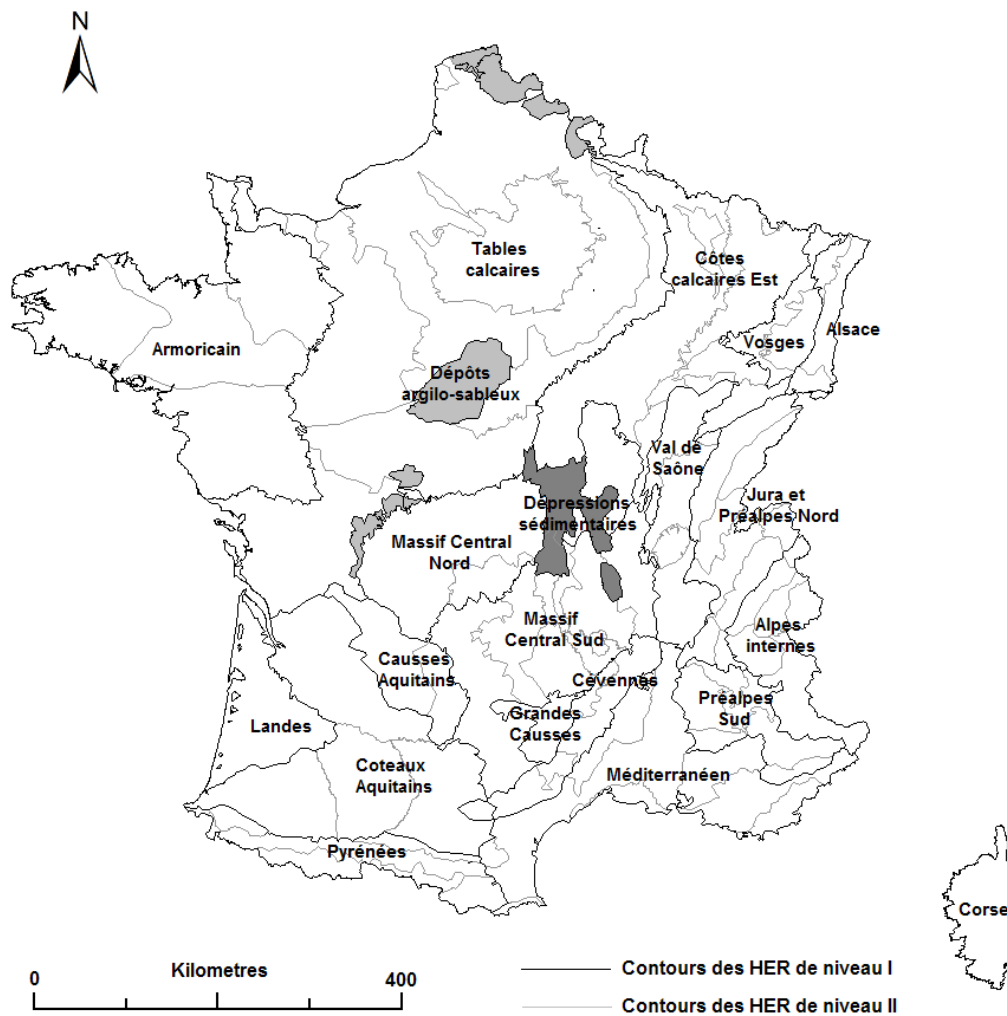


Figure I-15 : Délimitation des HER de niveau I (en noir) et II (en gris) proposée par Wasson *et al.* (2001)

I.3 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de passer en revue l'étape de critique et de sélection des données qui seront employées dans la suite de ces travaux. Il s'agissait ainsi en premier lieu de réunir des données à caractère hydrologique en vue de la constitution d'un jeu de chroniques de référence pouvant être exploité en validation croisée pour confronter les différentes méthodes de prédétermination du QMNA5 abordées dans les chapitres suivants. Pour assurer la validité de nos résultats, les chroniques sélectionnées parmi l'ensemble des données mises à disposition par la Banque HYDRO devaient évidemment répondre à certaines exigences telles que la bonne qualité des débits mesurés, l'absence de perturbations significative des écoulements par les activités humaines et une longueur d'enregistrement suffisante pour permettre la détermination de statistiques hydrologiques fiables. A l'issue de la phase de critique, il a finalement été retenu un jeu de 632 stations hydrométriques possédant au moins 26 années de chroniques (sans lacunes) au pas de temps journalier. Parallèlement, la contrainte sur la durée des chroniques a permis de dégager un second jeu de données constitué de 1257 chroniques de durée inférieure à 26 années qui seront considérées comme des sites peu jaugés dotés de chroniques courtes et exploitées en tant que tels au Chapitre III.

Malgré des exigences relativement contraignantes qui aboutissent à limiter de manière drastique la quantité de sites conservés (notamment au sein de l'échantillon de référence), l'examen des données montre que l'on parvient tout de même à préserver une représentativité relativement acceptable vis-à-vis de la diversité des régimes hydrologiques existants sur le plan national. Il apparaît en revanche que nos échantillons présentent des lacunes, parfois importantes, en termes de répartition spatiale mais surtout vis-à-vis des bassins de petites ($S < 20 \text{ km}^2$) ou de très grande dimension ($S > 5000 \text{ km}^2$).

Outre les données à caractère hydrologique, il était également question de rassembler ici un jeu de données auxiliaires permettant de décrire les caractéristiques des bassins versants en termes de climat, de morphologie, de géologie ou encore d'occupation des sols. Ces données qui constitueront la seule information disponible localement en sites non jaugés ont ainsi été extraites, après divers traitements, en tout point du réseau hydrographique. Celles-ci s'élèvent au nombre de 32 et se veulent aussi représentatives que possible des différents processus en jeu dans l'explication du phénomène d'étiage.

Suite à cette première étape, il est proposé dans le chapitre suivant d'exploiter les données recueillies dans le cadre d'une analyse préliminaire des régimes d'étiage aux stations de l'échantillon de référence. Il s'agira notamment d'y extraire des indicateurs permettant de décrire les différents aspects du régime d'étiage puis d'exploiter ceux-ci pour mieux comprendre les processus hydrologiques dominants et éventuellement permettre d'identifier des similitudes entre bassins.

Références bibliographiques

- Armbruster J.T. (1976). An infiltration index useful in estimating low-flow characteristics of drainage basins. *USGS Journal Research*, Vol. 4(5), pp. 533-538.
- Aschwanden H., Kan C. (1999). Le débit d'étiage Q347 – Etat de la question. Service hydrologique et géologique national, *Communications hydrologique* No. 27, pp. 132.
- Aucott W.R., Meadows R.S., Patterson G.G. (1987). Regional groundwater discharge to large streams in the upper coastal plain of south Carolina and parts of north Carolina and Georgia. *USGS Water Resources Investigations. Report 86-4332*, 28 pp.
- Bingham R.H. (1986). Regionalization of winter low-flow characteristics of Tennessee streams. *USGS Water-Resources Investigations. Report 86-4007*, 88 pp.
- Dyck S. (1976). *Applied Hydrology, part I. Calculation and regulation of the discharge of streams*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Gerasimenko (1972). Effects of lakes on minimum streamflow in West Siberia. *Trudy GGI (Trans. State Hydrol. Inst., Leningrad, URSS)*, Vol. 188, pp. 305–311.
- Giuntoli I., Renard B. (2010). Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages. *Rapport d'étude, Cemagref-ONEMA*.
- Gustard A., Roald L.A., Demuth S., Lumadjeng H.S., Gross R. (1989). *Flow Regimes from Experimental and Network Data (FRIEND)*, Vol. 1, *Hydrological Studies*, Institute of Hydrology, Wallingford, UK
- Hamed K., Rao A.R. (1998). A Modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated Data. *Journal of Hydrology*, Vol. 204(1-4), pp. 182-196.
- Leblois E. (2012). *Le bassin versant, système spatialement structuré et soumis au climat*. Mémoire d'HDR, Université de Grenoble.
- Musiaki K., Takahasi Y., Ando Y. (1984). Statistical analysis on effects of basin geology on river flow regime in mountainous areas of Japan. *Proc. Fourth Cong. Asian & Pacific Reg. Div. Int. Assoc. Hydraul. Res., Bangkok, APD-IAHR/Asian Institute Technology*, Vol. 2, pp. 1141-1150.
- Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andreassian V., Anctil F., Loumagen C. (2005). Which potential evapotranspiration input for lumped rainfall-runoff model ? Part 2 : Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, Vol. 303(1-4), pp. 290-306.
- Pettitt A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, Vol. 28(2), pp. 126-135.

- Plasse J., Sauquet E. (2009). Interpolation des débits de référence d'étiage. Rapport d'étude, Cemagref, 166 pp.
- Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S. (2008). Analysis of near surface atmospheric variables : Validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of applied meteorology and climatology*, Vol. 47(1), pp. 92-107.
- Roche M. (1963). (Eds) *Hydrologie de surface*. Gauthier-Villars, 429 pp.
- Rogers J.D., Armbruster J.T. (1990). Low flows and hydrologic droughts. *Surface Water Hydrology*, Geological Society of America, Boulder, CO, pp. 121-130.
- Sakovich V.M. (1990). The representation of minimum runoff series in Karelia and North-Western region. *Trans. Hydrolmeteorol. Center URSS* 308, pp. 129-136.
- Sauquet E., Gottschalk L., Leblois E. (2000). Mapping average annual runoff: a hierarchical approach applying a stochastic interpolation scheme. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 45(6), pp. 799-815.
- Sauquet E. (2006). Mapping mean annual river discharges : Geostatistical developments for incorporating river network dependencies. *Journal of Hydrology*, Vol. 301(1-2), pp. 300-314.
- Sauquet E., Gottschalk L., Krasovskaia I. (2008). Estimating mean monthly runoff at ungauged locations : an application to France. *Hydrology Research*, Vol. 39(5-6), pp. 403-423.
- Smakhtin V.Y. (2001). Low flow hydrology : a review. *Journal of hydrology*, Vol. 240(3-4), pp. 147-186
- Smith R.W. (1981). Rock type and minimum 7-day/10-year flow in Virginia streams. Virginia Water Resource Research Center, Virginia Polytechny Institute and State University, Blacksburg, Bulletin, Vol. 116, 43 pp.
- Tallaksen L.M., Van Lanen H.A.J. (2004). (Eds) *Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Developments in Water Sciences 48. Elsevier B.V., the Netherlands, 580 pp.
- Turc L., (1954). Water balance of soil: relation between precipitation, evapotranspiration and runoff. *Ann. Agron*, Vol. 5, pp. 491-595
- Wasson J.G., Chandesris A., Pella H., Souchon Y. (2001). Définition des hydroécocorégions françaises. Méthodologie de détermination des conditions de référence au sens de la Directive Cadre pour la gestion des eaux. Rapport d'étude, Irstea, 190 pp.
- WMO (2008). Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report n°50, 136 pp.

Chapitre II.

Analyse des régimes d'étiage en France sur la période 1970-2005

Au travers de ce second chapitre et préalablement à la mise en œuvre des méthodes de prédétermination du QMNA5 proprement dites, nous nous proposons d'aborder les outils permettant de décrire et caractériser les régimes d'étiage à partir des chroniques de débit disponibles aux stations de l'échantillon de référence présenté précédemment au Chapitre I. Il s'agit ainsi de disposer des éléments nécessaires à une meilleure compréhension de nos futurs résultats et permettre de replacer ceux-ci dans leur contexte hydrologique.

Cette analyse repose en premier lieu sur la définition et l'extraction de descripteurs statistiques jugés pertinents pour décrire différents aspects du régime d'étiage et incluant bien entendu le QMNA5 auquel nous nous intéresserons en priorité. Comme évoqué en introduction, la description du régime d'étiage peut être appréhendée au travers d'un certain nombre de caractéristiques différentes (sévérité, durée, saisonnalité, fréquence...) chacune étant susceptible de répondre à différentes problématiques de gestion. Ainsi, au delà du QMNA5, nous avons souhaité élargir au maximum les possibilités de description du régime d'étiage en fournissant un aperçu relativement exhaustif des variables les plus couramment rencontrées dans la littérature, en particulier dans une perspective de régionalisation. A ce sujet on pourra également se référer aux travaux de Smakhtin (2001), de WMO (2008) et surtout de Pyrcz (2004) qui fournissent un aperçu relativement exhaustif de ces variables et de leurs domaines d'application respectifs. Il sera ensuite question des éléments mis en œuvre pour résumer cette information et dégager les principaux traits caractéristiques de notre échantillon vis-à-vis des régimes d'étiage.

II.1 Outils pour la description des régimes d'étiage : inventaire des indices d'étiage et modalités d'extraction

Les descripteurs recensés ici sont dans leur ensemble des variables quantitatives obtenues à partir d'un traitement plus ou moins complexe des séries chronologiques de débits disponibles au droit des stations hydrométriques. Pour chaque catégorie de descripteurs, une réflexion a été engagée pour déterminer les modalités d'extraction les plus pertinentes, nous nous sommes en particulier limités aux techniques reproductibles dans le cas d'un grand nombre de bassins. Cette réflexion nous a également amené à proposer quelques solutions alternatives pour faciliter l'extraction de certains indicateurs.

Pour chaque catégorie de descripteur, la représentation des différents indices extraits sous forme de cartes permettra de fournir un aperçu préliminaire de l'organisation spatiale des régimes hydrologiques d'étiage. Nous tenterons à cette occasion de rapprocher ces éléments descriptifs des grandes caractéristiques hydro-climatiques régionales afin de mieux appréhender les processus en jeu sur le plan national.

II.1.1 Indices relatifs au module interannuel

Dans ses travaux de synthèse, Smakhtin (2001) évoque de manière très marginale l'emploi d'indices d'étiage s'exprimant comme un pourcentage du débit moyen interannuel (ou module interannuel noté QA) et parfois exploités à titre de seuil pour définir la séparation entre hautes eaux et basses eaux puis caractériser les étiages en termes de durée ou de déficit (Mathier *et al.* (1992), Clausen et Pearson (1995), *cf.* section II.1.4). Rappelons qu'un tel type de descripteur (10 % du module interannuel) est par ailleurs employé en France à titre de variable réglementaire pour la définition des débits réservés (*cf.* Introduction). Ainsi, s'il ne s'agit pas d'un descripteur du régime d'étiage à proprement parler, nous retiendrons tout de même ici le QA comme une variable susceptible de nous procurer une première information sur les régimes hydrologiques.

Les valeurs obtenues pour les stations de l'échantillon de référence sont reportées sur la Figure II-1 en débit spécifique (exprimés en l/s/km²) et accompagnées de quelques exemples de régimes mensuels (*i.e.* débits moyens mensuels interannuels). Cette carte permet de montrer qu'il existe d'assez forts contrastes sur le plan national avec des bassins généralement productifs (QA > 50 l/s/km²) et souvent associés à un régime nival dans les zones de relief (Alpes, Pyrénées, Jura), des bassins moyennement productifs à régime pluvial dans les zones d'altitudes modérées (Massif central, Vosges) ou en climat océanique marqué (Finistère) et des bassins peu productifs (QA < 10 l/s/km²) principalement situés dans le Bassin Parisien (régime uniforme), le Centre et plus secondairement en Vendée, sur le pourtour méditerranéen et dans le bassin de la Garonne.

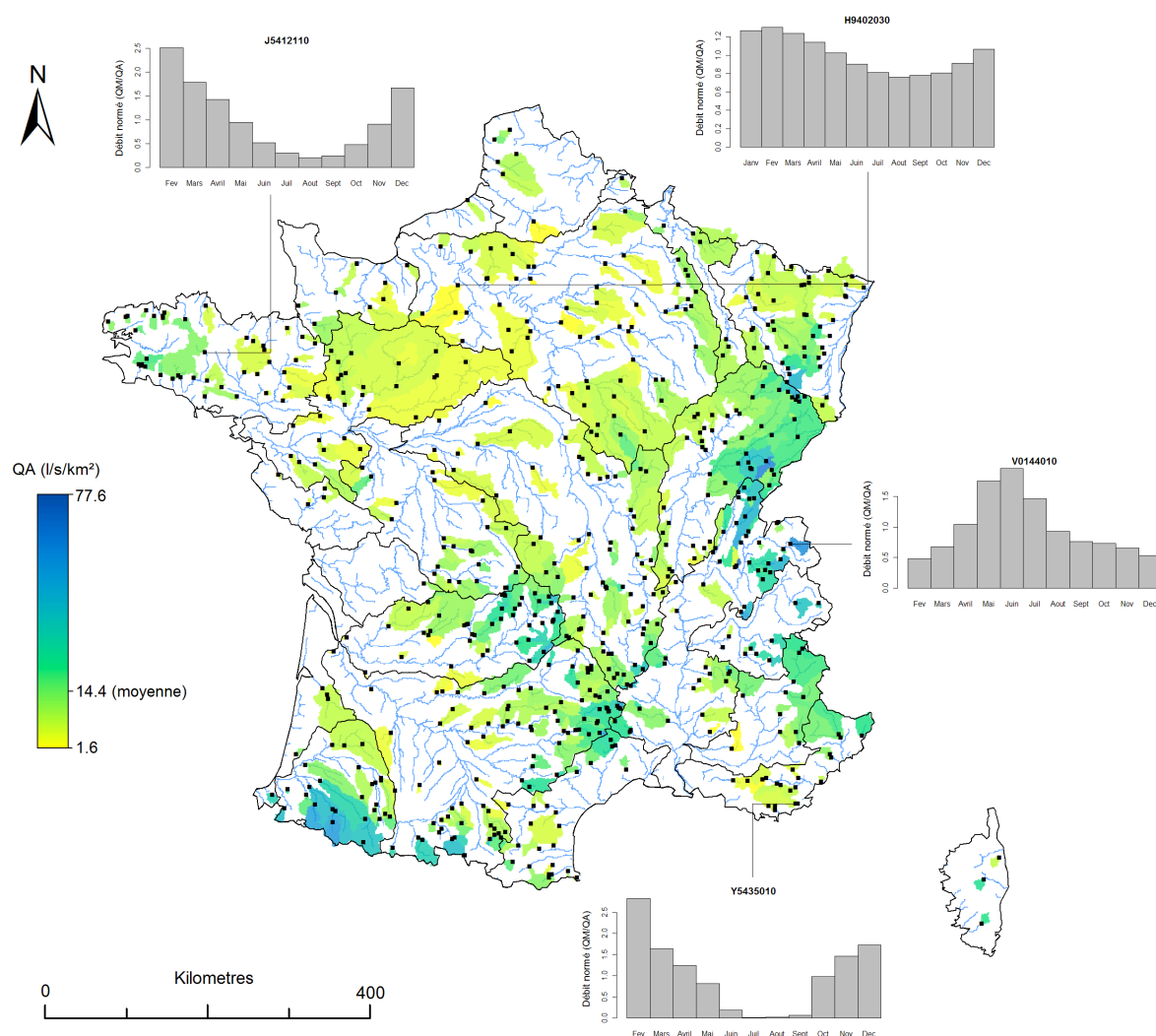


Figure II-1 : Cartographie des modules interannuels spécifiques (en l/s/km²) aux stations de l'échantillon de référence et exemples de régime hydrologique associés

II.1.2 Indices de débits minimums annuels

Le débit moyen minimal observé annuellement sur une certaine durée d constitue l'un des indicateurs les plus communément employés pour la caractérisation de la sévérité des étiages. Il est noté AMd dans le pays anglo-saxons et $VCNd$ en France lorsqu'il se réfère au débit moyen minimal annuel sur d jours consécutifs¹. Dans la littérature, la durée d prend usuellement des valeurs égales à 1, 7, 10 ou 30 jours, néanmoins des durées plus longues peuvent être parfois utilisées pour caractériser la sévérité de la période de basses eaux sur le long terme (de $d = 90$ jusqu'à $d = 284$ jours) (e.g. McMahon et Meine (1986), Midgley *et al.* (1994)).

¹ Ainsi dans sa forme la plus simple, lorsque $d = 1$, il s'agit du débit moyen journalier minimal annuel. Lorsque $d > 1$, le débit moyen est calculé au jour j sur une fenêtre glissante intégrant par convention les débits observés aux jours $j-d/2$ à $j+d/2$.

Le QMNA, ou débit moyen mensuel minimum annuel, est évidemment à placer dans cette catégorie de descripteurs et est privilégié en France au détriment du VCN30. Si ces deux indices s'avèrent relativement voisins, l'usage des mois calendaires dans le cas du QMNA présente peut-être l'inconvénient d'être moins représentatif d'un comportement d'étiage à proprement parler puisqu'il peut intégrer des épisodes de remontée de débit n'ayant plus de rapport avec la dynamique de basses eaux (Figure II-2).

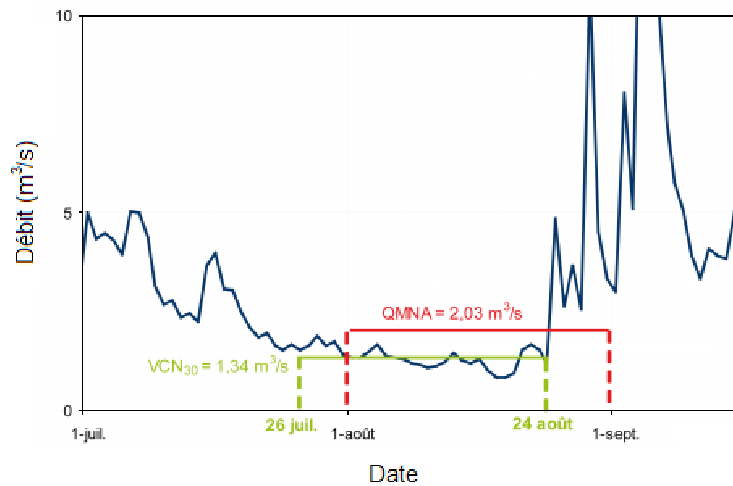


Figure II-2 : Illustration de l'inconvénient posé par l'emploi des mois calendaires dans la détermination du QMNA. Figure modifiée d'après Lang Delus (2011).

Dans les différents travaux de régionalisation, les séries de minima annuels constitués à partir des chroniques de débits moyens journaliers sont parfois résumées sous la forme d'une moyenne interannuelle notée $MAMd$ (ou $VCNd$) (Shreiber et Demuth (1997)). Cependant ces séries s'avèrent le plus souvent intégrées dans une procédure d'analyse fréquentielle visant à permettre d'estimer un quantile de période de retour donné à partir d'une loi statistique ajustée sur les observations. Certains de ces quantiles ($VCN7(T=2,10,20)$, $VCN30(T=2,10)$, $VCN90(T=10)$) ont, par exemple, été particulièrement étudiés aux Etats-Unis dans une perspective d'estimation en sites peu ou pas jaugés (*e.g.* Thomas et Benson (1970), Hayes (1991), Vogel et Kroll (1992), Dingman et Lawlor (1995), Stuckey (2006)). Le QMNA5 (ou débit moyen mensuel minimum annuel de période de retour 5 ans) qui nous intéresse dans le cadre de ce travail, s'inscrit bien entendu dans ce type d'approche. Il convient par conséquent de détailler ici les modalités d'ajustement employées pour déterminer ce quantile.

La détermination d'une loi de distribution théorique appropriée pour la caractérisation fréquentielle des variables d'étiage et le mode d'ajustement de celle-ci ont fait l'objet de très nombreux travaux dont les diverses conclusions montrent la difficulté à définir cette loi de manière universelle. Gustard *et al.* (1989) remarquent toutefois que le choix d'une distribution adéquate n'a qu'une importance relativement limitée eu égard au fait que les périodes de retour généralement requises dans le cadre opérationnel s'avèrent relativement basses (inférieures à 50 années) par rapport à la longueur des chroniques disponibles.

Dans le cas des variables de type VCNd ou QMNA (*i.e.* variables à échantillonnage annuel ou AMS pour « Annual Minimum Series ») les distributions de valeurs observées, bornées par zéro et caractérisées par une dissymétrie assez marquée, s'avèrent relativement bien décrites par les lois théoriques de Weibull (Gustard *et al.* (1989), Zucchini et Adamson (1984), Nathan et McMahon (1990c), Gustard *et al.* (1992)), Log-Pearson Type III (Matalas (1963), Eratakulan (1970), Stedinger et Thomas (1985)), Log-Normale (Vogel et Kroll (1991), Kaabi (1994), Tate *et al.* (2000), Chen *et al.* (2006)) ou encore Generalized logistic (Modarres (2008), Shi *et al.* (2010)). Afin de préciser le type de loi théorique le plus approprié à la description fréquentielle des étiages, on signalera également l'approche relativement innovante proposée par Gottschalk *et al.* (1997) et consistant à employer une distribution dérivée de celle des durées maximales annuelles sans précipitations (loi de Gumbel) couplée à une description de la dynamique d'écoulement en période de récession (équation de vidange de type loi de Maillet). Les auteurs identifient ainsi une distribution dont la formulation est analogue à une loi de Weibull à deux paramètres.

Au delà de la problématique de sélection d'une loi théorique appropriée, l'une des principales spécificités des échantillons de minima annuels réside dans la présence relativement fréquente de valeurs nulles (Nathan et McMahon (1990c), Gordon *et al.* (1992)). Un ajustement réalisé directement sur un tel échantillon sera susceptible de fournir des valeurs négatives en extrapolation. La solution consiste alors à ajuster une loi de distribution conditionnelle (Haan (1977), Stedinger *et al.* (1993), Bulu (1997)) en déterminant indépendamment la probabilité propre aux valeurs nulles (P_0) et la distribution associée aux valeurs non nulles $G(x)$. On en déduit pour toutes les valeurs non nulles : $F(x) = P_0 + (1 - P_0) \cdot G(x)$. On remarquera enfin que la sélection systématique d'un événement annuel pourra ici aboutir à introduire dans l'échantillon des valeurs non extrêmes (années humides) susceptibles de biaiser la distribution (Institute of Hydrology (1980), Nathan et McMahon (1990c)) tandis que l'hypothèse d'indépendance pourra ne pas être respectée dans le cas de systèmes à forte inertie (*e.g.* régime de nappe, Tallaksen et Van Lanen (2004)).

Dans cette application nous nous sommes proposés, en tenant compte des particularités évoquées précédemment, de déterminer le type de loi théorique le plus approprié pour la description des distributions de QMNA mais aussi de VCN1 et VCN10. Pour ce faire, il a été privilégié des lois ne comprenant que deux paramètres, jugées plus robustes pour des échantillons comprenant un effectif relativement modeste : la loi Log-Normale, la loi de Weibull et la loi Gamma (cas particulier de la loi Pearson Type III). Chacune de ces lois a fait l'objet d'un ajustement par maximum de vraisemblance sur les séries de valeurs annuelles extraites de chaque chroniques de l'échantillon de référence. La détermination de la loi la plus adaptée pour la description des distributions empiriques s'est alors appuyée sur l'analyse de deux tests d'adéquations (test du χ^2 et test de Kolmogorov-Smirnov) en déterminant le nombre de rejets au niveau de risque de première espèce $\alpha = 0.1$ et en examinant la distribution des p-values (on considérera qu'une p-value plus forte témoigne d'un meilleur ajustement).

La Figure II-3 illustre le type de résultats obtenus après ajustement sur les séries de QMNA (des résultats analogues sont obtenus pour les séries de VCN1 et VCN10 et ne sont par conséquent pas détaillés ici). Ils permettent de constater que si la loi de Weibull s'avère nettement moins appropriée que les deux autres, les lois Log-Normale et Gamma se trouvent être relativement équivalentes. Néanmoins la loi Gamma semble occasionner moins de rejets vis-à-vis d'un risque de première espèce au niveau $\alpha = 0.1$, c'est pourquoi celle-ci a été finalement retenue comme étant le meilleur compromis pour l'ensemble des sites de l'échantillon de référence.

L'examen des stations présentant un rejet de la part des deux tests montre qu'il s'agit pour partie de bassins particuliers comme la station O1432930 (l'Hers à Bélesta [source de Fontestorbes]) soumise à une influence karstique significative. Malgré la faible confiance dans les valeurs de QMNA5 obtenues, les stations concernées ont été conservées dans l'échantillon de référence en faisant toutefois l'objet d'une attention particulière, notamment vis-à-vis des résultats obtenus lors de la validation croisée.

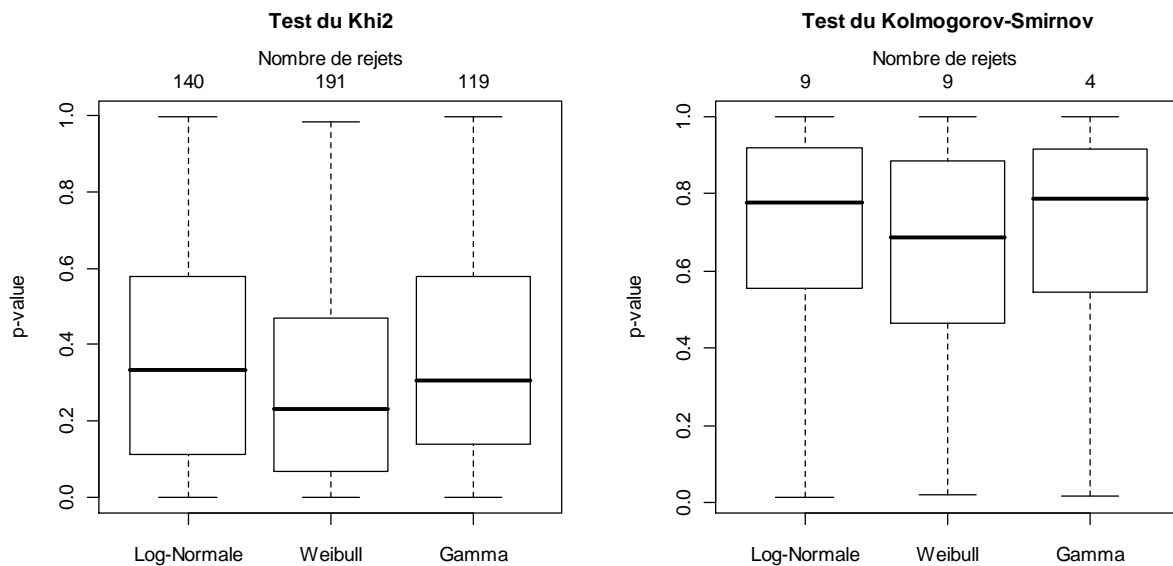


Figure II-3 : p-value et nombre de rejets au niveau de risque de première espèce $\alpha = 0.1$ des tests d'adéquation du Khi2 et de Kolmogorov-Smirnov appliqués aux ajustements par maximum de vraisemblance des lois Log-Normale, Weibull et Gamma sur les séries de QMNA des stations de l'échantillon de référence

Les valeurs de QMNA5 extraites des séries chronologiques de l'échantillon de stations de référence, lorsqu'elles sont exprimées sous la forme de débits spécifiques, varient entre 0 et 14.7 l/s/km² autour d'une valeur moyenne s'élevant à 2.3 l/s/km² (Figure II-4). Les valeurs les plus faibles, incluant 22 bassins avec un QMNA5 égal à 0 l/s/km², sont principalement obtenues pour les bassins sur substratum imperméable et/ou soumis à des étés particulièrement secs. On note à ce sujet quelques différences importantes avec la cartographie des modules présentée précédemment ; en effet, un certain nombre de bassins présentent des étiages sévères là où le module était plutôt autour de la moyenne nationale ce qui tendrait à montrer ici l'existence de forts contrastes saisonniers liés à de faibles possibilités de stockage sur les bassins concernés. De même, si les valeurs les plus élevées (QMNA5 > 5 l/s/km²) sont à

nouvelles observées en majorité dans les secteurs montagneux, la comparaison des cartes de QA et de QMNA5 permet de relever une différence notable pour certains bassins côtiers du Nord et petits affluents de la partie aval de la Seine où les contributions importantes de la part des aquifères permettent de maintenir un débit de base relativement élevé au cours des périodes sèches sans que ces bassins apparaissent comme particulièrement productifs vis-à-vis du module interannuel.

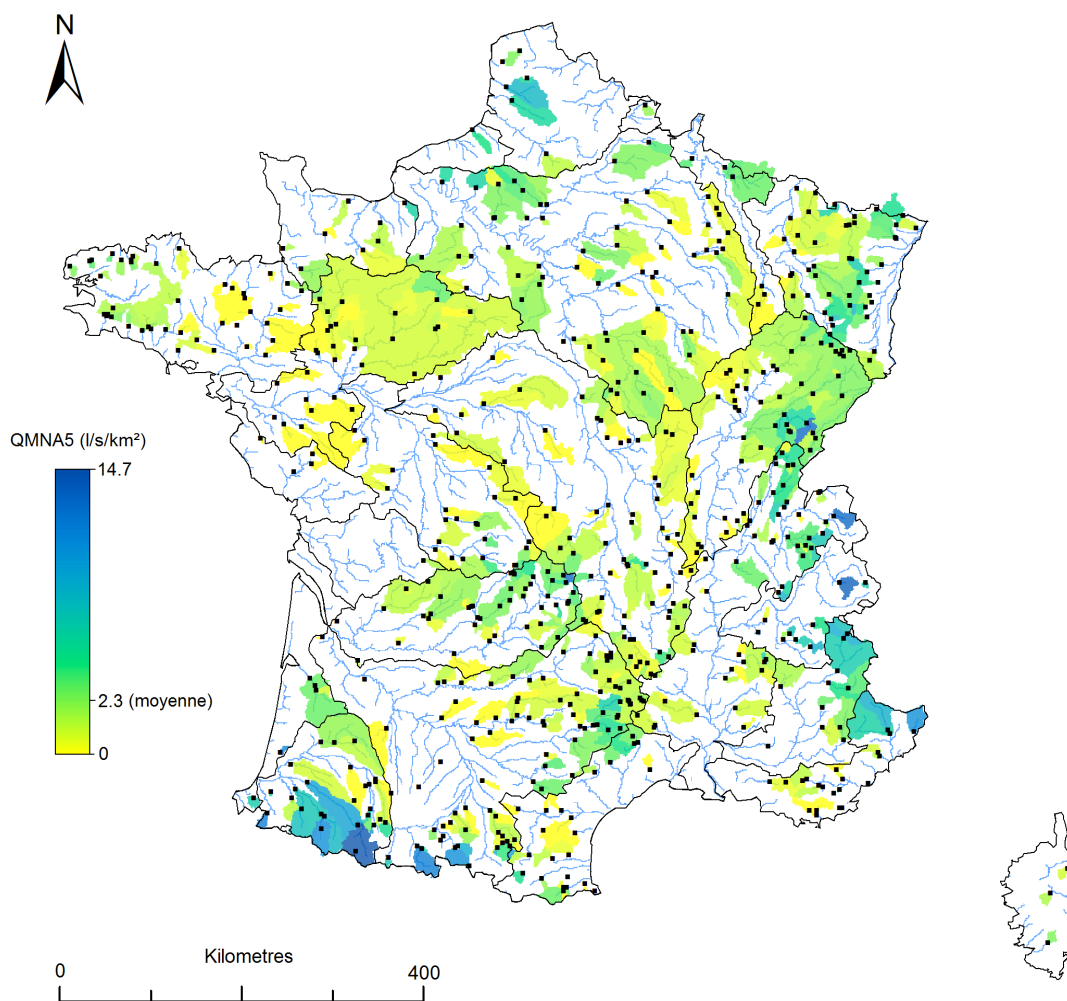


Figure II-4 : Cartographie des QMNA5 spécifiques (en $l/s/km^2$) aux stations de l'échantillon de référence

II.1.3 Indices extraits de la courbe des débits classés

La courbe de débits classés (notée CDC dans la suite de ce document) est une représentation synthétique du régime hydrologique qui traduit la probabilité qu'un débit donné soit atteint ou dépassé, cette probabilité étant également appelée fréquence au dépassement (une façon commode de concevoir cette fréquence est de la rapporter à la proportion de jours pendant lesquels un débit donné est atteint ou dépassé dans une année, par exemple le quantile de débit de fréquence au dépassement 95 % (noté Q95) sera dépassé, en moyenne, 347 jours dans l'année).

Cette courbe est obtenue par classement en ordre décroissant de l'ensemble des débits moyens d'une chronique contenant n observations (pas de temps fixe, habituellement horaire ou journalier). Le calcul des fréquences empiriques attribuées à chaque observation admet ensuite plusieurs possibilités (relativement équivalentes), la formulation la plus souvent privilégiée étant la suivante :

$$\text{Prob}(x \geq Q) = f(x) = \frac{r}{n+1} \quad (II.1)$$

avec $f(x)$ la fréquence au dépassement de l'observation x , r rang de l'observation x et n le nombre total d'observations.

A partir de cette définition relativement générique, la construction des CDC admet de nombreuses déclinaisons adaptées aux différentes problématiques d'étude (l'étude des comportements saisonniers se concentrera par exemple sur un échantillonnage de toutes les observations d'une période donnée de l'année). Par ailleurs, si la grande majorité des travaux exploite des CDC construites à partir de l'ensemble de la chronique disponible (CDC « period of record »), certains auteurs recommandent de travailler à partir d'une courbe définie comme la moyenne des CDC obtenues individuellement pour chaque année de la chronique (approche défendue par Vogel et Fennessey (1994)). Ce mode de construction présente en effet plusieurs avantages vis-à-vis de la CDC classique : la courbe ainsi obtenue s'avère moins sensible à la période d'observations disponible en atténuant l'impact des périodes anormalement sèches ou humides, elle est ainsi jugée plus représentative du comportement moyen d'un cours d'eau. On notera en particulier que, par construction, la présence de débits nuls dans la gamme des faibles débits se trouve nettement limitée et permet probablement de caractériser plus rigoureusement le caractère intermittent des cours d'eau (*i.e.* si les assècs se produisent chaque année). D'autre part le mode de construction permet également d'associer à chaque quantile une variabilité interannuelle ; cette information supplémentaire permet alors d'envisager une caractérisation fréquentielle des différents quantiles.

Quelle que soit l'approche retenue, l'avantage de la représentation sous forme de CDC réside principalement dans son aspect synthétique qui permet de visualiser rapidement les principales caractéristiques d'un cours d'eau dans l'ensemble des gammes de débits (variabilité des débits, débit médian, magnitude et fréquence des débits de crue ou d'étiage...). Elle est de ce fait largement utilisée comme outil de gestion, notamment dans la mise en place d'aménagements hydroélectriques et

hydrauliques (rendements hydroélectriques, gestion des vidanges de réservoirs notamment vis-à-vis de la réglementation sur les débits réservés...) ou encore l'étude des flux sédimentaires, des transferts de polluants et du potentiel d'érosion (Vogel et Fennessey (1995)). Elle constitue également un indicateur pertinent pour illustrer l'impact des variations régionales de géologie, de relief et/ou de climat sur la réponse hydrologique des bassins (Pearce (1990)). L'analyse porte alors essentiellement sur la forme de la courbe. A ce sujet, Sauquet et Catalogne (2011) proposent de synthétiser l'information portée par la CDC à l'aide d'un indice de courbure obtenu simplement à partir du ratio :

$$I_c = \frac{(Q1 - Q10)}{(Q10 - Q99)} \quad (II.2)$$

Cette suggestion découle d'un simple constat : le quantile Q10 marque sur la plupart des courbes le point d'inflexion entre deux tronçons, l'un à fort accroissement, de Q1 et Q10, et l'autre à plus faible gradient, entre Q10 et Q99. Le rapport qui existe entre ces deux tronçons permet d'exprimer de manière relativement appropriée le contraste plus ou moins marqué entre débits « de base » et débits de hautes eaux. En terme de réponse hydrologique, cet indice permet donc de distinguer aisément les bassins réactifs (faible valeur de I_c), caractérisés par l'importance des phénomènes de ruissellement, et les bassins à comportement amorti (forte valeur de I_c) pour lesquels l'existence d'un facteur de régulation permet d'atténuer la sensibilité de la réponse hydrologique à l'aléa pluviométrique. Dans le même ordre d'idée, on signalera le rapport $Q_b = Q90/Q50$, employé par Nathan et McMahon (1990b) pour caractériser la proportion de l'écoulement se rapportant à la contribution de la composante souterraine.

Pour revenir plus spécifiquement à la caractérisation de la sévérité des étiages, la plupart des travaux se réfèrent à un quantile de fréquence au dépassement généralement comprise entre 70 et 99 %. Dans une perspective de régionalisation, on remarque notamment l'emploi particulièrement répandu du quantile Q95, comme en Suisse où il est utilisé à titre de variable réglementaire (Ashwanden et Kan (1999)), au Royaume-Uni (Gustard *et al.* (1992), Holmes *et al.* (2002)), au Népal (Chalise *et al.* (2003)), ou encore en Autriche (Laaha et Blöschl (2006b)). Le quantile Q90 apparaît également fréquemment dans les travaux d'estimation en sites non jaugés (*e.g.* Nathan et McMahon (1990a, 1992) ou encore Thomas et Benson (1970)).

Un exercice intéressant consiste probablement à replacer les différents indicateurs de sévérité vus précédemment (*cf.* sections II.1.1 et II.1.2) sur la courbe de débits classés pour en déterminer la fréquence au dépassement associée. Les résultats obtenus pour le module (QA), le dixième du module (QA/10), le QMNA5, le VCN10(5) et le VCN1(5) sont représentés sur la Figure II-5 sous la forme de boxplot résumant la distributions des valeurs obtenues pour les stations de l'échantillon de référence.

A titre informatif on remarque ainsi que, du fait de la forte dissymétrie de la distribution des débits, le module est généralement bien supérieur au débit médian (Q50) et s'approche davantage du Q30. Plus intéressants sont sûrement les résultats obtenus pour les variables d'étiage pour lesquelles on constate, à

l'exception du QA/10, une forte cohérence à l'échelle nationale avec des QMNA5 proches du Q95¹ (et jamais inférieur au débit minimum observés sur la période 1970-2005), des VCN10(5) proches du Q98 et des VCN1(5) voisins du Q99. Il apparaît cependant qu'un certain nombre de bassins se différencient nettement du reste de l'échantillon. Ils correspondent pour la plupart à des bassins à régime intermittent comme pour la station V2814020 (le Suran à Neuville-sur-Ain [La Planche]) qui présente jusqu'à 39 % de débits nuls (au total 52 bassins présentent une fréquence de débits nuls supérieure à 1 % et 15 bassins une fréquence de débits nuls supérieure à 10 %). En ce qui concerne le QA/10, la forte variabilité des fréquences au dépassement obtenues reflète probablement le manque de pertinence de cette variable pour caractériser l'étiage de manière équitable pour tous les bassins. Ainsi il apparaît notamment que 138 bassins n'ont jamais connu un débit inférieur au QA/10 sur la période 1970-2005 (*i.e.* fréquence au dépassement de 100 %). Compte tenu de ces observations et afin de compléter la gamme des débits d'étiage examinée, il a été choisi de retenir le Q90 comme un indicateur de « sévérité moyenne ».

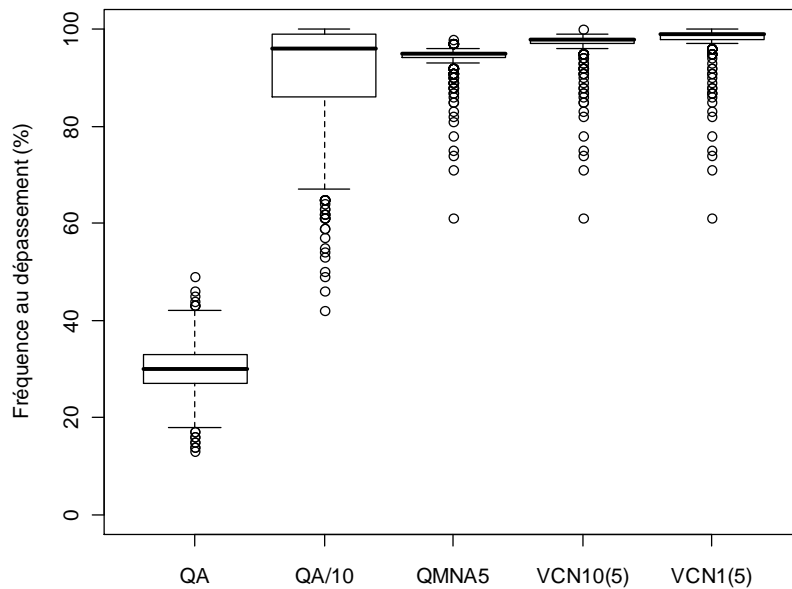


Figure II-5 : Fréquences au dépassement (%) associées au module (QA) et aux indices de sévérité des étiages (QA/10, QMNA5, VCN10(5), VCN1(5))

Les valeurs obtenues pour les stations de l'échantillon de référence sont représentées sur la Figure II-6 avec quelques exemples de CDC et de valeurs de *Ic* associées. La structure spatiale qui ressort de cette carte s'avère très similaire à celle des QMNA5 présentées précédemment (*cf.* Figure II-4) ; il en résulte que l'information supplémentaire apportée par le Q90 vis-à-vis du régime d'étiage sera probablement peu sensible.

¹ On trouve ici la justification du recours au Q95 pour la détermination de la longueur de chronique appropriée réalisée au chapitre I.

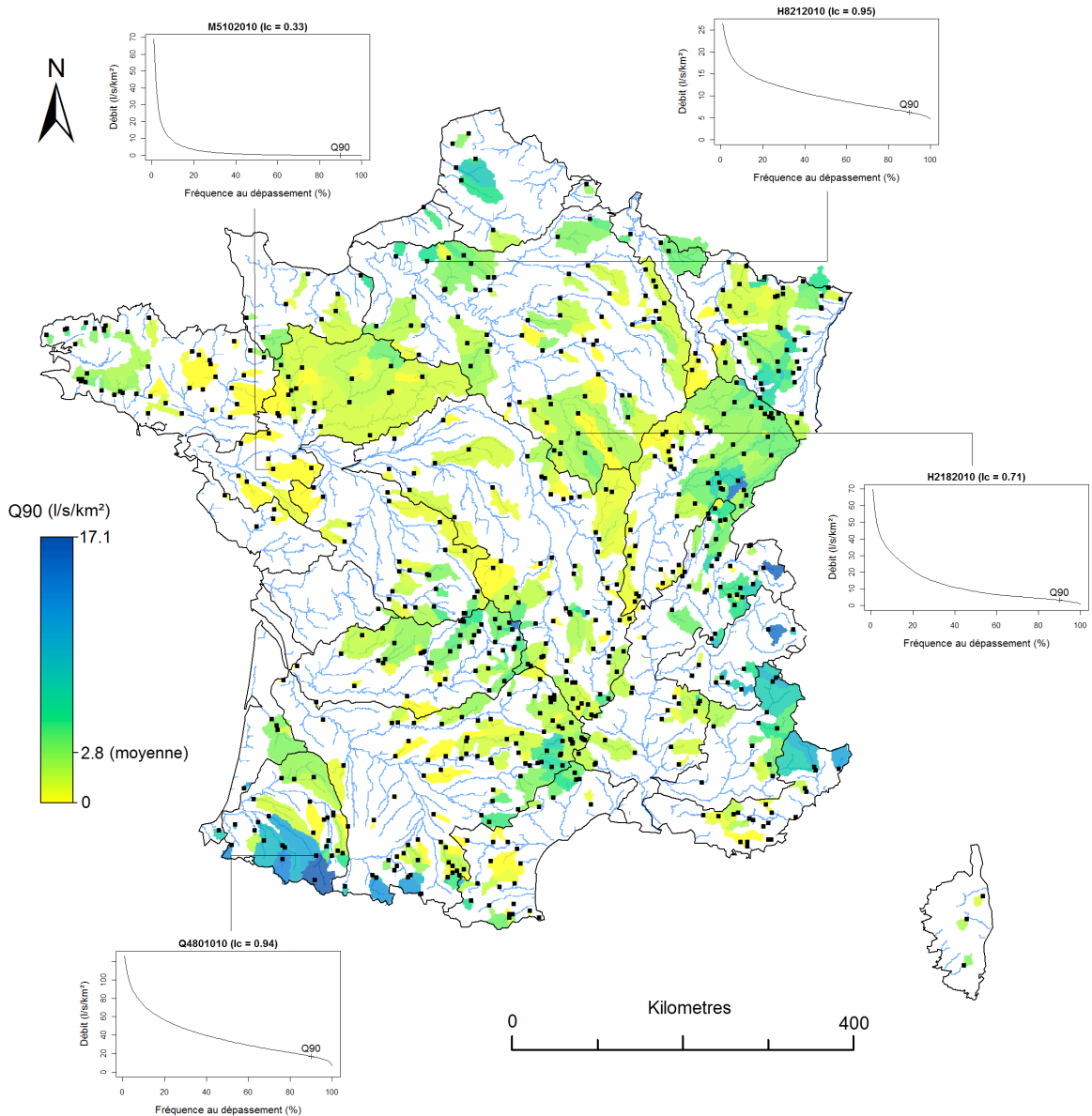


Figure II-6 : Cartographie des Q_{90} spécifiques (en $l/s/km^2$) aux stations de l'échantillon de référence et exemples de CDC associées.

II.1.4 Indices de durées et déficits

L'approche la plus répandue pour la caractérisation des étiages en termes de durée et/ou de déficit consiste à définir l'étiage en tant qu'événement vis-à-vis d'un seuil de débit Q_0 en deçà duquel le cours d'eau est considéré en étiage (« theory of run » proposée par Yevjevitch (1967) et appliquée dans le cadre de la caractérisation des étiages par Beran et Gustard (1977), Weisman (1978), Institute of Hydrology (1980), Zelenhasic et Salvai (1987), Smathkin et Watkins (1997),...). La procédure la plus courante consiste alors à identifier, à partir de la chronique des débits moyens journaliers, les séries consécutives d'observations inférieures ou égales au seuil fixé (Figure II-7).

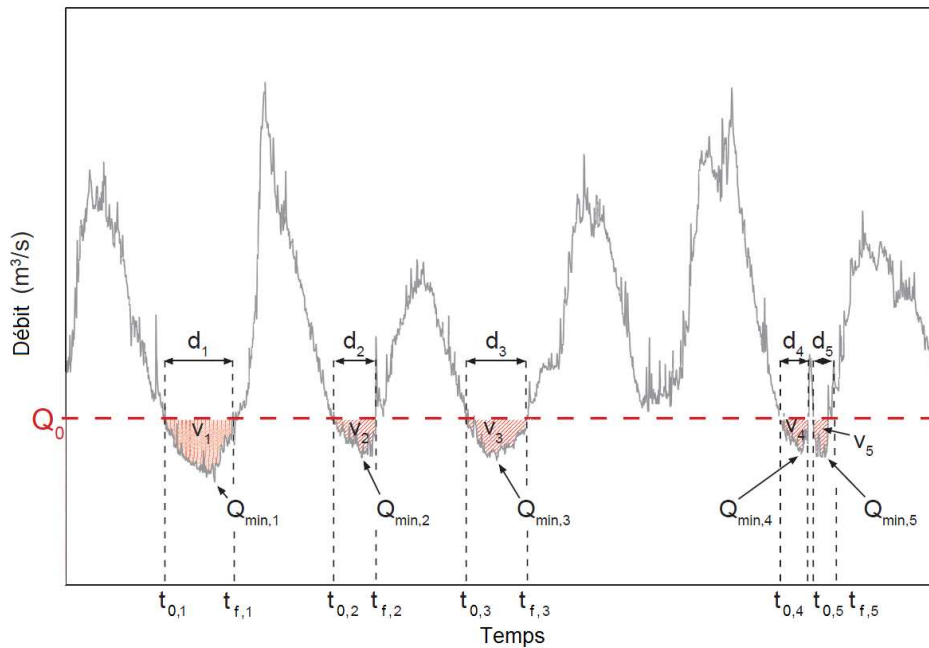


Figure II-7 : Illustration de la détection d'épisodes d'étiage vis-à-vis d'un seuil. Figure modifiée d'après Fleig *et al.* (2005).

Cette technique permet ainsi de déterminer, pour chaque événement identifié, un grand nombre de caractéristiques parmi lesquelles les plus couramment utilisées sont les dates de début (t_0) et de fin (t_f) de l'événement¹, sa durée ($d = t_f - t_0$), ou encore le déficit de volume v écoulé par rapport au seuil (*i.e.* le cumul des différences entre le seuil et le débit observé). Plus rarement il est fait référence à la valeur du débit minimal (Q_{min}) de l'événement ou encore aux différentes dates pour lesquelles un certain pourcentage du déficit de volume total est atteint (*e.g.* t_{50} sera la date à laquelle la moitié du déficit est atteint). Enfin le rapport entre le déficit de volume et la durée est parfois pris comme indicateur synthétique de la magnitude de l'étiage.

Le choix du seuil, qui dépend avant tout de l'objectif de l'étude, constitue l'une des principales problématiques associées à ce type de technique et reste le plus souvent arbitraire. Dans de nombreux cas le seuil est déterminé pour l'ensemble de la chronique sur la base d'un quantile de la courbe de débits classés interannuelle (généralement compris entre Q70 et Q95), plus rarement par rapport à un pourcentage du débit moyen interannuel (Mathier *et al.* (1992), Clausen et Pearson (1995)).

Les variables de durée et déficit obtenues à l'issue de ce type de procédure se prêtent évidemment, comme pour les séries de débits minimum annuel, à l'analyse fréquentielle. Cependant le mode d'échantillonnage adopté ici (échantillons qualifiés de « Partial Duration Series ») en modifie le cadre théorique. Il est alors supposé que la distribution du nombre d'événements détectés reproduit un processus poissonnien tandis que les intensités suivent une loi exponentielle (Kjeldsen *et al.* (2000) et Mathier *et al.* (1992)) ou sa généralisation au travers de la loi de Pareto généralisée (Tallaksen et Hisdal

¹ On voit émerger ici une première approche pour caractériser la saisonnalité (*cf.* section II.1.7)

(1997), Madsen et Rosberg (1998), Tate *et al.* (2000), Meigh *et al.* (2002)). Contrairement à la sélection de valeurs annuelles, ce type d'échantillon présente en théorie l'avantage de ne comporter que des observations extrêmes sans valeurs nulles. En revanche, la possible interruption d'un même épisode d'étiage par franchissement temporaire du seuil suite à un événement pluvieux isolé constitue un obstacle de taille. En effet les deux pseudo-épisodes ainsi détectés ne peuvent alors être considérés comme indépendants.

Afin de surmonter cet obstacle Tallaksen *et al.* (1997) proposent deux solutions relativement simples mais faisant appel à une paramétrisation arbitraire et difficilement généralisable à l'ensemble des bassins :

- lisser la série chronologique en appliquant par exemple une moyenne glissante sur 10 jours (Figure II-8) ;
- définir un critère de durée minimale séparant deux événements associés à un critère défini comme le volume en excès (*i.e.* volume écoulé en surplus par rapport au seuil durant l'interruption) minimal requis pour séparer deux événements indépendants.

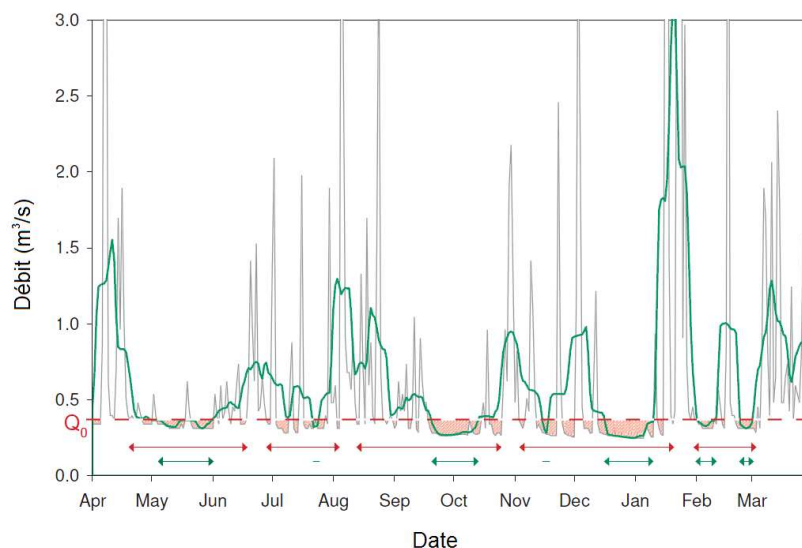


Figure II-8 : Illustration d'une procédure d'agrégation basée sur l'emploi d'une moyenne glissante sur 10 jours (en vert).
Figure modifiée d'après Fleig *et al.* (2005).

Pour s'affranchir de cette part d'arbitraire, la méthode dite du « Sequent Peak Algorithm » (SPA) constitue probablement l'alternative la plus intéressante. Initialement proposée par Vogel et Stedinger (1987) pour permettre de déterminer les caractéristiques de déficit selon une méthode adaptée à la gestion des réservoirs, la méthode est reprise par Tallaksen *et al.* (1997) puis Kjeldsen *et al.* (2000) dans le cadre de la caractérisation des étiages. Le principe est de considérer chaque jour le déficit cumulé S_t par rapport à un niveau de remplissage attendu Q_0 . Un épisode d'étiage débute lorsque le débit observé Q_t à l'instant t est insuffisant pour atteindre Q_0 et perdure tant que $w(t) = Q_0 - (Q(t) + w(t-1))$ reste positif, c'est à dire tant que le déficit accumulé n'est pas résorbé (Figure II-9). Les variables dérivées de cette technique sont le déficit cumulé maximal (w_{max}) et la durée entre le début de l'épisode d'étiage et l'instant où celui-ci atteint son déficit cumulé maximal (d). Si cette méthode requiert elle aussi la détermination

d'un seuil souvent arbitraire, elle présente l'avantage de considérer *a priori* les épisodes d'étiage dans leur intégralité, néanmoins nos propres essais ont montré qu'il subsistait parfois des épisodes parasites de très courte durée susceptibles de perturber les approches de caractérisation fréquentielle.

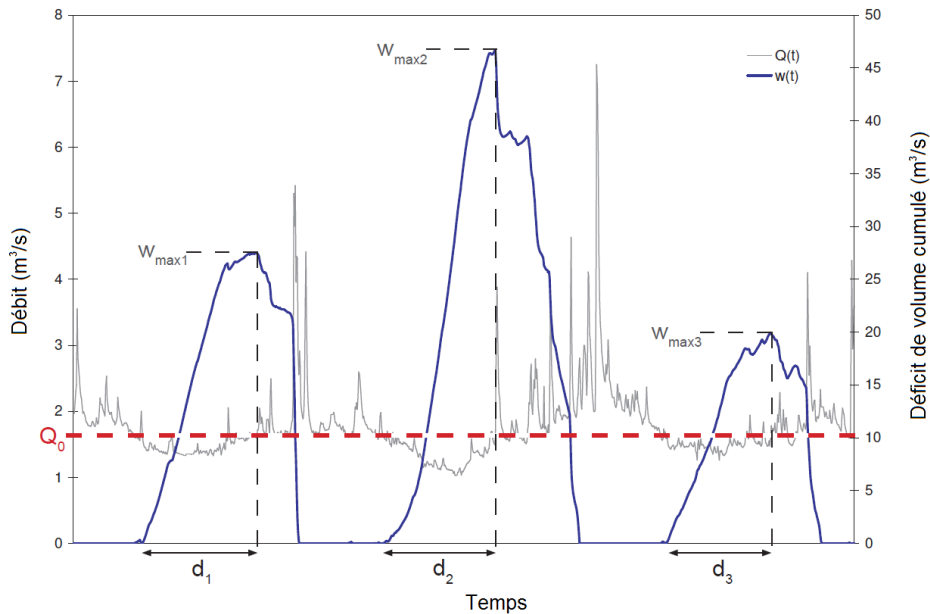


Figure II-9 : Définition des épisodes d'étiage selon la procédure « Sequent Peak Algorithm ». Figure modifiée d'après Fleig et al. (2005).

Finalement on mentionnera les travaux de Clausen et Pearson (1995) qui s'écartent des approches classiques et choisissent de ne sélectionner pour chaque année hydrologique que l'épisode le plus important en terme de déficit. Malgré l'emploi de seuils relativement élevés (module et 75 % de ce dernier), cette procédure peut aboutir à la présence de valeurs nulles dans les séries annuelles (lorsque le seuil n'est pas franchi dans le cas d'années particulièrement humides) et empêche la prise en compte d'éventuels épisodes de durée supérieure à 365 jours. Néanmoins cette approche nous a paru être la plus avantageuse dans la mesure où la sélection d'un unique épisode chaque année (le plus important) permettra de limiter fortement les problématiques de dépendance évoquées plus haut. Il a ainsi été choisi d'extraire de chaque chronique de l'échantillon de référence les durées et déficits maximaux annuels (notés d_{XA} et def_{XA} respectivement) en considérant un seuil $Q_0 = Q_{90}$ ¹. Ces échantillons de valeurs annuelles ont ensuite fait l'objet d'ajustements par maximum de vraisemblance (ajustements conditionnels compte tenu de la présence possible de valeurs nulles) d'une loi Gamma à deux paramètres (qui est à nouveau apparue comme la plus adaptée pour ce type d'échantillon) pour finalement déterminer le quantile de période 5 ans associé à chacune des deux variables (notés $d_{XA}(5)$ et $def_{XA}(5)$ respectivement).

¹ Les épisodes associés n'étant pas nécessairement les mêmes dans la mesure où un épisode prolongé mais peu sévère peut présenter un déficit moindre qu'un épisode plus court mais de plus forte intensité. Ainsi il n'a pas été possible de calculer de critère de magnitude (déficit de l'épisode ramené à sa durée) comme parfois suggéré dans la littérature.

Les résultats obtenus sont encore une fois présentés ici sous la forme de cartes (Figure II-10 et Figure II-11). En terme de durée, l'une des principales particularités concerne probablement les cours d'eau du Bassin Parisien qui s'avèrent susceptibles de connaître des épisodes d'étiages étonnamment long ($dXA(5) > 100$ jours). Cette spécificité vient vraisemblablement de la forte influence qu'exercent les aquifères sur les écoulements. En effet ces derniers suivent relativement fidèlement les variations de niveau des nappes à l'échelle saisonnière (voire interannuelle) et franchissent ainsi le Q90 sur d'assez longues périodes sans que les épisodes pluvieux estivaux ne parviennent à faire remonter significativement le débit. Sur le reste du territoire, les durées d'étiage semblent davantage refléter les spécificités climatiques régionales ; les épisodes d'étiage étant d'autant plus courts que le climat présente un caractère humide et une variabilité saisonnière peu marquée. On note à ce titre que les bassins montagneux à régime nival ou pluvio-nival semblent globalement connaître des étiages d'assez courtes durées par rapport à la moyenne nationale.

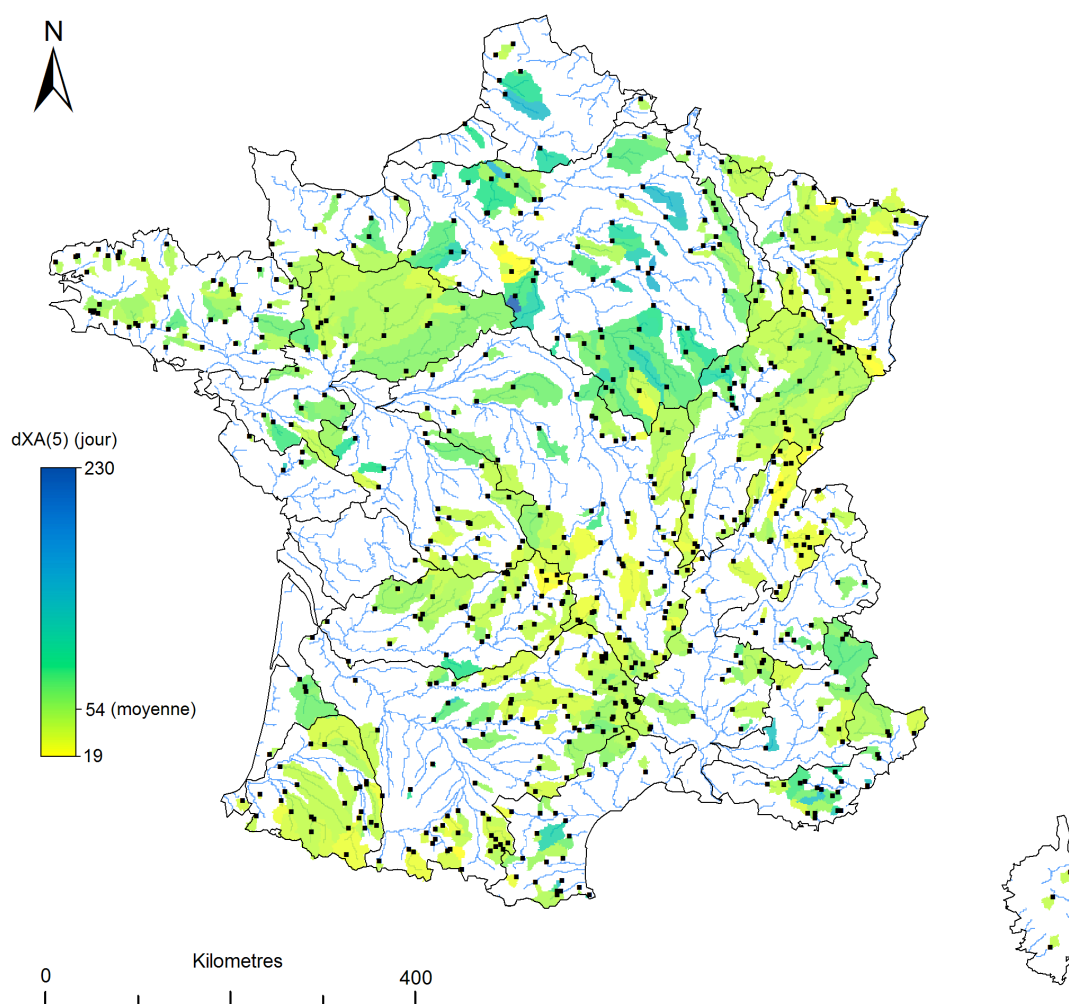


Figure II-10 : Cartographie des $dXA(5)$ (en jour) aux stations de l'échantillon de référence

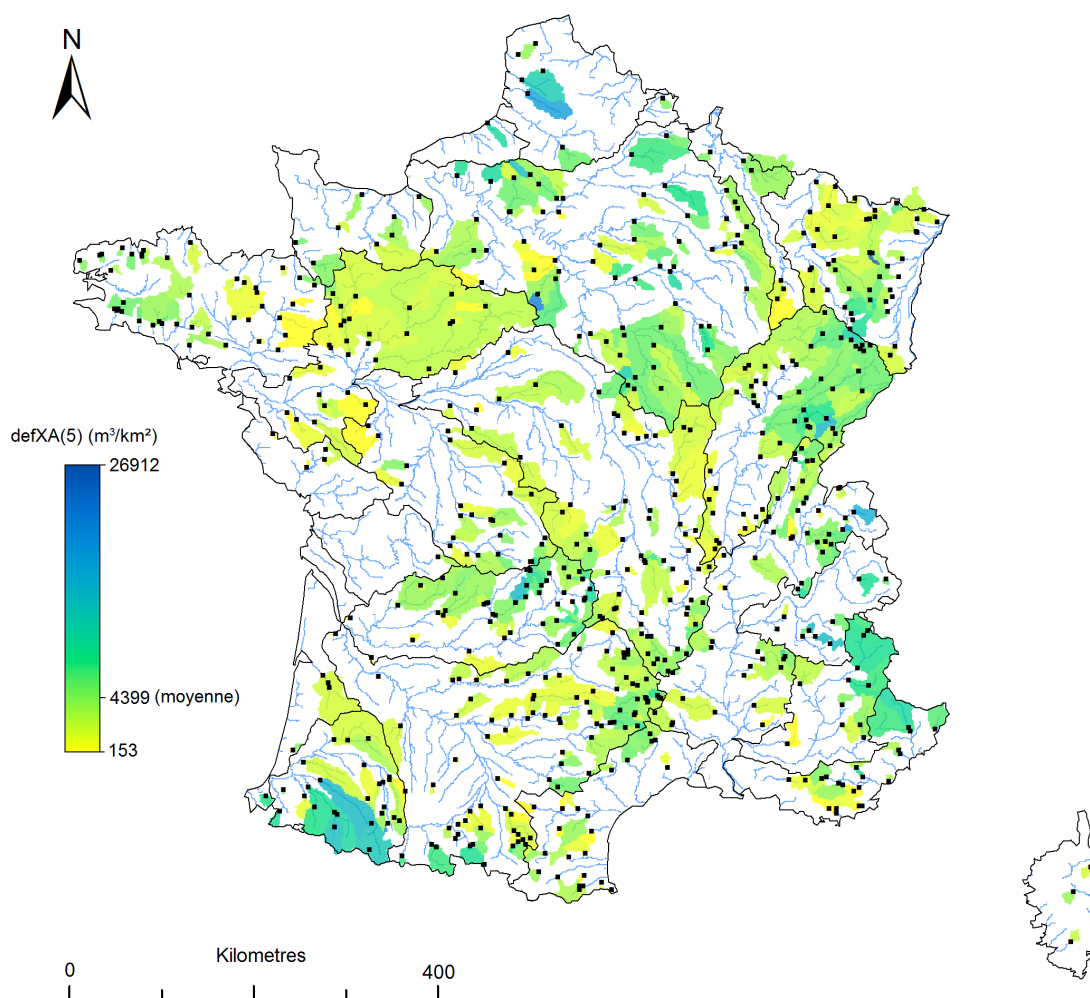


Figure II-11 : Cartographie des $defXA(5)$ (en m^3/km^2) aux stations de l'échantillon de référence

Concernant les déficits spécifiques (exprimés en m^3/km^2), il semble que l'on retrouve plutôt une répartition spatiale proche de celle des variables de sévérité vues précédemment (cf. section II.1.2). Il apparaît ainsi de manière assez paradoxale que les bassins d'altitude qui présentaient des épisodes d'étiage relativement brefs sont susceptibles de se trouver affectés par les déficits parmi les plus prononcés. De même on constate qu'un certain nombre de bassins qui présentaient des étiages relativement prolongés semblent connaître un déficit peu marqué (les bassins de Vendée illustrent bien ce constat). Ces observations résultent essentiellement du contraste existant entre le seuil choisi et les débits inférieurs à celui-ci, ce contraste étant d'autant plus limité que le seuil est proche de zéro. Ainsi l'information apportée par le déficit vis-à-vis de la caractérisation des régimes d'étiage s'avère sans doute moins pertinente que celle se rapportant à la durée.

II.1.5 Indices de débit de base

L'évaluation de la part de l'écoulement attribuée au débit de base, celui-ci étant considéré comme la composante majoritaire durant la période d'étiage, permet de disposer d'un bon indicateur de la capacité de stockage d'un bassin et par extension de sa sensibilité à l'étiage. Le principal indice utilisé en ce sens est le « Base Flow Index » (BFI), initialement introduit par Lvovich (1972) et plus largement développé par la suite dans les travaux anglo-saxons de l'Institute of Hydrology (1980). Le BFI est alors défini comme le rapport entre le débit de base et le débit total sur une période donnée (il peut être par exemple déterminé de manière annuelle ou interannuelle). Lorsqu'il tend vers 1, le bassin bénéficie d'un fonctionnement où la composante lente est majoritaire tandis qu'une valeur proche de 0 indique que la part attribuée au ruissellement prédomine (et par extension cela témoigne de l'absence de stockage sur le bassin). Pour quantifier la participation du débit de base à l'écoulement total, les méthodes employées reposent essentiellement sur des techniques de décomposition d'hydrogramme dont une revue est proposée par Dickinson *et al.* (1967), Hall (1971) ou plus récemment Nathan et McMahon (1990b). Deux techniques permettant un traitement automatique des chroniques (et par conséquent reproductible dans le cas d'un grand nombre de bassin) sont présentées ici.

La première d'entre elles correspond à l'algorithme de séparation mis au point par l'Institute of Hydrology (1980). La procédure suivie consiste tout d'abord à filtrer la série chronologique en extrayant l'ensemble des débits minimaux observés par période de 5 jours successives. Des points pivots sont ensuite identifiés en recherchant parmi la série de débits minimaux ceux dont la valeur est inférieure ou égale à 110 % de la valeur des minimaux voisins (Figure II-12)¹. Le débit de base journalier est ensuite défini comme le débit sous la courbe obtenue par interpolation linéaire entre les points pivots. Lorsque ce débit est supérieur au débit observé, la valeur est par défaut ramenée à celle observée.

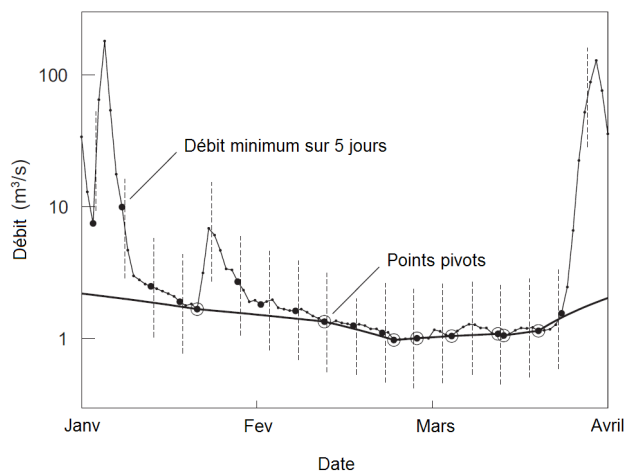


Figure II-12 : Illustration de la procédure de séparation d'hydrogramme proposée par l'Institute of Hydrology (1980).
Figure modifiée d'après Piggott *et al.* (2005).

¹ Les paramètres de l'algorithme de séparation ont été optimisés dans le cadre de zones à régime pluvial pour quantifier la variabilité spatiale des contributions souterraines. Selon Tallaksen et Van Lanen (2004), la même procédure appliquée dans le contexte de bassins soumis à des régimes nivalux ou à l'influence de lacs doit être prise avec précaution.

La seconde procédure de décomposition d'hydrogramme, suggérée par Lyne et Hollick (1979), se base sur l'emploi d'un filtre récursif dérivé des méthodes de traitement du signal. L'algorithme détermine à chaque instant t le débit f_t attribuée à la composante de ruissellement tel que :

$$f_t = \alpha \cdot f_{t-1} + \frac{1 + \alpha}{2} \cdot (q_t - q_{t-1}) \quad (II.3)$$

avec α le paramètre du filtre et q_t le débit observé à l'instant t . Le débit de base b_t à l'instant t est alors déduit directement de $b_t = q_t - f_t$ en imposant la contrainte $0 < b_t < q_t$.

Après une série de tests Nathan et McMahon (1990b) conseillent d'employer une valeur du paramètre α comprise entre 0.9 et 0.95 pour permettre de capturer correctement le débit de base. Ces derniers recommandent également d'appliquer successivement l'algorithme dans les sens ascendant et descendant afin de lisser les éventuelles distorsions pouvant apparaître avec un unique filtrage de la série.

Lorsqu'on compare les procédures de séparation d'hydrogramme de l'Institute of Hydrology (1980) et de Lyne et Hollick (1979) (en reprenant les paramètres relevés dans la littérature), on constate avant tout que la première procédure conduit généralement à un lissage beaucoup plus grossier et par conséquent moins réaliste vis-à-vis de l'hydrologie (Figure II-13).

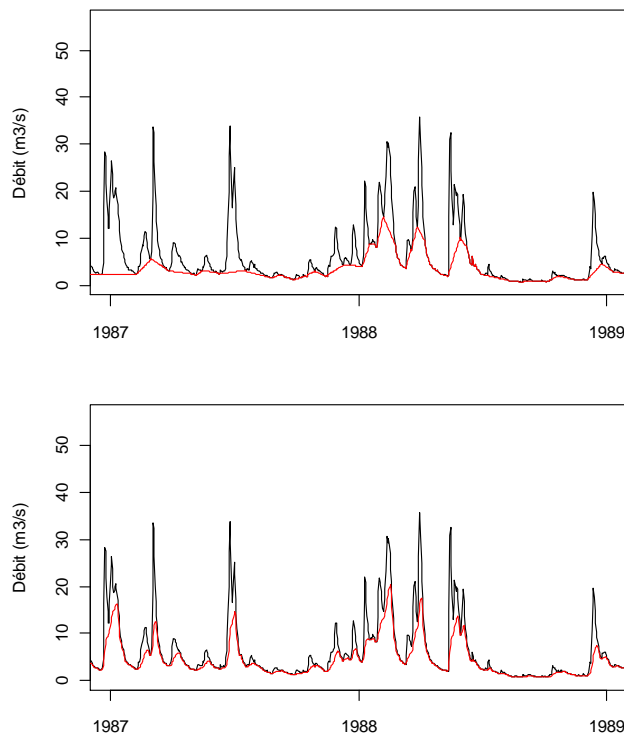


Figure II-13 Exemple de chronique de débit de base sur deux années (en rouge) obtenue à partir de la chronique des débits moyens journaliers de la station H0100010 (La Seine à Nod-sur-Seine) (en noir). En haut : algorithme de l'Institute of Hydrology (1980), en bas : algorithme de Lyne et Hollick (1979).

La comparaison des valeurs de BFI obtenues à l'issue du traitement des chroniques du jeu de station de référence montre en revanche que les deux procédures conduisent à des résultats très voisins pour les fortes valeurs de BFI, les écarts croissent ensuite linéairement lorsque les valeurs de BFI diminuent. Cette propriété semble indiquer que l'on conserve avec les deux algorithmes la même hiérarchie entre valeurs (au facteur d'échelle près) et par conséquent que le choix de l'algorithme s'avère peu important en relatif pour caractériser la présence de stocks sur les bassins. Ainsi nous avons finalement privilégié la procédure de Lyne et Hollick (1979) pour son rendu plus « cosmétique ».

La cartographie des BFI obtenus aux stations de l'échantillon de référence (Figure II-14) montre que la plupart des valeurs se trouvent autour de 0.72 (valeur qui correspond à la moyenne nationale) avec assez peu de contraste sur le plan national.

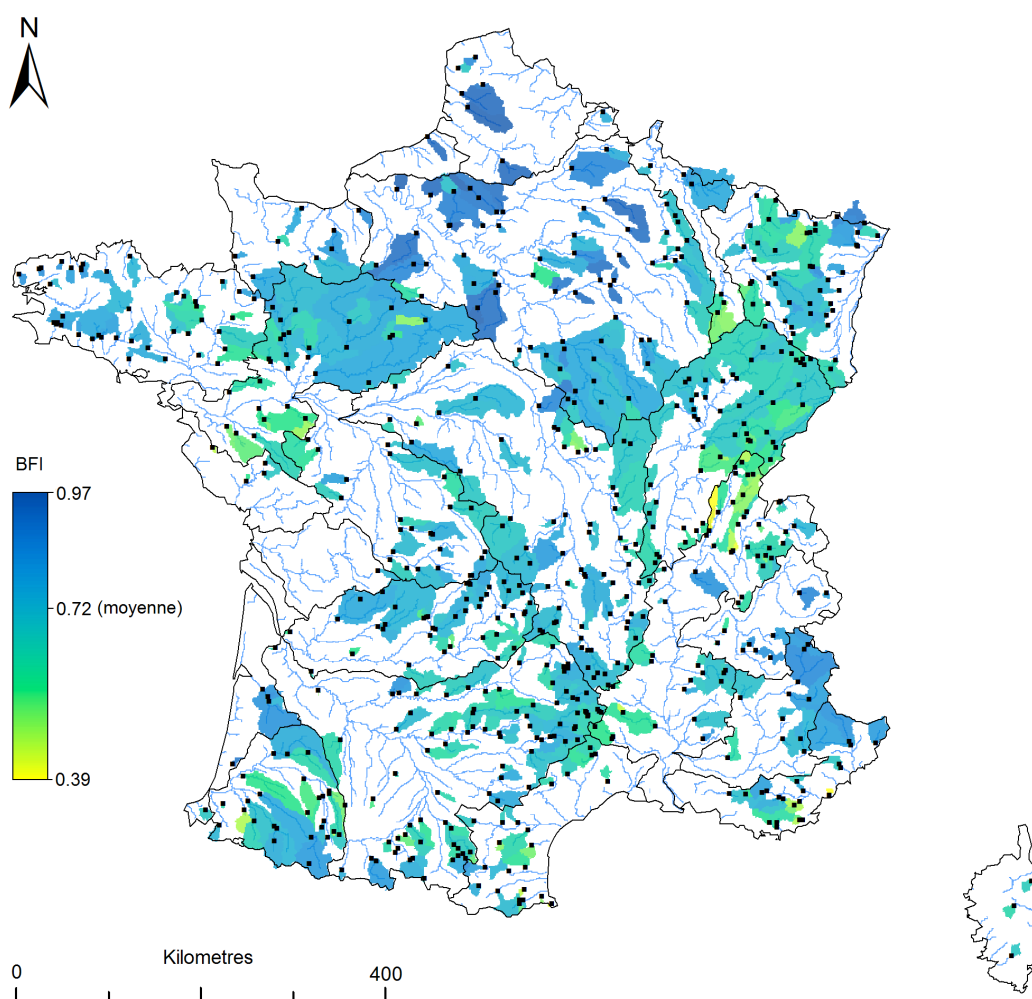


Figure II-14 : Cartographie des BFI aux stations de l'échantillon de référence

On distingue toutefois assez nettement des cours d'eau où le débit de base représente une grande part de l'écoulement ($BFI > 0.9$), en particulier dans le Bassin Parisien qui se trouve être un secteur où, comme déjà mentionné, l'existence de vastes aquifères à surface libre influence fortement les régimes hydrologiques et contribue de manière importante aux débits des rivières quelle que soit la période de l'année. A l'inverse on constate l'existence de quelques bassins où le BFI se révèle être particulièrement faible ($BFI < 0.45$), notamment dans le Jura où les bassins concernés, situés en milieu karstique, subissent visiblement des pertes importantes (*e.g.* stations V2814020 (le Suran à Neuville-sur-Ain [La Planche]) et V1425010 (le Groin à Artemare [Cerveyrieu])).

II.1.6 Indices de récession

La phase de récession est la période durant laquelle le débit décroît en l'absence de précipitations. L'analyse de la phase de récession permet alors de caractériser comment les différents réservoirs présents au sein du bassin se vidangent lors de la mise à l'étiage (Griffiths et Clausen (1997)) et donne ainsi une idée des propriétés de résilience du système (*i.e.* sa faculté à résister à la sécheresse). Cette analyse porte essentiellement sur la forme de la courbe de récession (« recession curve ») et en particulier sur la courbe de tarissement (« recession segment ») qui se rapporte plus spécifiquement au débit de base proprement dit.

Pour mener cette analyse, la dynamique de récession est généralement décrite au moyen de modèles analytiques plus ou moins complexes dont on trouve une revue relativement exhaustive dans les travaux de Tallaksen (1995) ou encore de Vogel et Kroll (1996). Parmi ces modèles, la formulation de Maillet (modèle de décroissance exponentielle) constitue de loin le modèle le plus communément employé, et ce principalement en raison de sa simplicité (tant en termes de construction que d'interprétation¹) :

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{(-\alpha t)} \quad (II.4)$$

avec Q_t le débit à l'instant t , Q_0 le débit initial de la phase de récession et $k = e^{(-\alpha)}$ la constante de récession.

Dans ce modèle, le paramètre α est un indicateur des propriétés de vidange des différents réservoirs présents sur le bassin (voisin de la notion de perméabilité). Ainsi en traçant le logarithme du débit observé en fonction du temps il est souvent possible de distinguer les différentes composantes d'écoulement durant la période de récession, chacune étant caractérisée par un segment de droite dont la pente donne la constante de récession k . Klaassen et Pilgrim (1975) ont par exemple établi que les composantes de ruissellement, de sub-surface et souterraines étaient caractérisées par des constantes de récession comprises entre $k = 0.2$ et 0.8 , $k = 0.7$ et 0.94 , et $k = 0.93$ et 0.995 respectivement².

¹ Ce modèle possède en effet un sens physique puisqu'il découle de la solution analytique des équations de la diffusivité qui gouvernent les mécanismes d'écoulement en milieu poreux (Werner et Sundquist (1951)).

² Le recouvrement entre ces gammes de valeur reflète la difficulté à individualiser clairement chacune des composantes. C'est pourquoi la constante de récession associée à la dernière composante est généralement considérée comme la plus représentative pour la caractérisation des étiages.

Afin d'obtenir un indicateur représentatif de la réponse globale du bassin en phase de récession, c'est-à-dire indépendant des conditions particulières associées à chaque épisode de récession (recharge initiale, états des réserves, pertes évaporatoires), la moyenne des valeurs de α (ou k) obtenues individuellement pour chaque épisode est parfois employée (Gottschalk *et al.* (1997)), cependant ces paramètres sont plus souvent déduits d'une « courbe de récession maîtresse » (« master recession curve » ou MRC).

Parmi les quelques méthodes développées pour construire cette courbe, la technique dénommée « correlation method » (Langbein (1938), Hall (1968), Beran et Gustard (1977), Institute of Hydrology (1980)) est probablement la plus couramment utilisée et présente l'avantage d'être presque entièrement automatisable. Ainsi dans le cas usuel de chroniques de débits journaliers moyens, l'ensemble des débits observés au jour j en fonction des débits observés au jour $j-n$ sont identifiés pour chaque épisode de récession de durée supérieure à $d = 2n$ jours. Ces différents points sont ensuite regroupés sur un même graphique et une droite est ajustée asymptotiquement à l'extrémité inférieure du nuage ainsi formé (Figure II-15). Il est alors déduit de la pente de cette droite la constante caractéristique de récession, toutefois l'ajustement ainsi effectué constitue un élément d'incertitude relativement important et peut influencer significativement les résultats (Nathan et McMahon (1990b)). Pour limiter cette incertitude il est alors recommandé de travailler avec un intervalle de temps n relativement long (cependant plus cet intervalle est long plus le nombre d'épisodes de récession de durée suffisante pour construire la MRC est réduit).

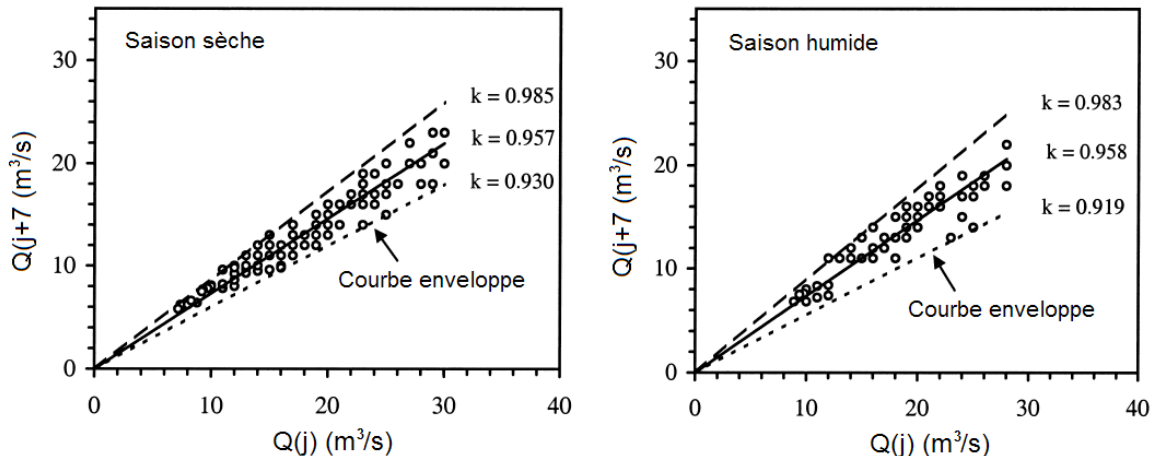


Figure II-15 : Exemple de détermination d'une courbe de récession maîtresse au moyen de l'approche « correlation method ». Figure modifiée d'après Rivera-Ramirez (2002).

Une seconde technique de détermination de la MRC, dite « matching strip method » (Snyder (1939), Toebes et Strang (1964)), consiste à extraire directement les différentes courbes de récession de la chronique pour les représenter sur un graphique semi-logarithmique selon un ordre dépendant de la longueur de chaque récession (Nathan et McMahon (1990b) proposent quelques éléments pour rendre cette procédure automatisable). Comme précédemment la MRC est ensuite définie comme la droite venant s'ajuster asymptotiquement à l'extrémité des courbes de récession (Figure II-16).

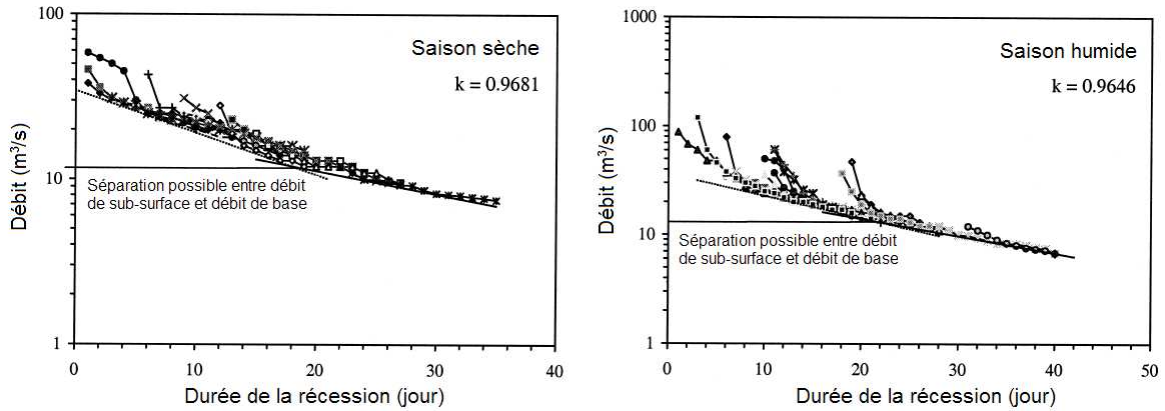


Figure II-16 : Exemple de détermination d'une courbe de récession maîtresse au moyen de l'approche « matching strip method ». Figure modifiée d'après Rivera-Ramirez (2002).

Des essais effectués à partir des chroniques de l'échantillon de référence ont montré que l'application de ces deux techniques restait malheureusement assez délicate et difficilement reproductible pour l'ensemble des bassins sans réaliser une analyse approfondie des modalités de sélection des segments de récession pour chaque station (Rivera-Ramirez (2002) démontre notamment la sensibilité des résultats obtenus à la variabilité saisonnière des segments de récession).

Afin de s'affranchir de ces difficultés, nous avons souhaité proposer une nouvelle procédure consistant à travailler sur la base de l'hydrogramme des débits moyens journaliers interannuels. L'objectif est alors de caractériser directement la dynamique de récession saisonnière dans son ensemble. Ainsi la période de récession est prise ici entre la date du premier franchissement du débit moyen journalier interannuel médian (comptée depuis le début de l'année hydrologique), considérée comme représentative du début de la période de basses eaux, et la date du premier franchissement du débit moyen journalier interannuel de fréquence au dépassement 90 % (Figure II-17)¹. La constante caractéristique de récession est finalement déterminée sur cette période (*i.e.* entre les deux points identifiés) à l'aide de la formule de Maillet :

$$\alpha_{rec} = \frac{\ln(\bar{Q}_j 90) - \ln(\bar{Q}_j 50)}{-d_{rec}} \quad (II.5)$$

avec α_{rec} la constante de récession saisonnière, $\bar{Q}_j 50$ le débit moyen journalier interannuel médian, $\bar{Q}_j 90$ le débit moyen journalier interannuel médian de fréquence au dépassement 90 % et d_{rec} la durée en jour séparant les dates de premiers franchissement de $\bar{Q}_j 50$ et $\bar{Q}_j 90$.

Les constantes de récession saisonnières ainsi obtenues après traitement des chroniques de l'échantillon de référence sont reportées sur la Figure II-18.

¹ Cette opération est en réalité réalisée sur l'hydrogramme lissé (fenêtre glissante de 30 jours) afin de s'affranchir des variations de courte longueur d'onde pour lesquelles le franchissement du Q50 est parfois observé.

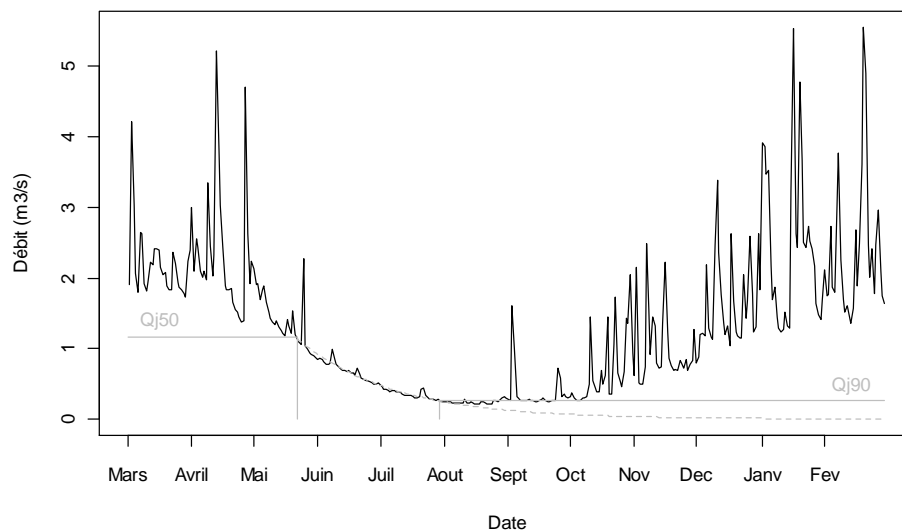


Figure II-17 : Exemple de détermination de la constante de récession saisonnière à la station Y9315010 (Le Fium-Alto à Taglio-Isolaccio [Acitaja]) sur la base de l'hydrogramme des débits moyens journaliers interannuels.

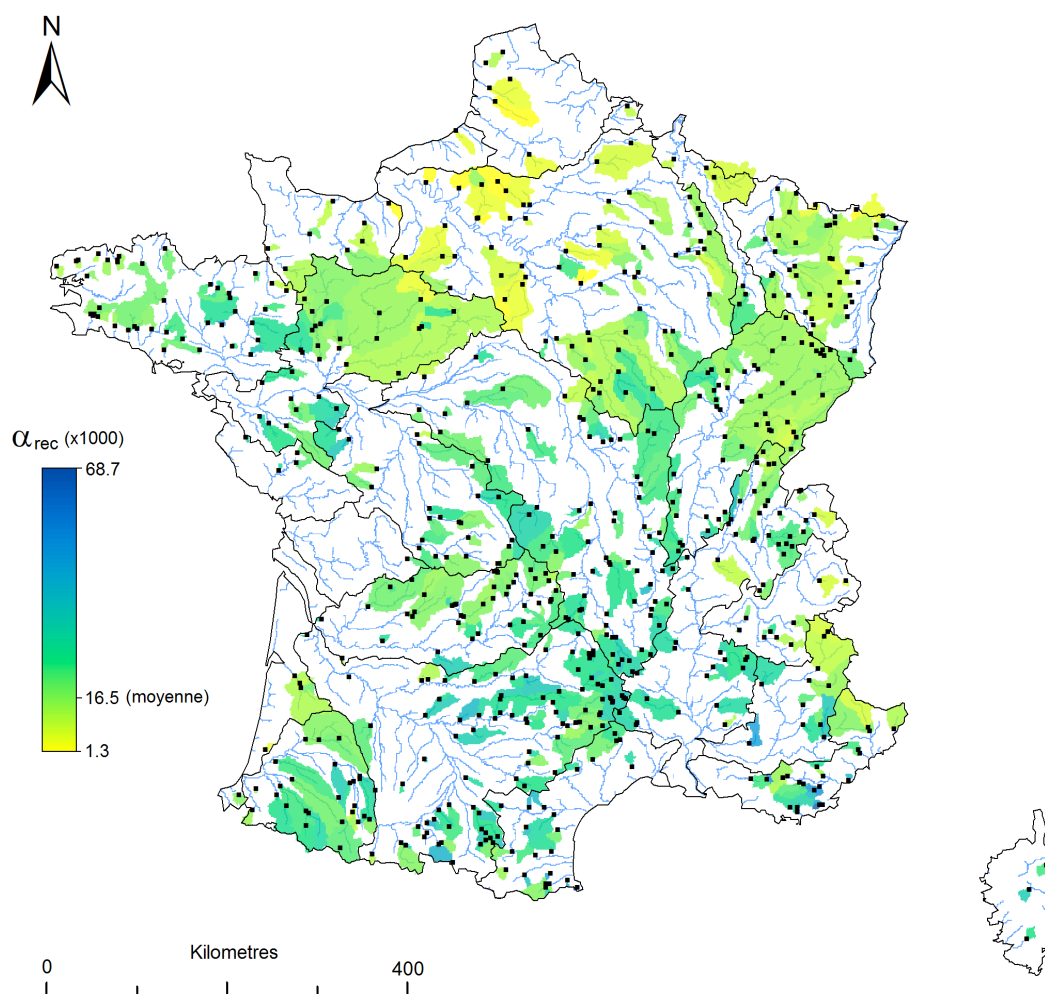


Figure II-18 : Cartographie des constantes de récession saisonnières α_{rec} aux stations de l'échantillon de référence

Si les valeurs obtenues n'ont pas réellement de sens d'un point de vue physique, il est tout de même possible d'interpréter celles-ci en relatif. On remarque ainsi que les bassins les plus « résilients », c'est à dire ceux dont le débit décroît le moins vite en période sèche se trouvent encore une fois situés dans le Bassin Parisien où le coefficient α_{rec} tendrait alors à donner une idée de la vitesse de vidange des aquifères locaux. A l'inverse les bassins les plus sensibles au manque de précipitations semblent préférentiellement localisés dans les secteurs les plus imperméables (Vendée, Massif Central).

II.1.7 Indices de saisonnalité

Les indices se rapportant à la saisonnalité, c'est-à-dire la période de l'année au cours de laquelle se produit la période d'étiage, constituent la dernière catégorie de descripteurs que nous évoquerons ici. Laaha et Blöschl (2006a) montrent en particulier que la saisonnalité se révèle être un indicateur particulièrement pertinent pour la classification des régimes d'étiage à la condition que les contrastes saisonniers soient suffisamment marqués. La distinction s'opère alors principalement entre les étiages hivernaux liés au stockage des précipitations sous forme solide (principalement dans les zones d'altitude élevées) et les étiages estivaux se rapportant à une période sèche (déficit pluviométrique et évapotranspiration élevée). Pour faire cette distinction, Laaha (2002) a recours à un histogramme comptabilisant pour chaque mois le nombre de jours pour lesquels le débit mesuré est inférieur au Q95 (dénommé « seasonality histogram » (SH)). La structure de celui-ci est alors interprétée au travers d'une classification pour constituer des groupes homogènes en terme de saisonnalité.

Le second indicateur exploité par Laaha et Blöschl (2006a) se réfère au « seasonality ratio » (SR), qui est défini comme le rapport des Q95 déterminés séparément à partir des CDC saisonnières hivernales (du 1^{er} décembre au 31 mars) et estivales (du 1^{er} avril au 30 novembre). La prédominance des étiages hivernaux est alors simplement mise en évidence lorsque $SR > 1$ tandis que les étiages estivaux sont associés à une valeur de $SR < 1$.

Enfin le « seasonality index » (SI), initialement développé par Burn (1997) pour l'étude des crues et repris par Young *et al.* (2000) pour la caractérisation des étiages, se réfère à l'ensemble des jours pendant lesquels le débit mesuré est inférieur à un seuil donné (par exemple le Q95). Cette information est résumée au moyen de statistiques circulaires (Mardia (1972)) sous la forme d'un vecteur défini par deux paramètres permettant de représenter sur un cercle unitaire la « date moyenne » d'occurrence des étiages (paramètre $\bar{\theta}$) ainsi que la variabilité associée à cette date (paramètre \bar{r})¹. Le mode de calcul de ces paramètres est le suivant : pour chaque date D_j (exprimé en jour julien, *i.e.* entre 1 et 365) pour laquelle le débit mesuré est inférieur au seuil est défini l'angle en radian correspondant dans le cercle unitaire $[0, 2\pi]$ (0 correspond au 1^{er} janvier et π au 1^{er} juillet) :

$$\theta_j = D_j \cdot \frac{2\pi}{365} \tag{II.6}$$

¹ Autrement dit le second paramètre représente la significativité de la date moyenne (saisonnalité très marquée lorsque \bar{r} tend vers 1 et peu marquée lorsque \bar{r} tend vers 0).

Les coordonnées euclidiennes correspondantes dans le cercle unitaire sont ensuite obtenues par :

$$x = \cos(\theta_j) \quad \text{et} \quad y = \sin(\theta_j) \quad (II.7)$$

Les coordonnées \bar{x} et \bar{y} de la date moyenne sont alors simplement obtenues en effectuant la moyenne des valeurs x et y obtenues individuellement. La transformation en coordonnées circulaires donne l'angle en radian correspondant dans le cercle unitaire $[0, 2\pi]$ et la norme du vecteur ayant pour origine le centre du cercle trigonométrique :

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}} \right) \quad \text{et} \quad \bar{r} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \quad (II.8)$$

La date moyenne exprimée en jour julien est enfin obtenue par :

$$\bar{D}_j = \bar{\theta} \cdot \frac{365}{2\pi} \quad (II.9)$$

Si ce dernier indice présente l'avantage de fournir une double information pour caractériser la saisonnalité des étiages, il ne peut en revanche être manipulé comme une variable classique (il s'agit ici d'une statistique circulaire donc périodique) c'est pourquoi nous lui avons préféré le « seasonality ratio ». En effet, bien que de manière plus indirecte, celui-ci permet également de se faire une idée du contraste saisonnier qui sera d'autant plus marqué que l'indice SR sera éloigné de 1. Ainsi les valeurs obtenues aux stations de l'échantillon de référence (Figure II-19) permettent de constater que la grande majorité des bassins examinés connaissent préférentiellement des étiages estivaux ($SR < 1$), ceux-ci étant particulièrement marqués en Vendée. A l'opposé les étiages hivernaux ($SR > 1$) se produisent essentiellement sur les bassins à régimes nivaux et de manière d'autant plus nette que l'altitude du bassin est élevée. On voit enfin émerger un certain nombre de bassins pour lesquels l'indice SR se trouve proche de 1, soit dans les zones de relief modéré où le régime pluvio-nival se traduit par l'existence de deux périodes de basses eaux distinctes au sein d'un même cycle hydrologique, soit dans les secteurs où le régime hydrologique reste relativement uniforme tout au long de l'année comme dans le cas des cours d'eau du Bassin Parisien.

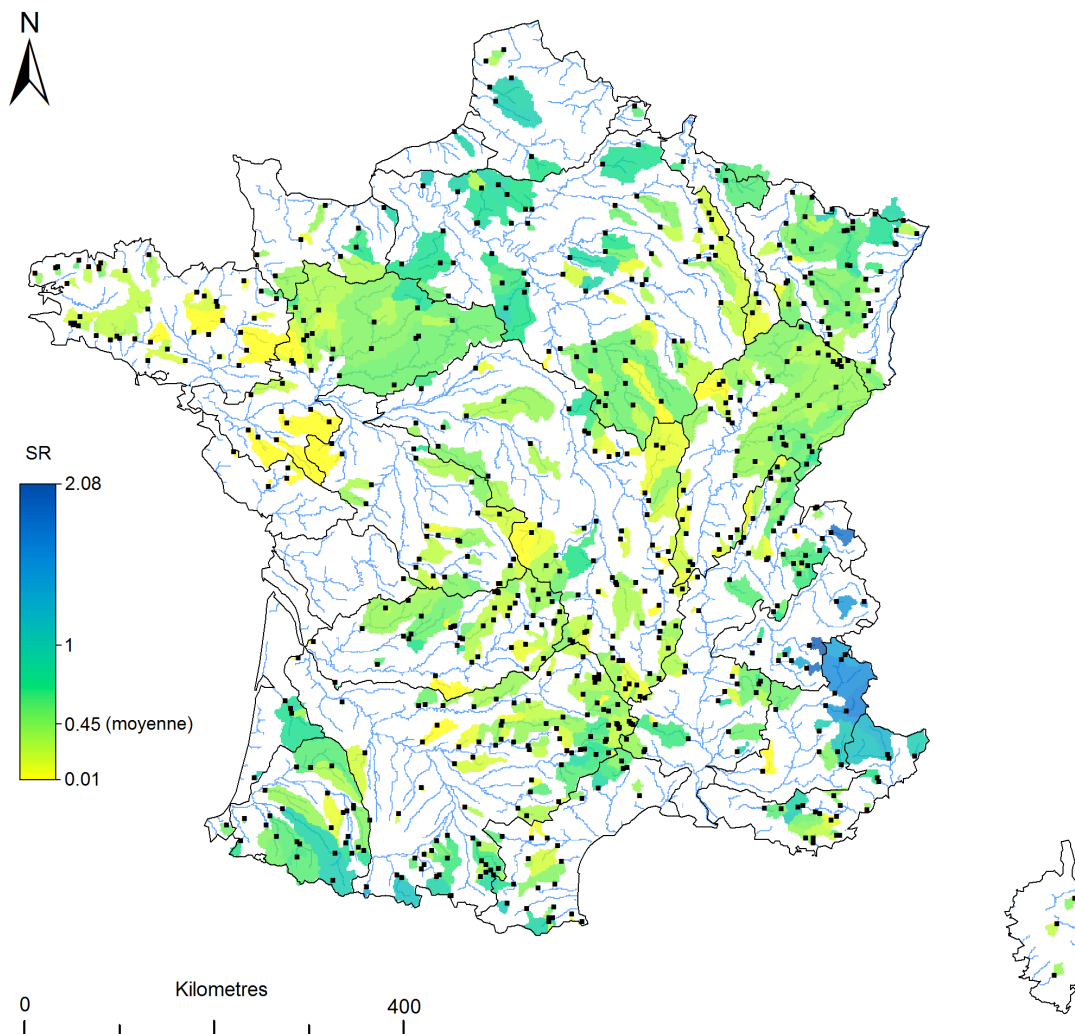


Figure II-19 : Cartographie de l'indice de saisonnalité SR aux stations de l'échantillon de référence

II.2 Aperçu général des régimes d'étiage en France sur la période 1970-2005

Si l'examen des indices d'étiage extraits aux stations de l'échantillon de référence a permis d'avoir un aperçu préliminaire de chaque aspect du régime d'étiage pris séparément, la quantité et la diversité de l'information accumulée ne permet pas de distinguer aisément quels sont les traits dominants de chaque bassin. On devine par ailleurs au travers de l'analyse de la répartition spatiale des différents descripteurs un certain degré de redondance entre les variables étudiées. L'objectif est donc ici de hiérarchiser et résumer l'ensemble de cette information pour faciliter l'interprétation des régimes d'étiage sur les bassins examinés et permettre de mieux les discriminer.

Au préalable il nous a semblé utile de rappeler ici les différents descripteurs du régime d'étiage examinés (Tableau II-1). On notera par ailleurs que les variables de sévérité et déficit ont été auparavant normées par le module interannuel (QA). En effet cette opération a pour avantage d'éliminer la composante de variabilité se rapportant directement à la productivité moyenne du bassin, expliquée en grande partie par la surface drainée, et permettra ainsi de mieux faire ressortir les autres processus.

Catégorie	Indice	
Sévérité	Quantile de fréquence au dépassement 90% de la CDC interannuelle	Q90
	Débit moyen mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans	QMNA5
	Débit moyen minimal annuel sur 10 jours de période de retour 5 ans	VCN10(5)
	Débit moyen minimal annuel sur 1 jour de période de retour 5 ans	VCN1(5)
Déficit	Déficit maximal annuel de période de retour 5 ans (défini vis-à-vis du Q90)	defXA(5)
Durée	Durée maximale annuelle de période de retour 5 ans (définie vis-à-vis du Q90)	dXA(5)
Saisonnalité	Seasonality Ratio	SR
Inertie	Base Flow Index	BFI
	Indice de courbure de la CDC interannuelle	Ic
	Rapport Q90/Q50	Qb
	Constante de récession saisonnière	α_{rec}

Tableau II-1 : Rappel des descripteurs du régime d'étiage retenus dans cette application

Enfin, avant de débiter l'analyse proprement dite, nous avons jugé pertinent d'introduire dès maintenant une distinction entre deux classes de saisonnalité. En effet un examen visuel préalable des interrelations entre les 11 descripteurs présentés ci-dessus montre que les bassins présentant des étiages préférentiellement hivernaux ($SR > 1$) semblent nettement s'individualiser du reste de l'échantillon. La Figure II-20 illustre bien cette observation. Ainsi s'il apparaît une relation assez franche entre l'indice SR représentatif des régimes à dominante pluviale ($SR < 1$) et les variables de sévérité (et plus secondairement les variables d'inertie)¹, il semble que cette relation disparaisse dans le cas des régimes nivaux ($SR > 1$) qui se rapportent alors à des processus hydrologiques différents (il s'agit ici des processus de stockage/restitution des précipitations sous forme solide). Il semble donc bien pertinent de différencier d'ores et déjà ces bassins du reste de l'échantillon et d'en faire un groupe à part entière ; celui-ci comprend 22 individus qui, selon la cartographie des régimes hydrologiques établie par Sauquet *et al.* (2008), correspondent effectivement à des bassins à régime nival voire glaciaire.

¹ On rappellera à ce sujet que plus SR tend vers 1 plus les variations saisonnières de débit sont amorties par la présence d'un facteur de régulation tel que l'existence d'échanges nappes-rivières.

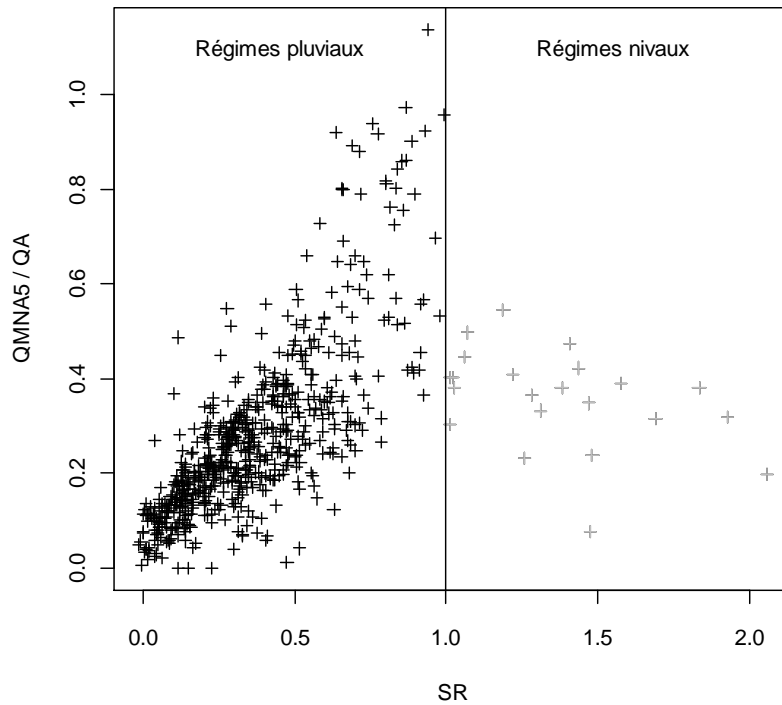


Figure II-20 : Illustration de la discrimination des régimes nivaux et pluviaux sur la base de l'indice de saisonnalité SR.

II.2.1 Définition d'un espace hydrologique parcimonieux par analyse en composante principale

L'analyse en composante principale (ACP) constitue probablement l'un des meilleurs outils pour parvenir aux objectifs énoncés précédemment. Cette technique présente en effet l'avantage de permettre de résumer et hiérarchiser l'information contenue dans le jeu de données au travers d'un nombre limité de dimensions orthogonales (*i.e.* sous la forme de combinaisons linéaires de variables mutuellement décorréelées deux à deux, indépendantes). Les premières dimensions portant le plus de variance (*i.e.* les plus discriminantes) pourront ainsi se substituer aux descripteurs pour définir un nouveau référentiel pertinent vis-à-vis de l'identification des similitudes entre bassins.

L'ACP a été réalisée ici après standardisation des 11 descripteurs du régime d'étiage et exclusion des 22 bassins à régime nival (Figure II-21). A l'issue de cette opération, il apparaît essentiellement un axe factoriel significatif portant de loin la plus grande partie de la variance (35 %) et qui semble mettre en évidence un lien entre les variables de sévérité normées par le module interannuel (fortement corrélées entre elles) et les variables d'inertie, l'indice de saisonnalité et plus secondairement la variable se rapportant au déficit. Ce lien démontre vraisemblablement l'importance des propriétés de vidange (caractérisées au travers de α_{rec}) et/ou la présence de réserves susceptibles d'assurer un débit de base en période sèche pour expliquer la variabilité des régimes d'étiage à l'échelle nationale (mais aussi l'existence d'une saisonnalité plus ou moins marquée). Il s'agira par conséquent du facteur le plus important pour regrouper/discriminer les bassins entre eux.

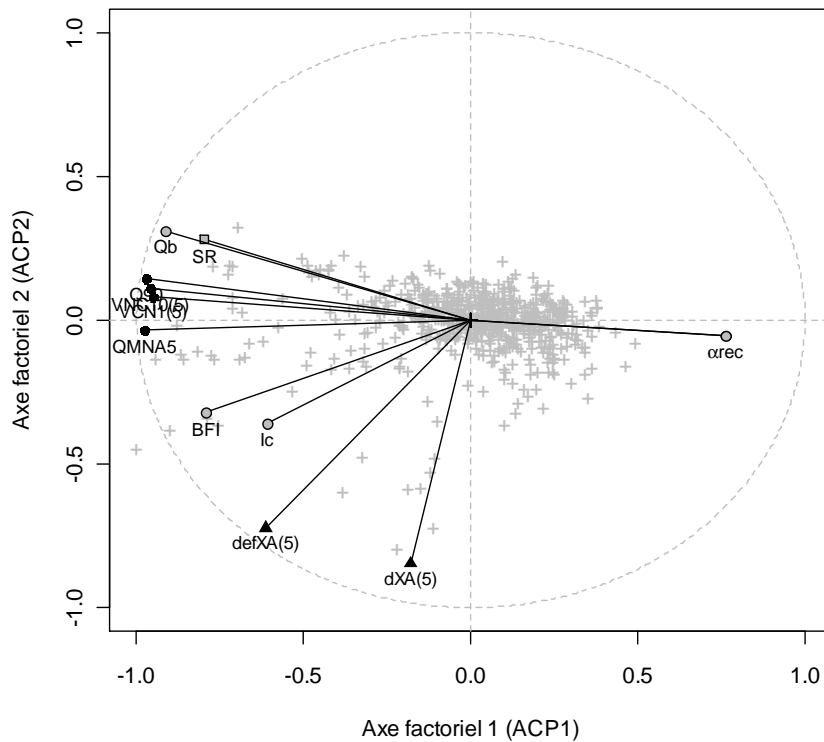


Figure II-21 : Position des indices d'étiage et des sites de l'échantillon (en gris) dans le premier plan factoriel obtenu par ACP

Par contraste, les axes factoriels suivants s'avèrent beaucoup moins intéressants en terme de pouvoir discriminant avec 17 %, 13 %, 9 %... de la variance expliquée. On note cependant que le second axe factoriel apparaît clairement comme porteur de l'information de durée d'étiage (tandis que les axes suivants sont plus difficilement interprétables) à laquelle semble associé la variable de déficit normée (qui porte alors une information intermédiaire entre chacun des deux axes) et beaucoup plus marginalement les variables d'inertie. Au vu de ces résultats il nous a donc paru pertinent de conserver les deux premiers axes factoriels (portant au total 52 % de la variance expliquée et notés *ACP1* et *ACP2* respectivement dans la suite de ce document) pour constituer un espace « hydrologique » parcimonieux susceptible d'aider à l'identification des similitudes entre bassins.

II.2.2 Classification des régimes d'étiage

Suite à l'ACP, une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été mise en œuvre sur la base de la position de chaque individu dans le premier plan factoriel obtenu précédemment (excluant toujours les 22 bassins à régime nival, considérés comme une classe à part entière). Cette classification vise à constituer un ensemble de regroupements permettant de visualiser grossièrement la répartition des régimes d'étiage sur le plan national.

L'arbre de classification obtenu est reporté sur la Figure II-22. Au regard des valeurs du critère de dissemblance (distance de Ward) on constate que 3 classes principales se dégagent assez nettement (les effectifs sont de 88, 224 et 295 respectivement pour les classes 1 à 3). Sans surprise celles-ci se

différencient essentiellement sur la base de la première dimension $ACP1$ avec peu de recouvrement entre les classes tandis la seconde dimension $ACP2$, qui porte l'information de durée, apparaît comme beaucoup moins discriminante si ce n'est que la classe 1 est caractérisée par une forte variabilité avec la présence de sites par des étiages particulièrement longs.

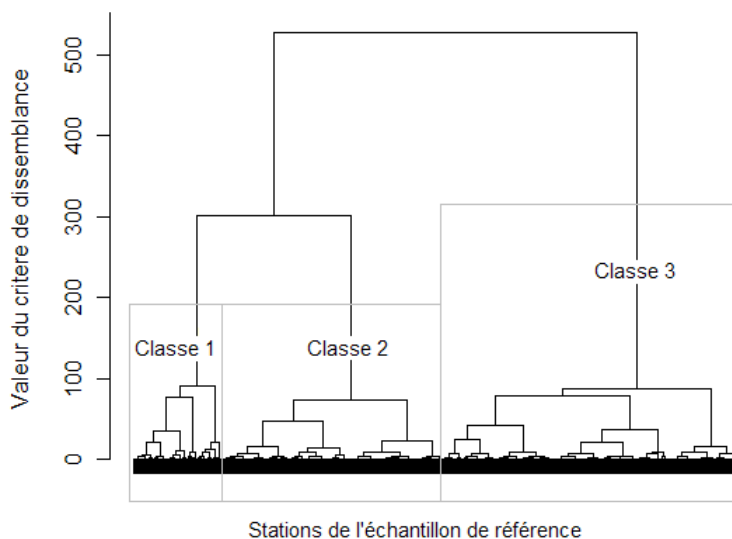


Figure II-22 : Arbre de classification obtenu à l'issue de la CAH

La répartition géographique des différentes classes de régime d'étiage identifiées précédemment et incluant la classe spécifique aux régimes nivaux (Classe 4) est illustrée sur la Figure II-23. On constate ainsi que les bassins appartenant à la première classe se trouvent principalement représentés dans le Bassin Parisien et correspondent à des bassins à forte inertie pour lesquels il existe un facteur de régulation (généralement associé à l'existence d'échanges avec les aquifères) permettant d'amortir la réponse hydrologique vis-à-vis des variations climatiques saisonnières ou infra-saisonnières. Les QMNA5 spécifiques s'y révèlent généralement assez élevés alors que les périodes d'étiage, calquées sur la dynamique interannuelle du niveau des nappes, peuvent perdurer sur plusieurs mois sans pour autant montrer de réelle saisonnalité.

La seconde classe correspond à des régimes intermédiaires que l'on retrouve préférentiellement dans les zones d'altitude modérée ou sous l'influence d'un climat océanique marqué. Dans ce contexte les bassins concernés, bénéficiant de précipitations plutôt abondantes et régulières, connaissent des étiages d'intensité modérée sur des durées relativement limitées et un contraste saisonnier assez peu marqué. Cette classe inclut notamment la plupart des bassins à régime pluvio-nival susceptibles de connaître deux périodes de basses eaux distinctes au cours du cycle hydrologique annuel.

Les bassins de la troisième classe, que l'on retrouve dispersés sur l'ensemble du territoire (à l'exception peut-être du Bassin Parisien), constituent la catégorie de bassins les moins productifs, sans fonction de stockage importante (substratum imperméable) ou subissant des pertes par infiltration et donc particulièrement sensibles à des climats contrastés à saison sèche estivale. Les étiages y sont

particulièrement sévères allant, pour certains bassins, jusqu'à l'absence temporaire d'écoulement tandis que les périodes sans pluie, parfois prolongées, se traduisent par des étiages relativement durables.

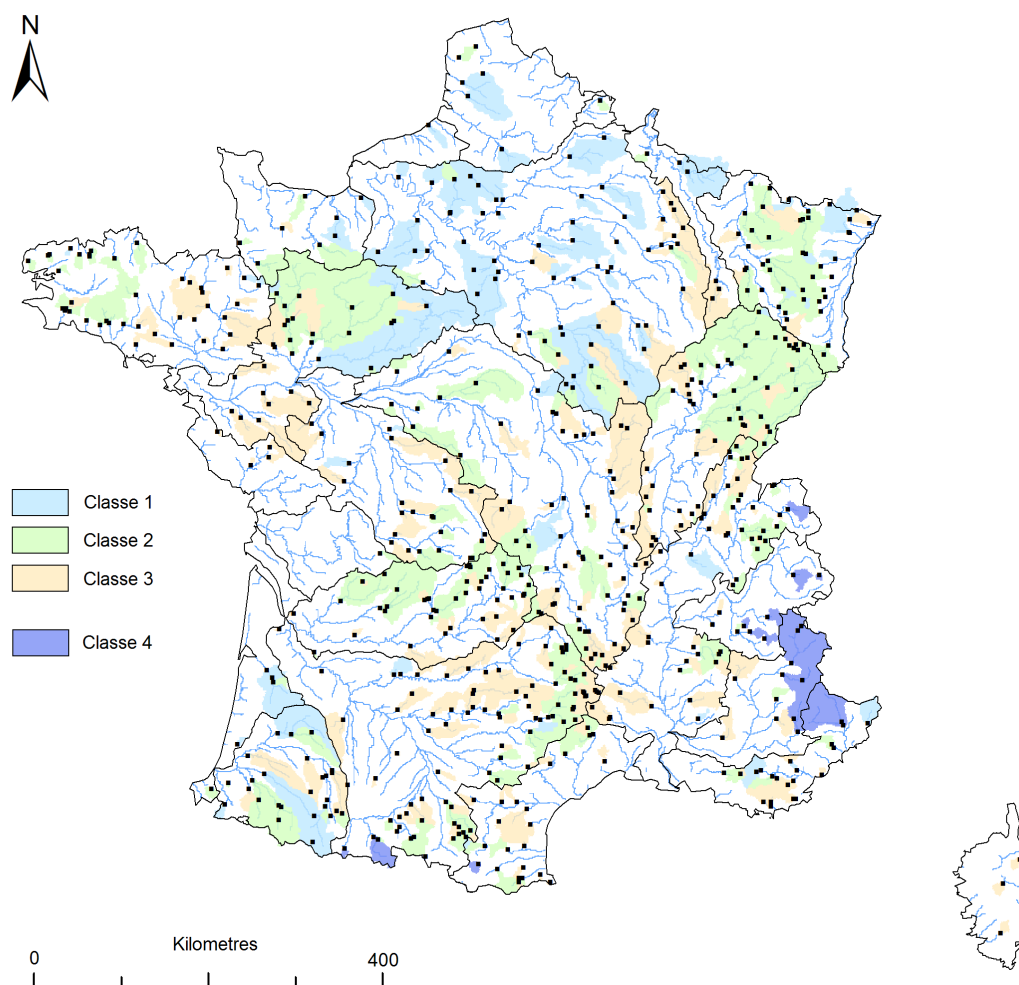


Figure II-23 : Répartition spatiale des 4 classes de régimes d'étiage attribuées à chaque station de l'échantillon de référence

Enfin la dernière des quatre classes se rapporte évidemment aux bassins à régimes niveaux *lato sensu*, dont l'altitude élevée est à l'origine des phénomènes de stockage des précipitation hivernales sous forme solide privant ainsi le bassin d'une partie de ses apports et se traduisant par une diminution sensible du débit sans toutefois conduire à des étiages particulièrement sévères. A l'inverse la fonte progressive de ce stock neigeux au printemps et durant une partie de l'été permet d'assurer un débit relativement élevé et limite voire annule le risque d'étiage à ces périodes de l'année.

Bien entendu cette classification reste relativement grossière et ne donne qu'une vision qualitative des similitudes entre bassins. Elle permet toutefois de constater que certains secteurs présentent une certaine homogénéité et permet de distinguer quelques ensembles régionaux cohérents, assez proches par ailleurs de ceux définis dans la typologie en HER proposée par Wasson *et al.* (2001) (*cf.* section I.2.2). On reconnaît ainsi une nette différenciation entre la partie occidentale de la Bretagne (plus arrosée) et la partie orientale qui se prolonge vers le sud jusqu'en Charente (sur substratum imperméable et périodes

estivales généralement sèches). Le secteur du Bassin Parisien, caractérisé par la présence de nappes étendues susceptibles d'alimenter les cours d'eau en période sèche, semble également bien s'individualiser avec une nette prédominance de la classe 1. En revanche l'homogénéité s'avère beaucoup plus incertaine (à cette échelle) sur une vaste partie centrale de la France, ceci semble témoigner de l'absence de facteurs régionaux réellement dominants (climat, géologie, relief) à l'origine d'un comportement plus ou moins uniforme des bassins.

II.3 Conclusion du chapitre

La description et la caractérisation des régimes d'étiage réalisée au cours de ce chapitre se sont appuyées sur différents indicateurs statistiques obtenus par traitement des chroniques de l'échantillon de référence. Outre le QMNA5 qui constitue la variable cible de ces travaux, il s'agissait de disposer de descripteurs relatifs à différents aspects du régime d'étiage (sévérité, durée, débit de base...) pour permettre de mieux appréhender et discriminer les processus à l'origine des différents comportements hydrologiques existant sur le plan national.

Si l'analyse de ces différents indicateurs, examinés individuellement, a permis de formuler un certain nombre d'observations préliminaires sur les caractéristiques respectives des différents bassins, c'est surtout grâce à l'emploi de techniques d'analyse multivariée telles que l'Analyse en Composante Principale (ACP) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) qu'il a été possible de résumer et synthétiser l'information disponible pour mieux identifier les similitudes entre bassins. Ainsi il est tout d'abord apparu pertinent d'individualiser, sur la base de la saisonnalité des étiages, une catégorie particulière de bassins se rapportant aux cours d'eau à régime nival pour lesquels les étiages se produisent préférentiellement durant la saison hivernale suite au stockage des précipitations sous forme solide. Ces bassins, assez peu nombreux dans notre échantillon de référence (22 bassins au total sont concernés), se trouvent évidemment cantonnés aux principales zones de relief que sont les Alpes et le Pyrénées. Sur le reste du territoire, l'ACP a permis de montrer que le processus le plus discriminant se rapportait à l'existence d'un facteur de régulation susceptible de maintenir un débit de base élevé durant les périodes sans précipitations. Ce rôle est généralement assuré par les aquifères et il apparaît alors clairement un lien entre la nature plus ou moins perméable du substratum (i.e. sa capacité à accueillir des réserves souterraines) et la sévérité des étiages. Il est également possible de soupçonner un rôle du climat qui, selon le caractère plus ou moins régulier et abondant des précipitations durant la période estivale, conduit à des durées et/ou des intensités d'étiages plus ou moins prononcées. La CAH a bien permis de discriminer ces différents caractères et, outre la catégorie de bassins à régime nival, a permis de faire ressortir trois autres classes de bassins selon la plus ou moins forte inertie de la réponse hydrologique aux variations climatiques.

Ces informations constituent un bon référentiel pour une meilleure compréhension des résultats à venir et nous verrons notamment au Chapitre V comment il sera possible de les exploiter pour améliorer l'efficacité des méthodes de prédétermination du QMNA5 en sites non jaugés.

Références bibliographiques

- Aschwanden H., Kan C. (1999). Le débit d'étiage Q347 – Etat de la question. Service hydrologique et géologique national, Communications hydrologique No. 27, pp. 132.
- Beran M.A., Gustard A. (1977). A study into the low-flow characteristics of British rivers. *Journal of Hydrology*, Vol. 35(1-2), pp. 147-157.
- Bulu A. (1997). Statistical analysis of low flows with zero discharges. FRIEND: Flow Regimes from International Experimental and Network Data, Third Report, pp. 167-170.
- Burn D.H., (1997). Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *Journal of Hydrology*, Vol. 202(1-4), pp. 212-230.
- Chalise S.R., Kansakar S.R., Rees G., Coroker K., Zaidman M. (2003). Management of water resources and low flow estimation for the Himalayan basins of Nepal. *Journal of Hydrology*, Vol. 282(1-4), pp. 25-35.
- Chen Y. D. (2006). Regional analysis of low flow using L-moments for Dongjiang Basin, South China. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 51(6), pp. 1051–1064.
- Clausen B., Pearson C.P. (1995). Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought. *Journal of Hydrology*, Vol. 173(1-4), pp. 111-130.
- Dickinson W.T., Holland M.E., Smith G.L. (1967). An experimental rainfall-runoff facility. *Hydrol. Pap.*, Vol. 25, 81 pp., Colo. State Univ., Fort Collins.
- Dingman S.L., Lawlor S.C. (1995). Estimating low-flow quantiles from drainage-basin characteristics in New Hampshire and Vermont. *Water Resources Bulletin*, Vol. 31(2), pp. 243-256.
- Eratakulan S.J. (1970). Probability distribution of annual droughts. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 96(IR4), pp. 461-474.
- Fleig A.K., Tallaksen L.M., Hisdal H., Demuth S. (2005). A global evaluation of Streamflow drought characteristics. University of Oslo (Norvège).
- Gordon N.D., McMahon T.A., Finlayson B.L. (1992). *Stream Hydrology (An Introduction for Ecologists)*. Wiley, New York, 526 pp.
- Gottschalk L., Tallaksen L.M., Perzyna G. (1997). Derivation of low flow distribution functions using recession curves. *Journal of Hydrology*, Vol. 194(1-4), pp. 239-262.
- Griffiths G.A., Clausen B. (1997). Streamflow recession in basins with multiple water storages. *Journal of Hydrology*, Vol. 190(1-2), pp. 60-74.
- Gustard A., Roald L.A., Demuth S., Lumadjeng H.S., Gross R. (1989). *Flow Regimes from Experimental and Network Data (FRIEND)*, Vol. 1, Hydrological Studies. Institute of Hydrology, Wallingford, UK

- Gustard A., Bullock A., Dixon J.M. (1992). Low flow estimation in the United Kingdom. Institute of Hydrology, Report No. 108, 88 pp., append.
- Haan C.T. (1977). Statistical Methods in Hydrology. Iowa State University Press, Ames, IA.
- Hall F.R. (1968). Base flow recessions - a review. *Water Resources Research*, Vol. 4(5), pp. 973-983.
- Hall A. J. (1971). Baseflow recessions and baseflow hydrograph separation problem. In : *Hydrology Symposium*, pp. 159-170, Institution of Engineers, Australia, Canberra.
- Hayes D.C (1991). Low flow characteristics of streams in Virginia. USGS water supply, Paper 2374.
- Holmes M.G.R., Young A.R., Gustard A., Grew R. (2002). A Region of Influence approach to predicting Flow Duration Curves within ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 6(4), pp. 721-731.
- Institute of Hydrology (1980). Low-flow studies. Report No. 1, Wallingford, Oxon, U.K.
- Kaabi A. (1994). Régionalisation des étiages dans le nord-ouest de l'Algérie. Ph.D Thesis - Université Joseph Fourier à Grenoble. GIS Hydrologie AMHY-France, Cemagref (Groupement de Lyon), ANRH (Alger).
- Kjeldsen T.R, Lundorf A., Rosbjerg D. (2000). Use of a two component exponential distribution in partial duration modelling hydrological droughts in Zimbabwean rivers. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 45(2), pp. 285-298.
- Klaassen B., Pilgrim D.H. (1975). Hydrograph recession constants for New South Wales streams. *Inst. Engng. Civil Engng. Trans. CE17*, pp. 43-49.
- Laaha G. (2002). Modelling summer and winter droughts as a basis for estimating river low flows. In : *FRIEND 2002 - Regional Hydrology : Bridging the Gap between Research and Practice. Proceedings of the Fourth International Conference held in Cape Town, South Africa, March 2002. IAHS Publ. 274*, pp. 289-295.
- Laaha G., Blöschl G. (2006b). The value of seasonality indices for regionalizing low flows. *Hydrological Processes*, Vol. 20(18), pp. 3851-3878.
- Lang Delus C. (2011). Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. *Cybergeog : European Journal of Geography [En ligne]*, Environnement, Nature, Paysage, article 571.
- Langbein W.B. (1938). Some channel storage studies and their application to the determination of infiltration. *Eos Trans. AGU*, Vol. 19, pp. 435-447.
- Lvovich M.I. (1972). Hydrologic budget of continents and estimate of the balance of global fresh water resources. *Sov. Hydrol.*, Vol. 4.
- Lyne V., Hollick M. (1979). Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. I.E. Aust.. *Natl. Conf. Publ. 79/10*, pp. 89-93, Inst. of Eng., Aust., Canberra.
- Madsen H., Rosberg D. (1997a). The partial duration series method in regional index-flood modelling. *Water Resources Research*, Vol. 33(4), pp. 737-746.

- Mardia K. (1972). *Statistics of Directional Data : Probability and Mathematical Statistics*. Academic Press: London.
- Matalas N.C. (1963). Probability distribution of low flows. USGS Prof. Pap. 434-A, Washington, D.C.
- Mathier L., Perreault L., Bobée B. (1992). The uses of geometric and gamma related distributions for frequency analysis of water deficit. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 6(4), pp. 239-254.
- McMahon T.A., Mein R.G. (1986). *River and reservoir yield*. Water Resource Publication, CO, 368 pp.
- Meigh J., Tate E., McCartney M. (2002). Methods for identifying and monitoring river flow drought in southern Africa. In : FRIEND 2002 – Regional Hydrology : Bridging the Gap between Research and Practice. Proceedings of the Fourth International Conference held in Cape Town, South Africa, March 2002. IAHS Publ. 274, pp. 289-295.
- Midgley D.C., Pitman W.V., Middleton B.J. (1994). Surface water resources of South Africa 1990. Water Research Commission, Report No 298/5.1/94, Pretoria, South Africa.
- Modarres R. (2008). Regional frequency distribution type of low flow in north of Iran by L-moments. *Water Resources Management*, Vol. 22(7), pp. 823-841.
- Nathan R.J., McMahon T.A. (1990a). Identification of homogeneous regions for the purpose of regionalization. *Journal of Hydrology*, Vol. 121(1-4), pp. 217-238.
- Nathan R.J., McMahon T.A., (1990b). Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses. *Water Resources Research*, Vol. 26(7), pp. 1465-1473.
- Nathan R.J., McMahon T.A. (1990c). Practical aspects of low-flow frequency analysis. *Water Resources Research*, Vol. 26(9), pp. 2135-2141.
- Nathan R.J., McMahon T.A. (1992). Estimating Low Flow Characteristics at Ungauged Catchments. *Water Resources Management*, Vol. 6(2), pp. 85-100.
- Pearce A.J. (1990). Streamflow generation process, an austral view. *Water resources research*, Vol. 26(12), pp. 3037-3047.
- Piggott A.R., Moin S., Southam C. (2005). A revised approach to the UKIH method for the calculation of baseflow. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 50(5), pp. 1-920.
- Pyrce R. (2004). *Hydrological Low Flow Indices and their Use*. Watershed Science Centre, Report No. 04-2004, 37 pp.
- Rivera-Ramírez H.D., Warner G.S., Scatena F.N. (2002). Prediction of master recession curves and baseflow recessions in the Luquillo mountains of Puerto Rico. *Journal of American water resources association*, Vol. 38(3), pp. 793-704.
- Sauquet E., Gottschalk L., Krasovskaia I. (2008). Estimating mean monthly runoff at ungauged locations : an application to France. *Hydrology Research*, Vol. 39(5-6), pp. 403-423.

- Sauquet E., Catalogne C. (2011). Comparison of catchment grouping methods for flow duration curve estimation at ungauged sites in France. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, pp. 2421-2435.
- Schreiber P., Demuth S. (1997). Regionalisation of low flows in southwest Germany. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 42(6), pp. 845-858.
- Shi P., Chen X., Qu S., Zhang Z., Ma J. (2010). Regional Frequency Analysis of Low Flow Based on L-Moments: Case Study in Karst Area, Southwest China. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 15(5), pp. 370-377
- Smakhtin V.Y., Watkins D.A. (1997). Low-flow estimation in South Africa. Water Research Commission Report No. 494/1/97, Pretoria, South Africa.
- Smakhtin V.Y. (2001). Low flow hydrology : a review. *Journal of hydrology*, Vol. 240(3-4), pp.147-186.
- Snyder F.F. (1939). A concept of runoff-phenomena. *Eos Trans. AGU*, Vol. 20, pp. 725-738.
- Stedinger J.R., Thomas W.O. (1985). Low-flow frequency estimation using base-flow measurements. USGS Scientific Investigations, Report 85-95.
- Stedinger J.R., Vogel R.M., Foufoula-Georgiou E. (1993). Frequency analysis of extreme events. In : Maidment, D.R. (Ed.), *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, New York (chap. 18).
- Stuckey M.H. (2006). Low-flow, base-flow, and mean-flow regression equations for Pennsylvania streams. USGS Scientific Investigations, Report 2006-5130, 84 pp.
- Tallaksen L.M. (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, Vol. 165(1-4), pp. 349-370.
- Tallaksen L.M., Hisdal, H. (1997). Regional analysis of extreme streamflow drought duration and deficit volume. FRIEND – Regional Hydrology : Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management, IAHS Publication No. 246, pp. 141–150.
- Tallaksen L.M., Madsen H., Clausen B. (1997). On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 42(1), pp. 15-33.
- Tallaksen L.M., Van Lanen H.A.J. (2004). (Eds) *Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Developments in Water Sciences 48. Elsevier B.V., the Netherlands, 580 pp.
- Tate E.L., Meigh J., Prudhomme C., McCartney M. (2000). Drought assessment in Southern Africa using river flow data. Rep. No. DFID 00/4, Institute of Hydrology, Wallingford, and Department for International Development (DFID), U.K.
- Thomas D.M., Benson M.A. (1970). Generalization of Streamflow characteristics from drainage-basin characteristics. USGS Water Supply, Paper 1975.
- Toebe C., Strang D.D. (1964). On recession curves. 1. Recession equations. *J. Hydrol. NZ*, Vol. 3(2), pp. 2-15.

- Vogel R.M., Stedinger J.R. (1987). Generalized storage-reliability-yield relationships. *Journal of Hydrology*, Vol. 89(3-4), pp. 303-327.
- Vogel R.M., Kroll C.N. (1991). The value of streamflow record augmentation procedures in low-flow and flood-flow frequency analysis. *Journal of Hydrology*, Vol. 125(3-4), pp. 259-276.
- Vogel R.M., Kroll C.N. (1992). Regional geohydrologic-geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics. *Water Resources Research*, Vol. 28(9), pp. 2451-2458.
- Vogel R.M., Kroll C.N. (1996). Estimation of baseflow recession constants. *Water Resources Management*, Vol. 10(4), pp. 303-320.
- Vogel R.M., Fennessey N.M. (1995). Flow duration curves – 2 : New interpretation and confidence intervals. *Journal of water resources planning and management*, Vol. 120(4), pp. 485-504.
- Vogel R.M., Fennessey N.M. (1995). Flow duration curves – 2 : A review of applications in water resources planning. *Water Resources Bulletin*, Vol. 31(6), pp. 1029-1039.
- Weisman R.N. (1978). Characterizing low flows using threshold levels. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, Vol. 104(2), pp. 231-235.
- Werner P.W., Sundquist K.J. (1951). On the groundwater recession curve for large watersheds. *IAHS Publication*, Vol. 33, pp. 202-212.
- Yevjevich V. (1967). An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Hydrologic Paper No. 23*, Colorado State University, Fort Collins.
- Young A.R., Round C.E., Gustard A. (2000). Spatial and temporal variations in the occurrence of low flow events in the UK. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 4, pp. 35-45.
- Zelenhasic E., Salvai A. (1987). A method of streamflow drought analysis. *Water Resources Research*, Vol. 23(1), pp. 156-168.
- Zucchini W., Adamson P.T. (1984). Assessing risk of deficiencies in streamflow. *Water Res. Comm. Rep.*, Vol. 91(2), Univ. of Stellenbosch, Stellenbosch, S.A.
- WMO (2008). *Manual on Low-flow Estimation and Prediction*. Operational Hydrology Report n°50, 136 pp.

DEUXIEME PARTIE

ESTIMATION DU QMNA5 EN SITES PEU JAUGES

Chapitre III.

Estimation du QMNA5 par valorisation de chroniques courtes

L'étape de critique et de sélection de données à caractère hydrologique réalisée au Chapitre I nous a conduit à exclure de notre jeu de stations de référence celles qui ne présentaient pas une longueur de chronique suffisante (*i.e.* au moins 26 années) pour permettre la détermination fiable du QMNA5 par ajustement statistique. Néanmoins ces données, que l'on qualifiera (un peu abusivement pour certaines) de « chroniques courtes », constituent tout de même une source d'information particulièrement précieuse dans la mesure où, comme le suggère la littérature, leur valorisation dans le cadre des approches de prédétermination des débits caractéristiques d'étiage permet généralement de réduire sensiblement les incertitudes d'estimation par rapport à la mise en oeuvre de techniques en l'absence d'observation de débits (*i.e.* en sites non jaugés). Les estimations obtenues permettront alors de combler certaines des lacunes laissées par le jeu de données de référence en termes de couverture spatiale ou vis-à-vis de certains contextes hydro-climatiques peu représentés (par exemple pour les petits et très petits bassins, *cf.* section I.1.3).

Ce chapitre est ainsi consacré à la présentation des méthodes employées pour parvenir à l'estimation du QMNA5 à partir de l'exploitation des chroniques courtes. Celles-ci ont été confrontées au travers d'une démarche de validation croisée menée à partir de l'échantillon de 632 stations de référence de manière à déterminer les incertitudes propres à chacune des modalités examinées et ainsi dégager un protocole optimal pour une application à l'échantillon de chroniques courtes effectivement disponibles sur le territoire.

III.1 Eléments de méthodologie

Nous nous proposons d'exposer ici les éléments de méthodologie mis en œuvre pour permettre l'estimation du QMNA5 à partir de chroniques courtes et déterminer les incertitudes associées. Ceux-ci s'inspirent évidemment des travaux relevés dans la littérature dont est tout d'abord présenté un état de l'art. Il a cependant été nécessaire d'apporter des modifications pour adapter les techniques existantes à nos propres objectifs.

III.1.1 Etat de l'art des méthodes d'estimation

Dans la littérature, les études se rapportant à l'exploitation de chroniques courtes pour la prédétermination de variables hydrologiques se révèlent étonnamment rares et, malgré l'intérêt que présente la démarche, celles-ci ne sont mentionnées que de manière très marginale (voire omises) dans les principales revues bibliographiques relatives à l'estimation de variables caractéristiques d'étiage (Smakhtin (2001), Tallaksen et Van Lanen (2004), WMO (2011)). Parmi les techniques identifiées il est possible de distinguer deux familles principales. La première, que l'on peut qualifier de généraliste et qui ne sera pas développée ici en détail (*cf.* orientation des travaux énoncés en Introduction), inclut différentes méthodes consistant à prolonger (ou compléter) la chronique du site cible pour ensuite en extraire la ou les variable(s) hydrologique(s) recherchée(s) (e.g. Hirsch (1982), Hughes et Smakhtin (1996)). La seconde regroupe les techniques visant à estimer directement la variable étudiée. Il s'agit alors de « corriger » la valeur connue sur le court terme (*i.e.* extraite de la période de chronique disponible au site cible), en tenant compte d'une éventuelle dérive attribuée aux particularités climatiques de la période d'observation disponible (*i.e.* période « plus humide » ou « plus sèche ») par rapport à la valeur attendue sur le long terme. Cette prise en compte de la variabilité climatique est parfois qualifiée dans la littérature de « réajustement climatique » (« climate adjustment method », Laaha et Blöschl (2005)) et se traduit dans le cas le plus simple par la détermination d'un facteur correctif k tel que :

$$Q_{cib(LT)} = k \cdot Q_{cib(ST)} \quad (III.1)$$

où $Q_{cib(LT)}$ est la variable de débit recherchée sur le long terme au site cible et $Q_{cib(ST)}$ est la même variable extraite de la période de chronique disponible.

S'il pourrait être envisagé de se baser directement sur l'emploi de données à caractère climatique pour expliquer et déterminer k au site cible, comme suggéré par Nicolle *et al.* (2012), la presque totalité des travaux relevés dans la littérature préfère employer l'information d'un site de référence voisin disposant d'une chronique longue incluant la période d'observation disponible au site cible. Bien que rarement justifié ainsi, l'avantage est alors de prendre en compte implicitement l'inertie de la réponse du bassin aux variations climatiques. Le facteur correctif k est alors simplement déduit du rapport entre la variable de débit connue sur le long terme au site de référence $Q_{ref(LT)}$ et celle extraite de la période de chronique concomitante à celle disponible au site cible $Q_{ref(ST)}$:

$$k = \frac{Q_{ref(LT)}}{Q_{ref(ST)}} \quad (III.2)$$

Il est ainsi fait l'hypothèse que les variations climatiques et la réponse des bassins à ces variations sont identiques au site cible et au site d'appui.

Pour tenir compte de la plus ou moins forte validité de cette hypothèse selon le site de référence employé et ainsi accorder plus ou moins de confiance au réajustement opéré, Laaha et Blöschl (2005), dans une application dédiée à l'estimation du Q95 sur 325 bassins autrichiens et s'inspirant de travaux analogues réalisés par Robson (1999) dans le cadre de variables se rapportant aux crues, suggèrent de corriger la valeur de k en introduisant un exposant $M(r)$ permettant de tenir compte du degré de corrélation entre les séries annuelles de Q95 sur la période concomitante aux sites cible et de référence mais aussi du nombre d'années en commun :

$$k = \left(\frac{Q_{ref(LT)}}{Q_{ref(ST)}} \right)^{M(r)} \quad \text{où} \quad M(r) = \frac{(n_0 - 3) \cdot r^3}{(n_0 - 4) \cdot r^2 + 1} \quad (III.3)$$

où r est le coefficient de corrélation de Pearson entre les séries annuelles de Q95 et n_0 est le nombre d'années de chronique communes au site cible et aux différents sites de référence. Ainsi un exposant proche de 1 confèrera un maximum de poids au réajustement tandis qu'un exposant proche de zéro reviendra à ne pas effectuer de réajustement ($k^{M(r)=0} = 1$ et $Q_{cib(LT)} = Q_{cib(ST)}$) et considérer la valeur de court terme $Q_{cib(ST)}$ comme plus informative. Bien que la fiabilité du coefficient de corrélation ainsi calculé soit faible dans le cas de chroniques courtes (comme rappelé par les auteurs), Laaha et Blöschl (2005) montrent que le recours à cette pondération permet d'améliorer (quoique assez marginalement) les performances d'estimation du Q95.

On signalera que cette prise en compte de la corrélation entre les chroniques des sites cible et de référence relève en réalité d'une technique d'ajustement initialement introduite par Fiering (1963) et Matalas et Jacob (1964) pour la détermination des statistiques de moyenne et de variance d'une courte série de débit. Cette approche, perfectionnée par Vogel et Stedinger (1985), a été notamment reprise par Vogel et Kroll (1991) dans le cadre de la caractérisation fréquentielle des étiages. La procédure proposée permet alors de fournir une estimation corrigée de la moyenne et de la variance d'une courte série de débits minimums annuels (VCN*d*) au site cible en s'appuyant sur les données d'un site de référence voisin et en tenant compte d'un coefficient analogue à $M(r)$. Les paramètres ainsi réajustés sont ensuite employés en tant que paramètres d'une distribution Log-Normale (estimateurs non biaisés du maximum de vraisemblance) pour la détermination des quantiles de VCN*d* de périodes de retour $T = 2, 10$ et 20 ans au site cible.

Différents auteurs se sont également interrogés sur la possibilité d'employer plusieurs sites de référence pour accroître la robustesse des estimations. Pour ce faire Bakke *et al.* (1999), dans le cadre de l'estimation des douze valeurs de débits médians mensuels interannuels, proposent de déterminer une

valeur de k régionale au moyen d'une régression linéaire entre les valeurs de court terme $Q_{ref(ST)}$ (e.g. débits médians de juillet sur 3 ans) et de long terme $Q_{ref(LT)}$ (e.g. débit médian de juillet sur 30 ans) d'un ensemble de sites de référence voisins du site cible (méthode dénommée RAR pour « Regional Adjustment Relationship »).

Pour leur part, Laaha et Blöschl (2005) préfèrent réaliser une simple moyenne géométrique des estimations obtenues dans le voisinage du site cible. Ils proposent cependant d'introduire une pondération permettant de tenir compte de la distance d_i séparant le site cible de chaque site de référence¹ mais aussi de la longueur de chronique en commun n_0 par rapport à la longueur totale de la chronique disponible au site de référence n_d (avec k_i corrigé du coefficient $M(r)$ ou non) :

$$Q_{cib(LT)} = \prod_{i=1}^n (k_i \cdot Q_{cib(ST)})^{\frac{w_i}{\sum w_i}} \quad \text{où} \quad w_i = \left(1 - \frac{d_i}{120}\right) \cdot n_0 \cdot (n_d - n_0) \quad (III.4)$$

III.1.2 Application à l'estimation du QMNA5

Dans cette application, nous nous proposons d'exploiter la méthode par réajustement climatique pour permettre l'estimation du QMNA5 à partir de chroniques courtes comprenant de $D = 1$ à $D = 25$ années complètes (i.e. années sans lacunes) d'enregistrement au pas de temps journalier. Il s'agit ainsi de valoriser l'ensemble des chroniques disponibles dont la durée ne permet pas directement la détermination d'un QMNA5 fiable par ajustement statistique. Pour ce faire, il nous a paru intéressant d'adapter et confronter les approches proposées par Laaha et Blöschl (2005) et Bakke *et al.* (1999) pour déterminer une valeur de k « régionale » mais aussi d'examiner différents modes de sélection des sites de référence et enfin de déterminer l'influence de la durée des chroniques sur les résultats.

Ces différents aspects ont été examinés au travers d'une démarche de validation croisée consistant à (i) considérer successivement chaque chronique du jeu de 632 sites de référence comme un site cible en y simulant une chronique courte par échantillonnage aléatoire (i.e. tirage dans une loi uniforme) d'une sous-période de D années consécutives (sauf présence de lacunes) et (ii) quantifier les performances d'estimation du QMNA5 propres à chaque modalité de réajustement examinée. Pour chaque site et chaque durée de chronique D , la procédure est répétée 100 fois de manière à s'assurer d'avoir *a minima* exploré toutes les sous-périodes possibles sur la période de référence 1970-2005.

Etant donné que le recours à un ajustement statistique par maximum de vraisemblance pour déterminer un QMNA5 paraît déraisonnable pour les chroniques ne comprenant pas suffisamment d'années d'enregistrement (en particulier lorsque la durée de la chronique simulée est inférieure à 5 années), il a été recherché une variable $Q_{(ST)}$ de « substitution » pouvant être aisément extraite de la période de chronique pour réaliser le réajustement. Différents essais (QMNA moyen, Q95...) ont finalement permis de retenir le QMNA5 empirique (déterminé par interpolation linéaire entre les deux valeurs observées de fréquence empirique $f(i) > 0.2 > f(i + 1)$) en s'appuyant sur la formule de Tukey

¹ Le mode de calcul entre ces sites n'est pas clairement exposé

(1962) qui permet de ne pas faire d'hypothèse sur la distribution des quantiles : $f(i) = (i - 1/3) / (n + 1/3)$). On signalera toutefois le cas particulier où $D = 1$ année pour lequel la variable de « substitution » utilisée correspond par défaut à la valeur de QMNA de l'année considérée.

Comme proposé précédemment, la détermination du facteur correctif k au cours de chaque simulation a ensuite été réalisée de deux manières en s'appuyant sur les données d'un ensemble de i sites de référence voisins du site cible (cf. section III.1.3) :

- (A) en calculant la moyenne des $i = 1, \dots, n$ valeurs de $k_i = QMNA5_{ref(LT)_i} / QMNA5_{ref(ST)_i}$ (approche comparable à celle de Laaha et Blöschl (2005) en appliquant cependant une moyenne arithmétique)
- (B) en ajustant une relation linéaire entre les $i = 1, \dots, n$ couples de valeurs $QMNA5_{ref(ST)_i}$ et $QMNA5_{ref(LT)_i}$, l'ordonnée à l'origine étant imposée à 0 (approche comparable à celle de Bakke *et al.* (1999)).

Dans le premier cas on précisera que le calcul de la valeur de k moyenne régionale a été réalisé avec et sans introduction d'un exposant analogue à $M(r)$ ce qui conduit en réalité à appliquer trois méthodes de réajustement distinctes, désignées respectivement méthodes $A1$, $A2$ et B dans la suite de ce document. Pour ce faire, il a cependant été choisi de s'écarter de l'approche proposée par Laaha et Blöschl (2005) en ne considérant plus un exposant $M(r)$ propre à chaque site de référence mais en introduisant plutôt celui-ci comme une mesure de confiance globale dans la valeur de k moyenne régionale en fonction de l'homogénéité du voisinage du site cible et du nombre d'années de chronique disponible à celui-ci. Autrement dit, plus la chronique sera longue et le voisinage hétérogène plus il sera accordé de confiance à $Q_{cib(ST)}$ au détriment du réajustement. Ainsi il a été choisi de définir un nouvel exposant tel que :

$$M(CV_k) = (1 - CV_k)^{D/10} \quad \text{avec} \quad CV_k = \frac{\sigma_k}{k} \quad (III.5)$$

avec CV_k le coefficient de variation de k (en bornant celui-ci à 1) pris comme mesure de l'homogénéité régionale et D la durée de la chronique disponible au site cible ($D/10$ est apparu, après quelques essais préalables, comme le meilleur compromis pour tenir compte de l'effet de la longueur des chroniques sur la pertinence du réajustement). Pour mieux appréhender l'effet de cet exposant sur la valeur de k moyenne, la Figure III-1 illustre le niveau de correction appliqué en fonction du nombre d'années de chronique disponible et pour deux niveaux de dispersion distincts ($(1 - CV_k) = 0.5$ correspondant à un voisinage « peu homogène » et $(1 - CV_k) = 0.95$ correspondant à un voisinage « homogène »). Il apparaît ainsi clairement que le degré de réajustement sera d'autant plus atténué (au profit de la variable de court terme extraite au site cible, $k^{M(CV_k)}$ proche de 1) que l'homogénéité régionale est faible et que la durée de la chronique disponible est importante. La Figure III-1 montre également que la correction agit logiquement assez peu lorsque la valeur de k moyenne régionale s'approche de 1 et de plus en plus fortement lorsque l'on s'éloigne de cette valeur.

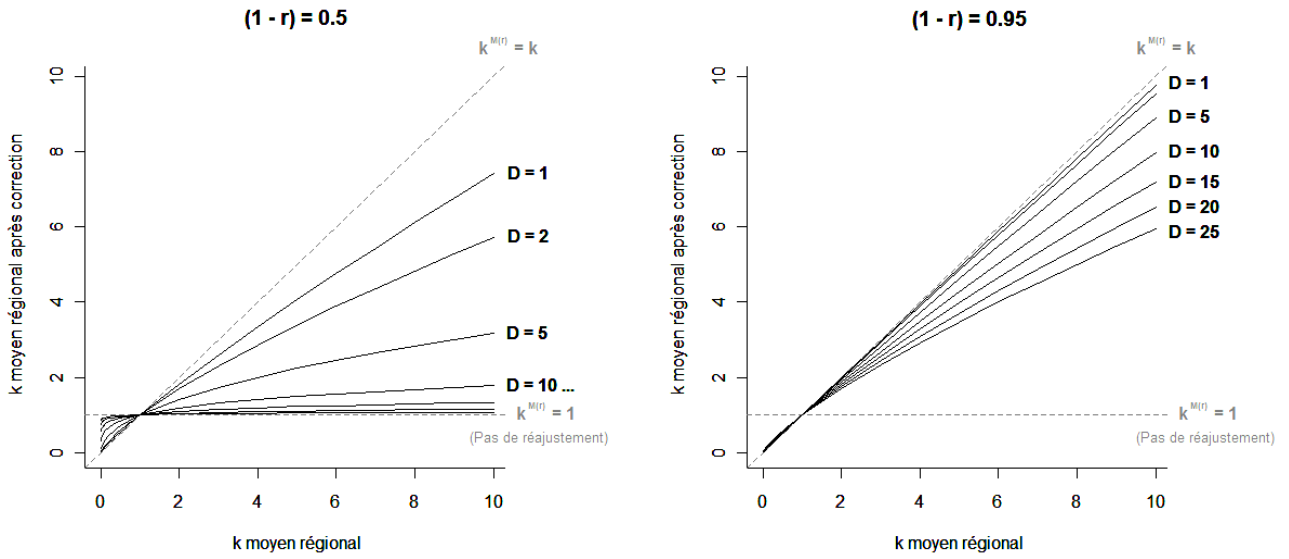


Figure III-1 : Correction appliquée à la valeur de k moyenne régionale en fonction du degré d'homogénéité du voisinage et de la durée de la chronique disponible au site cible

Dans chaque cas examiné, le calcul du facteur k est réalisé à partir des valeurs de débit spécifique (exprimées en $l/s/km^2$) et associé au calcul d'un intervalle de confiance à 95 % (exprimé dans la même unité) permettant d'encadrer la valeur de QMNA5 estimée au site cible. Pour ce dernier, il est fait l'hypothèse que la distribution des valeurs de k dans le voisinage du site cible appartient à une population gaussienne. Ainsi dans le cas d'une valeur de k moyenne (méthode A1) il s'exprimera tel que :

$$P(Q_{cib(EST)} - Q_{cib(ST)} \cdot t_{\alpha/2} \cdot \sigma_k < Q_{cib(LT)} < Q_{cib(EST)} + Q_{cib(ST)} \cdot t_{\alpha/2} \cdot \sigma_k) \approx 0.95$$

(III.6)

avec $Q_{cib(EST)}$ la valeur de QMNA5 estimée au site cible, $Q_{cib(LT)}$ la valeur de QMNA5 effectivement observée au site cible, $Q_{cib(ST)}$ la valeur de QMNA5 empirique extraite de la période de chronique disponible au site cible, σ_k l'écart type des valeurs de k obtenues aux n sites de référence inclus dans le voisinage du site cible et $t_{\alpha/2}$ le quantile d'ordre $\alpha/2$ de la loi de Student à $n-2$ degrés de liberté ($\alpha = 0.05$ pour un intervalle de confiance à 95%).

Précisons que lorsque l'exposant $M(CV_k)$ est introduit dans la procédure (méthode A2), il est nécessaire de modifier la formulation de l'écart type telle que :

$$\sigma_{k^{M(CV_k)}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^n (k_i - k^{M(CV_k)})^2}$$

(III.7)

Dans le cas de la détermination de k par régression linéaire (méthode B), l'intervalle s'exprimera en revanche par :

$$P\left(Q_{cib(EST)} - t_{\alpha/2} \cdot \sigma_{Q_{cib(est)}} < Q_{cib(LT)} < Q_{cib(EST)} + t_{\alpha/2} \cdot \sigma_{Q_{cib(est)}}\right) \approx 0.95 \quad (III.8)$$

où

$$\sigma_{Q_{cib(EST)}} = \sqrt{\text{Var}(Q_{ref(EST)} - Q_{ref(LT)}) \cdot \left(1 + \frac{1}{n} + \frac{\left(Q_{cib(ST)} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{ref(ST)_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(Q_{ref(ST)_i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{ref(ST)_i}\right)^2}\right)} \quad (III.9)$$

avec $\text{Var}(Q_{ref(EST)} - Q_{ref(LT)})$ la variance des résidus de la régression entre $Q_{ref(ST)}$ et $Q_{ref(LT)}$, $Q_{cib(ST)}$ la valeur de QMNA5 empirique extraite de la période de chronique disponible au site cible, $Q_{ref(ST)_i}$ les valeurs de QMNA5 empiriques extraites aux $i = 1, \dots, n$ sites de référence et $t_{\alpha/2}$ le quantile d'ordre $\alpha/2$ de la loi de Student à $n-2$ degrés de liberté ($\alpha = 0.05$ pour un intervalle de confiance à 95%). Il s'agit alors ici de l'intervalle permettant d'encadrer la valeur prédite de tout nouvel individu (« $n+1$ ») ajouté au modèle de régression (plus communément désigné par « intervalle de prédiction »).

Pour chaque durée D, les performances seront enfin examinées au travers de l'écart absolu entre valeurs de QMNA5 prédites $Q_{cib(EST)}$ et observées $Q_{cib(LT)}$ (en débits spécifiques) mais aussi en terme de largeur de l'intervalle de confiance à 95 %. Par ailleurs, suivant les exemples donnés dans la littérature, nous proposons en complément d'examiner le gain apporté par la procédure de réajustement par rapport à l'emploi de la valeur de QMNA5 empirique directement extraite de la période de chronique disponible au site cible. Pour cela le critère retenu donne le gain en terme de débit spécifique (en l/s/km²) tel que :

$$\text{gain} = \left|Q_{cib(LT)} - Q_{cib(EST)}\right| - \left|Q_{cib(LT)} - Q_{cib(ST)}\right| \quad (III.10)$$

Ainsi une valeur positive indiquera un gain à employer la procédure de réajustement et l'intérêt de la méthode sera *a minima* démontré lorsque qu'au moins 51 % des valeurs de gain seront positives.

III.1.3 Sélection des sites de référence

Comme déjà mentionné précédemment, l'approche de réajustement climatique nous conduit à faire l'hypothèse que les variations climatiques sont identiques au site cible et au(x) site(s) d'appui(s) sélectionné(s) pour déterminer la valeur du facteur correctif k . Certains travaux sur le sujet considèrent que la proximité géographique et/ou l'appartenance à une même région climatique suffit à assurer cette hypothèse (Bakke *et al.* (1999)). A l'échelle de la France cela pourrait se traduire sommairement par une différenciation en grandes zones climatiques telles qu'illustrées sur la carte ci-dessous (Figure III-2).

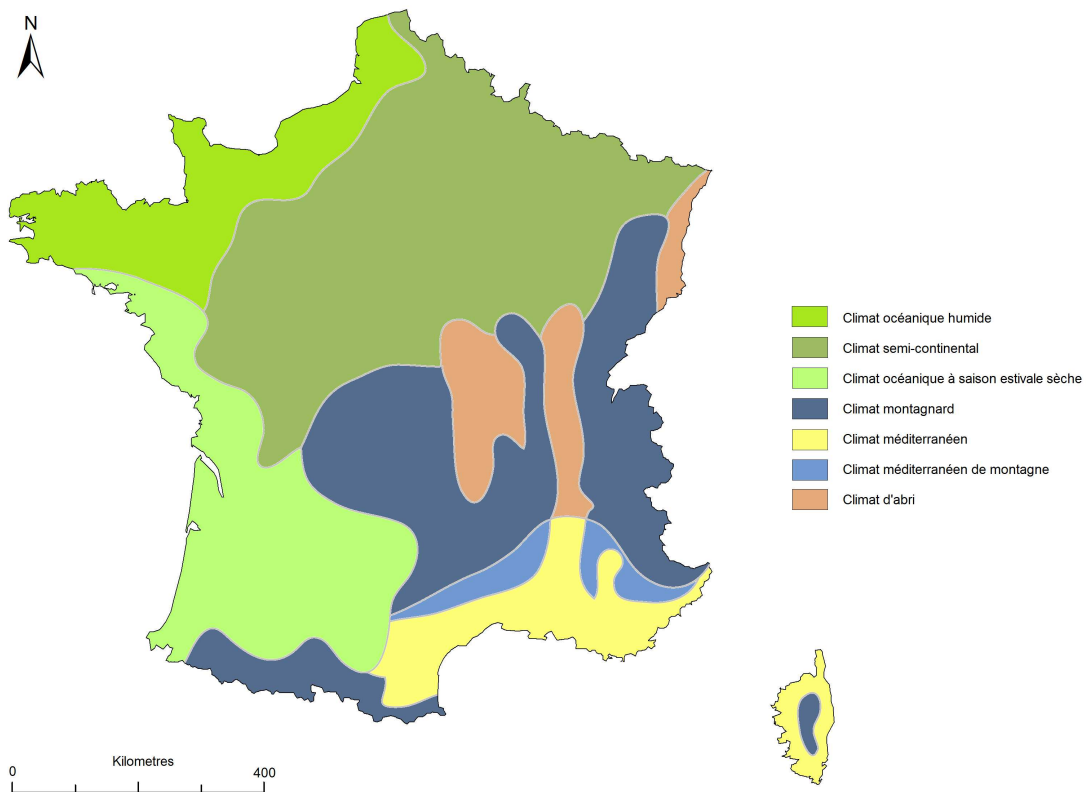


Figure III-2 : Grandes zones climatiques en France pouvant permettre la sélection de sites de référence autour d'un site cible

Cette typologie pourra cependant s'avérer trop grossière dans le cas de cours d'eau présentant une inertie intra-annuelle (voire inter-annuelle) particulière liée par exemple à l'existence de nappes étendues ou de stocks neigeux sur le bassin. Autrement dit, il apparaît qu'en dehors des considérations purement climatiques, il semble également important de tenir compte de l'existence d'éventuelles similitudes en terme de réponse hydrologique aux variations climatiques.

Cette problématique a été abordée par Laaha et Blöschl (2005) en comparant plusieurs techniques pour le choix d'un ou plusieurs site(s) de référence approprié(s) :

- (i) sélection d'un bassin instrumenté situé en aval du site cible (lorsque celui-ci existe) ;
- (ii) sélection sur la base de similitudes climatiques et physiographiques (notamment sur la base de critères de saisonnalité) ;
- (iii) sélection selon des critères de distance au site cible et de corrélation entre séries annuelles de Q95 au site cible et aux sites de référence (dans ce cas de figure seules les séries de plus de 5 années sont exploitées).

Leurs résultats indiquent que l'emploi de bassins situés en aval du site cible constitue la solution la plus performante, en particulier lorsque la durée de chronique disponible au site cible ne dépasse pas 5 années (au-delà, le gain apporté par la technique de réajustement reste peu sensible par rapport à la valeur de Q95 non réajustée). Si cette conclusion suggère que le recouvrement entre les bassins cible et de référence constitue le meilleur gage de similitude des régimes hydrologiques, le recours exclusif à des bassins situés en aval du site cible présente néanmoins le défaut de limiter le nombre de sites de

référence potentiels (*i.e.* dans de nombreux cas les bassins cibles n'ont pas de stations de référence en aval). Il a donc été choisi de rechercher dans cette application d'autres modalités de sélection des sites de référence.

Pour commencer, une précision importante tient à la nécessité de disposer de sites de référence dont la chronique recouvre en totalité la sous-période disponible au site cible. Ainsi, les chroniques de l'échantillon de référence étant susceptibles d'inclure des périodes de lacune, le choix du voisinage sera en premier lieu contraint par l'existence d'observations pour l'ensemble des années échantillonnées au site cible. De là, il a ensuite été envisagé de nombreuses possibilités pour réaliser la sélection d'un voisinage autour de chaque site cible, toutefois seules les deux approches présentant le plus d'intérêt seront présentées ici. La première d'entre elles visait à tester la pertinence de la typologie en Hydro-Eco-Régions (HER) établie par Wasson *et al.* (2001) (*cf.* section I.2.2) pour la définition de voisinages hydro-climatiques homogènes ; l'avantage étant que les HER permettent ici de conserver une certaine cohérence géographique en plus de regrouper des bassins ayant des caractéristiques communes en termes de climat, de géologie, de relief, etc. Il a ainsi été considéré que les bassins appartenant à la même HER que le site cible étaient susceptibles de constituer un voisinage pertinent pour la détermination d'une valeur de k régionale. Cependant il apparaît que de nombreux bassins se trouvent situés à cheval sur plusieurs HER et doivent être traités en conséquence. Pour ce faire, il est possible de donner un poids relatif aux différents sites de référence selon la proportion de bassin partagée avec chaque HER représentée sur le bassin cible. A titre d'exemple, considérons un cas simple où le bassin cible est partagé entre deux HER (notées arbitrairement ici HER1 et HER2). On déterminera alors séparément les valeurs k moyennes régionales telles que¹ :

$$k_{HER1} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \frac{Q_{ref(LT)_i}}{Q_{ref(ST)_i}} \cdot p_{HER1_i}}{\sum_{i=1}^{n_1} p_{HER1_i}} \quad \text{et} \quad k_{HER2} = \frac{\sum_{j=1}^{n_2} \frac{Q_{ref(LT)_j}}{Q_{ref(ST)_j}} \cdot p_{HER2_j}}{\sum_{j=1}^{n_2} p_{HER2_j}} \quad (III.11)$$

avec p_{HER1_i} les proportions de bassins des $i = 1, \dots, n_1$ sites de référence appartenant à l'HER1 et p_{HER2_j} les proportions de bassins des $j = 1, \dots, n_2$ sites de référence appartenant à l'HER2. La valeur finalement estimée au site cible correspondra alors simplement à la combinaison linéaire des estimations obtenues pour chacune des deux HER représentées sur le bassin :

$$Q_{cib(EST)} = Q_{cib(ST)} \cdot (p_{HER1_{cib}} \cdot k_{HER1} + p_{HER2_{cib}} \cdot k_{HER2}) = Q_{cib(ST)} \cdot k_{HER1+2} \quad (III.12)$$

¹ Afin de ne pas surcharger le document, le détail de l'opération dans le cas de l'introduction d'un coefficient $M(CV_k)$ ou dans le cas d'une valeur de k déterminée par régression linéaire n'est pas donné ici mais repose sur un principe analogue.

De même pour l'intervalle de confiance, la prise en compte des poids relatifs de chacune des deux estimations régionales conduit à modifier les formulations données précédemment (*cf.* section III.1.2) telles que :

$$P(Q_{cib(EST)} - Q_{cib(ST)} \cdot t_{\alpha/2} \cdot \sigma_{k_{HER1+2}}) < Q_{cib(LT)} < Q_{cib(EST)} + Q_{cib(ST)} \cdot t_{\alpha/2} \cdot \sigma_{k_{HER1+2}}) \approx 0.95$$

$$\text{en prenant : } \sigma_{k_{HER1+2}} = \sqrt{\sigma_{k_{HER1}}^2 + \sigma_{k_{HER2}}^2} \quad (III.13)$$

Et dans le cas de la détermination de k par régression linéaire :

$$P(Q_{cib(EST)} - t_{\alpha/2} \cdot \sigma_{Q_{cib(EST)}_{HER1+2}} < Q_{cib(LT)} < Q_{cib(EST)} + t_{\alpha/2} \cdot \sigma_{Q_{cib(EST)}_{HER1+2}}) \approx 0.95$$

$$\text{en prenant : } \sigma_{Q_{cib(EST)}_{HER1+2}} = \sqrt{\sigma_{Q_{cib(EST)}_{HER1}}^2 + \sigma_{Q_{cib(EST)}_{HER2}}^2} \quad (III.14)$$

Parallèlement à cette première approche de sélection des sites de référence, il a été choisi d'examiner une modalité ne reposant que sur un critère de proximité purement géographique défini comme étant la distance entre bassins suggérée par Ghosh (1951) :

$$d = \frac{1}{S_{ref} \cdot S_{cib}} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |x_{ref}(i) - x_{cib}(j)| \quad (III.15)$$

où d est la distance entre bassins, S_{ref} et S_{cib} sont les surfaces drainées par le site cible et le site de référence, $x_{ref}(i)$, $i = 1, \dots, n$ et $x_{cib}(j)$, $j = 1, \dots, m$ sont les coordonnées des points d'un maillage régulier (ici de résolution kilométrique) superposé sur les bassins considérés (Figure III-3).

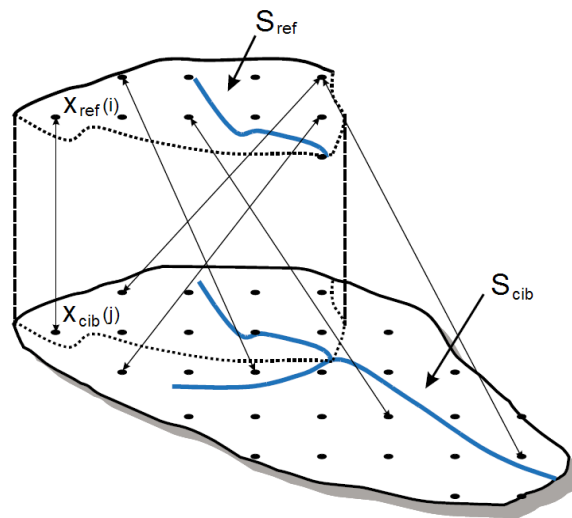


Figure III-3 : Schéma illustrant la procédure de calcul de distance d pour deux bassins emboîtés. Modifié d'après Skoien et al. (2006)

L'emploi de cette distance possède l'avantage de permettre intrinsèquement une meilleure prise en compte de la structure du réseau hydrographique que la traditionnelle distance euclidienne entre centres de gravité des bassins et s'avère en particulier plus approprié pour quantifier la distance entre bassins emboîtés (Gottschalk (1993)). Elle est en revanche sensible à la taille du support avec pour principale conséquence l'obtention de valeurs non nulles lors du calcul de la distance d'un bassin à lui-même (dans ce cas la distance en question croît avec la surface drainée). La principale difficulté réside ensuite dans la détermination du nombre de sites de référence à inclure dans le voisinage de chaque site cible. Afin de ne pas introduire de règle trop arbitraire, la solution retenue ici consiste à fixer le nombre optimal de site de référence comme étant celui qui permet de minimiser la variance régionale du coefficient k au-delà d'un minimum de 5 sites de référence (ceci pour assurer un minimum de robustesse lors du calcul des intervalles de confiance) (Figure III-4). Autrement dit, il est attendu que ce protocole permette de converger vers une valeur moyenne de k tenant compte de la plus ou moins forte homogénéité régionale autour du site cible (et susceptible de varier selon la sous-période d'observation considérée).

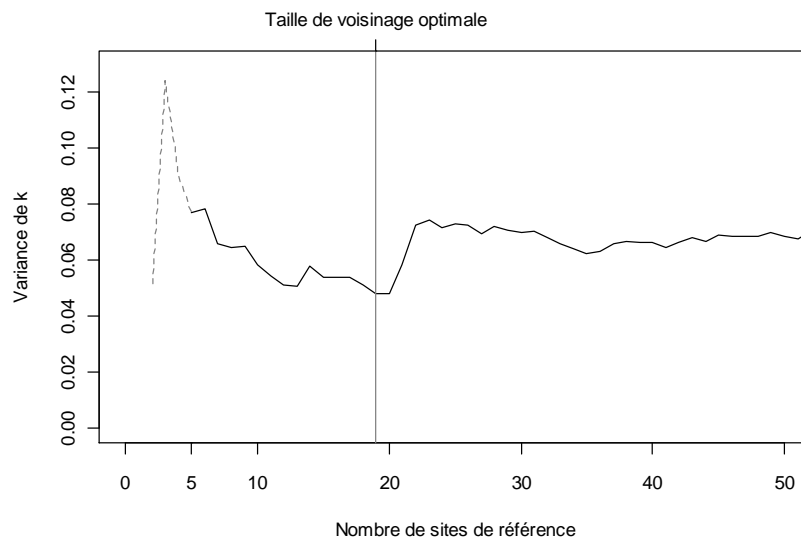


Figure III-4 : Exemple de détermination du nombre optimal de sites de référence sur la base de la variabilité régionale de k pour les stations géographiquement voisines de la station U1324010 (L'Ouche à Plombières-lès-Dijon) dans le cas d'une chronique simulée de 5 années

A titre de résultat de référence, il sera également envisagé de déterminer si ces protocoles de sélection s'avèrent plus efficaces qu'un réajustement considérant indifféremment l'ensemble des bassins instrumentés à notre disposition comme sites de référence (*i.e.* sans sélection de voisinage, approche que l'on qualifiera de réajustement « national ») ou qu'un réajustement ne reposant que sur un unique site de référence (*i.e.* le plus proche du site cible). Enfin on signalera que des essais complémentaires visant à introduire dans le calcul du coefficient k une pondération permettant de tenir compte du degré de « proximité » entre les bassins cible et de référence (par exemple au travers de la distance entre bassins comme suggéré par Laaha et Blöschl (2005) ou du degré de corrélation entre les chroniques de débits moyens mensuels sur la période de chronique commune) n'ont pas permis d'améliorer significativement nos résultats, c'est pourquoi ils ne seront pas présentés ici en détail.

III.2 Résultats de la validation croisée

Comme proposé précédemment, chaque méthode de réajustement (rappelées dans le Tableau III-1) et de sélection de voisinage a été mise en œuvre séparément au cours de la validation croisée en simulant dans chaque cas une durée de chronique allant de $D = 1$ à $D = 25$ années (l'opération étant répétée 100 fois pour chaque site cible). Pour faciliter l'interprétation des résultats, les différents critères de performance obtenus pour l'ensemble des stations seront examinés ici au travers de leurs distributions, elles-mêmes résumées sous la forme de « boxplots » (ou « boîtes à moustache »)¹ en se limitant dans un premier temps aux durées de chronique $D = 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25$ années.

Méthode	Mode de calcul du coefficient de réajustement régional k
A1	Moyenne arithmétique des valeurs de $k_i = QMNA5_{réf(LT)_i} / QMNA5_{réf(ST)_i}$ aux $i = 1, \dots, n$ sites de référence inclus dans le voisinage du site cible
A2	Moyenne arithmétique des valeurs de $k_i = QMNA5_{réf(LT)_i} / QMNA5_{réf(ST)_i}$ aux $i = 1, \dots, n$ sites de référence inclus dans le voisinage du site cible corrigée par l'exposant $M(CV_k) = (1 - CV_k)^{D/10}$ permettant de tenir compte de l'homogénéité du voisinage et de la longueur de chronique disponible
B	Ajustement linéaire entre les valeurs de $QMNA5_{réf(ST)_i}$ et $QMNA5_{réf(LT)_i}$ des $i = 1, \dots, n$ sites de référence inclus dans le voisinage (en imposant une ordonnée à l'origine égale à zéro)

Tableau III-1 : Récapitulatif des méthodes de réajustement examinées

III.2.1 Influence du mode de sélection des sites de référence

Le premier élément examiné ici repose sur la confrontation des différents modes de sélection de voisinage exposés en section III.1.3 avec tout d'abord, en guise de résultat de référence, les performances obtenues en considérant indifféremment l'ensemble des bassins instrumentés à notre disposition comme sites d'appui (*i.e.* réajustement « national »). Les écarts absolus aux QMNA5 observés et les largeurs des intervalles de confiance à 95 % associés à chaque estimation sont présentés sur la Figure III-5 pour chacune des trois méthodes de réajustement mises en œuvre. Pour une meilleure lisibilité les valeurs dépassant +/- 1.58 fois la distance interquartile (définissant sur les boxplots les bornes entre lesquelles sont incluses environ 95 % des valeurs) n'ont pas été représentées. Bien qu'elles puissent être parfois considérablement élevées, ces erreurs peuvent être qualifiées de rares eu égard au nombre total de valeurs calculées. On peut imaginer qu'en pratique ce type de résultat anormal sera aisément identifié et mis à l'écart en vérifiant par exemple la solution donnée par la méthode du ratio des surfaces drainées (*i.e.* $QMNA5_{cib} = QMNA5_{réf} \cdot S_{cib} / S_{réf}$) qui, si elle correspond à une estimation très naïve, présente néanmoins l'avantage d'éviter l'apparition de telles erreurs.

¹ Rappel : dans ce type de représentation le trait gras indique la valeur médiane, la « boîte » donne les premier et troisième quartiles tandis que les « moustaches » représentent les bornes entre lesquelles sont incluses environ 95 % des valeurs.

On constate ici que, quelle que soit la méthode de réajustement mise en œuvre, le recours aux deux méthodes de sélection de voisinage présente sans surprise un intérêt pour réduire les incertitudes d'estimation du QMNA5 par rapport à un simple réajustement opéré à l'échelle nationale (*i.e.* sans sélection de voisinages). Cet intérêt se révèle alors d'autant plus marqué que la durée de chronique disponible au site cible est courte et semble pratiquement disparaître au-delà de 15 années de chronique. Il apparaît en effet qu'à moyen et long terme, la dérive par rapport au QMNA5 observé sur la totalité de la chronique s'avère presque inexistante (k proche de 1) quel que soit le bassin considéré et ainsi que les méthodes de réajustement s'avèrent alors pratiquement indifférentes au choix d'un voisinage. En deçà de 15 années, on remarque que les écarts de performance entre les trois modalités examinées, en particulier vis-à-vis des intervalles de confiance, apparaissent nettement moins prononcés lorsque la méthode de réajustement *B* est employée (k ajusté par régression linéaire). Celle-ci, en permettant par ailleurs de diminuer sensiblement les incertitudes d'estimation dans le cas d'un réajustement national (mais aussi plus secondairement dans le cas d'un réajustement par HER), semble alors correspondre à la solution la plus robuste pour traiter le cas de voisinages restant grossiers.

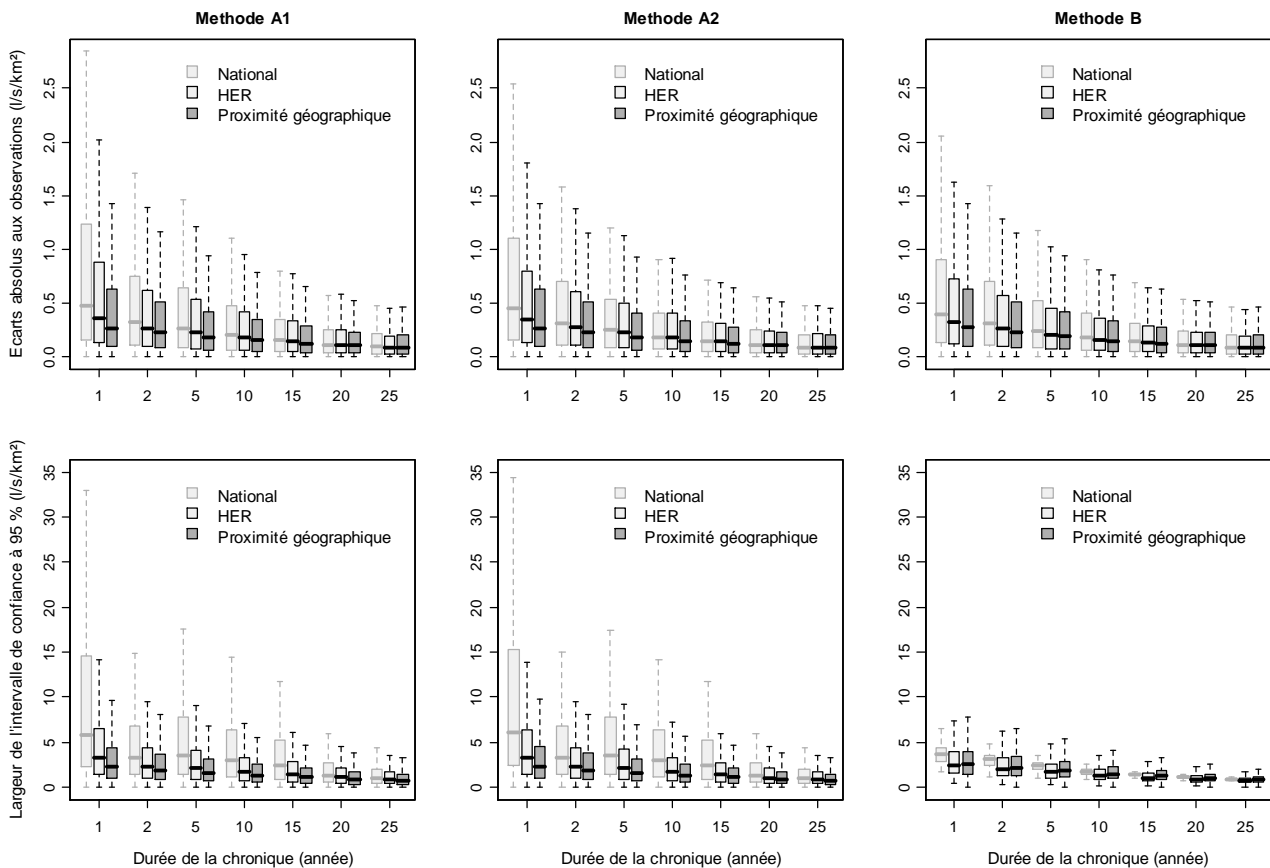


Figure III-5 : Performances d'estimation du QMNA5 en validation croisée (en haut : écarts aux QMNA5 observés en $l/s/km^2$, en bas : largeur de l'intervalle de confiance à 95 % en $l/s/km^2$) selon le mode de sélection de voisinage et la durée de la chronique disponible au site cible : comparaison avec un réajustement opéré à l'échelle nationale

A l’opposé, il apparaît également intéressant de confronter nos résultats à ceux obtenus en ne sélectionnant cette fois qu’un unique site de référence (le plus proche du site cible). Etant donné que selon cette dernière modalité il n’est pas possible de déterminer un intervalle de confiance, la comparaison ne peut en revanche s’effectuer que sur la base des écarts aux observations (Figure III-6). On remarque ici que les différences de performance sont moins marquées que précédemment. Néanmoins les bénéfices constatés dans la plupart des cas (essentiellement sensibles dans la seconde moitié de la distribution des erreurs, même au-delà de 15 années de chronique), apparaissent tout de même suffisants pour justifier le recours à plusieurs sites de référence pour accroître la robustesse des méthodes de réajustement. A cet égard, il apparaît qu’en deçà de 20 années de chroniques, le protocole de sélection reposant sur la proximité géographique avec minimisation de la variance régionale de k se révèle nettement plus avantageux que le recours aux HER. Le mode de sélection du voisinage reposant sur la proximité géographique sera par conséquent le seul retenu dans la suite de ces travaux.

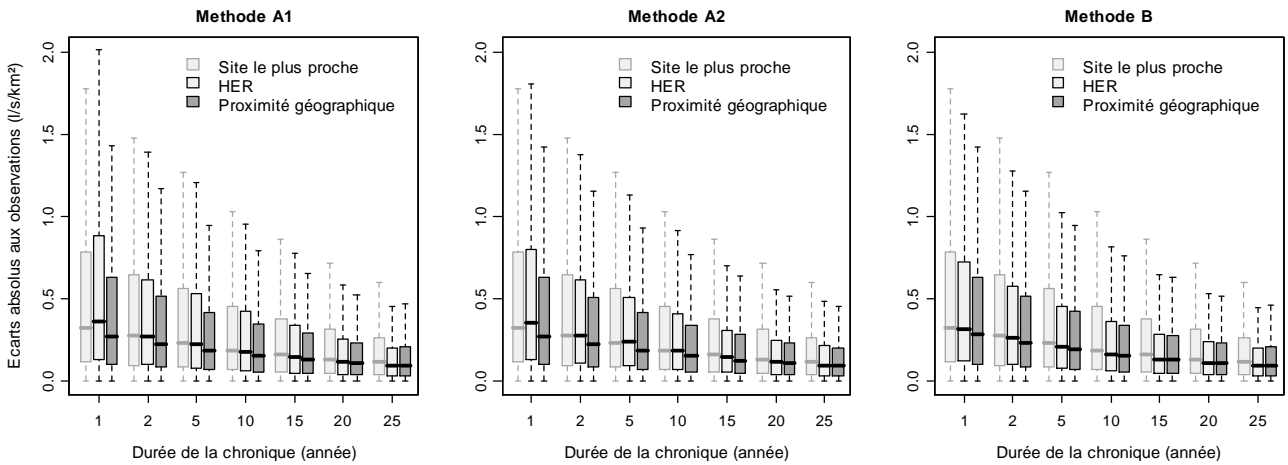


Figure III-6 : Performances d’estimation du QMNA5 en validation croisée selon le mode de sélection de voisinage et la durée de la chronique disponible au site cible : comparaison avec un réajustement opéré à partir du site de référence le plus proche

Un aspect intéressant de ce protocole peut être mis en évidence ici au travers de l’analyse des tailles des voisinages sélectionnés autour de chaque site cible. Celles-ci apparaissent comme très variables selon le site cible mais surtout selon la période de chronique échantillonnée. Ainsi, si les voisinages ne dépassent pas 20 à 25 stations d’appui dans une grande majorité de cas (avec une taille médiane de voisinage autour de 8), ils peuvent parfois intégrer beaucoup plus de sites de référence voire exceptionnellement la presque totalité de l’échantillon de stations disponibles sur le plan national. Il est apparu au cours de la validation croisée que ce type de situation pouvait survenir lorsque la variabilité de k dans le voisinage immédiat du site cible s’avérait importante (généralement en raison de la présence d’un site de référence ayant un comportement atypique), empêchant ainsi de converger rapidement vers une valeur moyenne représentative à l’échelle locale ou régionale. Si le résultat obtenu perd probablement en pertinence vis-à-vis du site cible concerné, ce mécanisme de sélection permet tout de même de gagner en robustesse en évitant d’accorder trop de poids à d’éventuels horsains.

III.2.2 Influence de la méthode de réajustement

Le meilleur mode de sélection des sites de référence étant défini, il est maintenant question de comparer plus en détail les trois méthodes de réajustement testées au cours de cette application (Figure III-7).

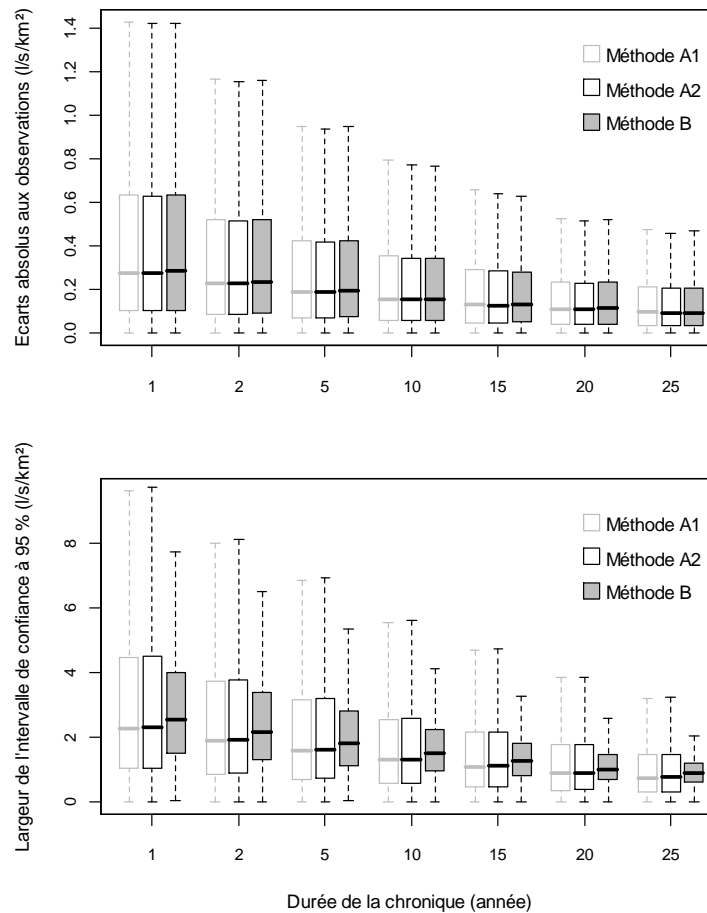


Figure III-7 : Comparaison des méthodes de réajustement dans le cas de la sélection de voisinages reposant sur la proximité géographique avec minimisation de la variance régionale de k

Contrairement à ce qui pouvait être observé précédemment pour les autres modalités de sélection de voisinages pour lesquelles il apparaissait assez clairement une hiérarchie entre les méthodes de réajustement (la méthode B surpassant la méthode A2 surpassant elle-même la méthode A1), on remarque ici que les trois techniques de réajustement conduisent à des performances pratiquement identiques en termes d'écarts aux valeurs de QMNA5 observées. La différence entre les méthodes est alors essentiellement sensible vis-à-vis de la largeur de l'intervalle de confiance à 95 % avec un net avantage des méthodes A1 et A2 dans la première moitié de la distribution et à l'inverse, de meilleures performances dans la seconde moitié de la distribution lors d'un réajustement effectué avec la méthode B. Il en résulte que le choix de la meilleure technique s'avère délicat. Néanmoins on pourra considérer que, en regard de l'objectif visant à exploiter les estimations obtenues à partir des chroniques courtes pour consolider le jeu de stations de référence dans le cadre de la prédétermination du QMNA5 en sites

non jaugés (*cf.* Chapitre VI), il apparaît plus important de privilégier la méthode permettant de limiter l'apparition des intervalles de confiance les plus larges (et ainsi d'accroître la confiance dans les estimations les plus incertaines). Il a par conséquent été choisi de retenir la méthode de réajustement *B* dans la suite de ces travaux.

Pour compléter l'aperçu des résultats fournis par cette méthode, il nous a paru pertinent de détailler rapidement ici les résultats obtenus par classes de régime d'étiage (*cf.* les quatre classes définies en section II.2.2). Les résultats obtenus pour chacune d'entre elles sont synthétisés sur la Figure III-8 pour des durées de chronique de $D = 1, 5, 10$ et 25 année(s).

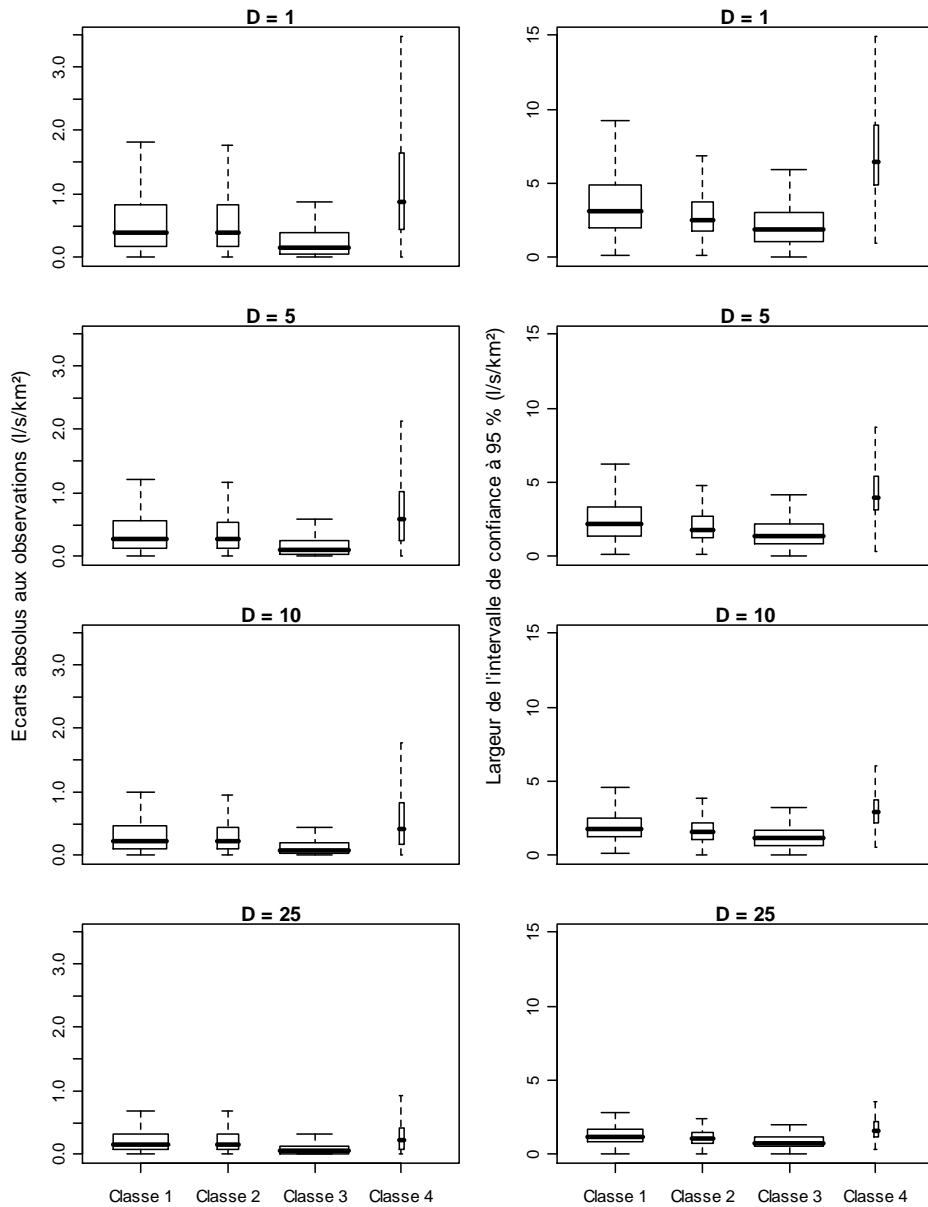


Figure III-8 : Détails des performances d'estimation du QMNA5 par classe de régime d'étiage (la largeur des boxplots est proportionnelle au nombre de sites appartenant à chaque classe)

Il est ainsi possible de montrer que, quelle que soit la longueur de chronique disponible au site cible, les meilleures performances sont obtenues pour la troisième classe qui regroupe les bassins présentant les étiages les plus sévères. Pour les classes 1 et 2, qui correspondent respectivement aux bassins à forte inertie et aux bassins à régime intermédiaire, les résultats, relativement équivalents, s'avèrent un peu moins bons. Néanmoins les estimations les plus incertaines sont obtenues pour la classe 4 qui regroupe les bassins à régimes niveaux. Cette dernière observation n'est pas surprenante dans la mesure où les bassins appartenant à cette catégorie sont assez peu représentés dans l'échantillon de référence limitant ainsi la possibilité d'appuyer le réajustement sur des bassins ayant un comportement analogue à celui du site cible (ce qui démontre au passage l'importance d'identifier des bassins de référence ayant une réponse aux variations climatiques proche de celle du site cible).

Enfin, à titre de référence, il nous paraissait intéressant de proposer une brève comparaison de nos résultats avec ceux obtenus par Laaha et Blöschl (2005) pour l'estimation du Q95 spécifique en Autriche (on fera alors l'hypothèse que les deux variables en question, le QMNA5 et le Q95, sont suffisamment voisines pour autoriser cette comparaison). Ainsi, en reprenant l'une des métriques employées par ces auteurs pour caractériser les performances d'estimation du Q95 (critère d'erreur moyenne (noté RMSE) présenté sur la figure 3 de l'article précité en retenant la meilleure des modalités examinées¹), on constate le net avantage apporté par l'approche retenue dans cette application, la différence étant d'autant plus marquée que la longueur de chronique disponible est courte (Figure III-9). Néanmoins il reste toujours difficile de préjuger de la supériorité d'une méthode lorsque la comparaison porte sur des jeux de bassin différents, d'autant que le critère de RMSE ne fournit ici qu'une vision partielle des performances.

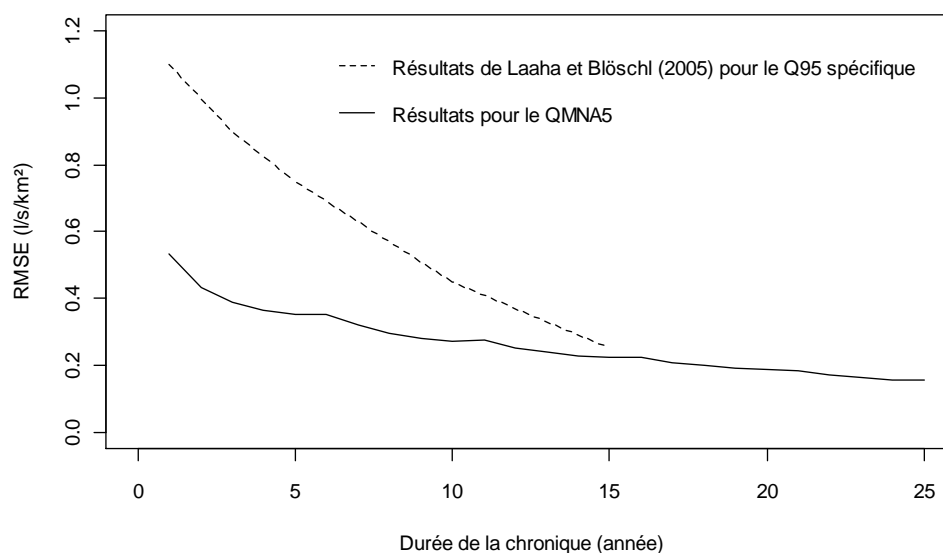


Figure III-9 : Comparaison des performances d'estimation (RMSE) du QMNA5 par ajustement d'un coefficient k régional par régression linéaire et du Q95 spécifique selon la meilleure modalité dégagée par Laaha et Blöschl (2005)

¹ Rappel : cette modalité s'appuie sur l'emploi d'une valeur de k déterminée à partir du site de référence le plus proche en aval du site cible et corrigée d'un exposant $M(r)$ permettant de tenir compte du degré de corrélation entre les séries annuelles de Q95 sur la période concomitante aux sites cible et de référence mais aussi du nombre d'années en commun.

III.2.3 Influence de la longueur des chroniques

Pour achever l'analyse de nos résultats, nous nous proposons d'examiner plus en détail l'influence de la longueur de chronique disponible au site cible sur les performances d'estimation. Il est notamment question de déterminer dans quelle mesure la procédure de réajustement s'avère présenter un intérêt par rapport à la simple utilisation du QMNA5 empirique extrait de la période de chronique disponible au site cible. Pour ce faire, il a été choisi d'examiner, pour la meilleure méthode de réajustement dégagée plus haut, le critère de *gain* défini précédemment en section III.1.2 (Figure III-10).

Celui-ci permet de montrer que la procédure de réajustement présente un intérêt très marqué pour les chroniques les plus courtes (< 5 années) puis que cet intérêt s'atténue progressivement jusqu'à devenir pratiquement inexistant, en particulier au-delà de 16 années où le gain par rapport à l'emploi du QMNA5 empirique s'approche de zéro en moyenne (néanmoins la proportion de gains supérieure à zéro étant toujours au-delà de 50 %, la procédure de réajustement sera tout de même privilégiée). On notera pour finir que, lorsque le gain est exprimé en relatif, on constate que l'on parvient cette fois à des résultats en accord avec ceux obtenus par Laaha et Blöschl (2005) où il était déjà constaté une forte atténuation du gain apporté par la procédure de réajustement climatique au-delà de 5 années de chronique.

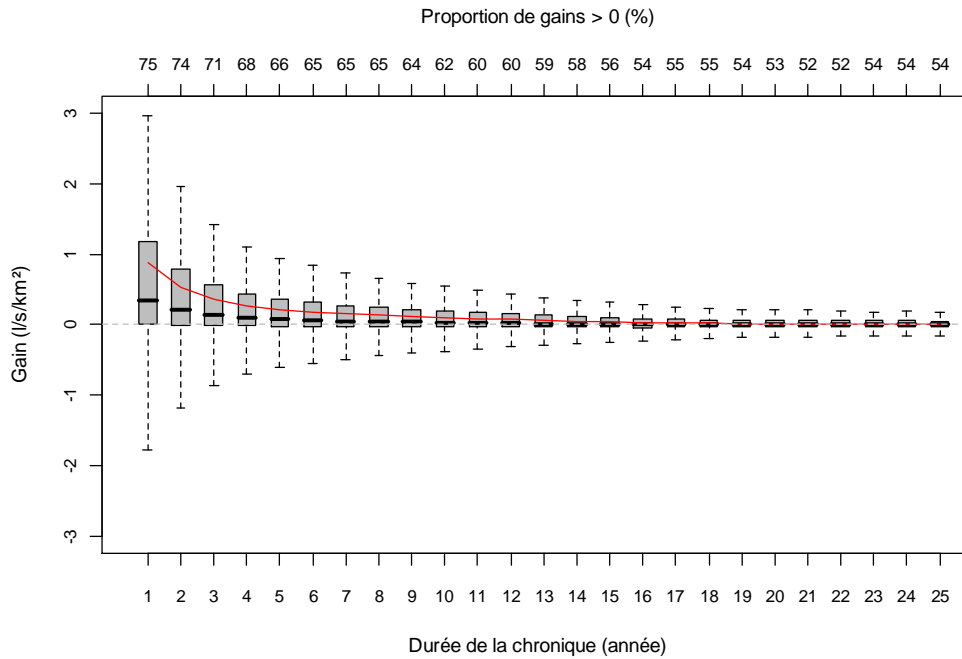


Figure III-10 : Gains apportés par la procédure de réajustement climatique par rapport à l'emploi du QMNA5 empirique en fonction de la longueur de chronique disponible au site cible (en rouge : gain moyen)

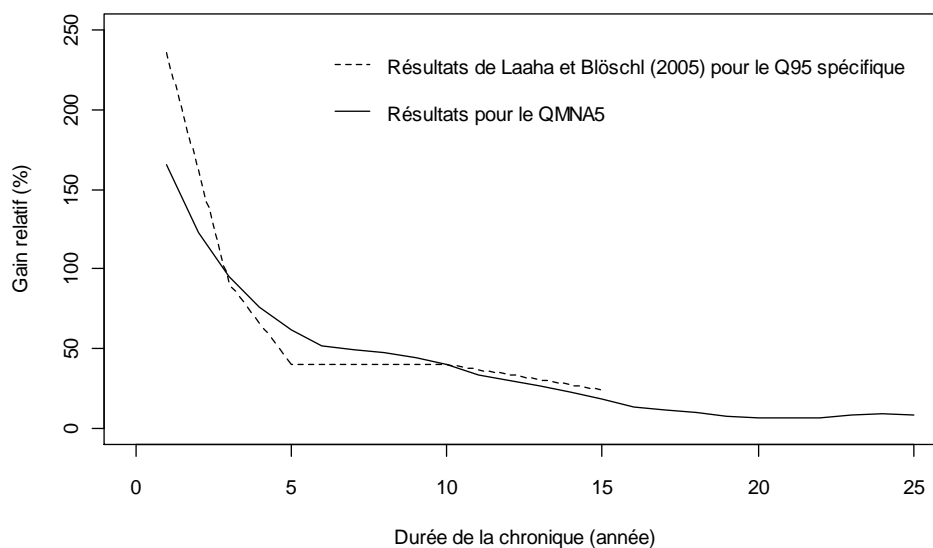


Figure III-11 : Gain relatif moyen apporté par la procédure de réajustement climatique dans le cas du QMNA5 et du Q95 estimé par Laaha et Blöschl (2005) en fonction de la longueur de chronique disponible

III.3 Application à l'échantillon de chroniques courtes

Suite à l'étape de validation croisée qui a permis de dégager les meilleures modalités d'exploitation des chroniques courtes pour l'estimation du QMNA5, il peut être maintenant envisagé d'appliquer la méthode de réajustement à l'échantillon de données constitué dans le premier chapitre parallèlement au jeu de stations de référence dotées de chroniques longues. Cet échantillon comprend 1257 sites pour lesquels les durées de chronique disponibles (*i.e.* nombre d'années sans lacune) varient de 1 à 25 années. A cet égard, on constate que les chroniques très courtes (de durées inférieures ou égales à 5 années) prédominent et représentent 32 % de l'effectif total, toutefois les chroniques plus longues sont également représentées de manière assez équilibrée avec 23, 15, 14 et 15 % de l'effectif total pour les classes de durées 6-10 ans, 11-15 ans, 16-20 ans et 21-25 ans respectivement.

Suite à l'application de la procédure de réajustement sur ces chroniques, il a tout d'abord été constaté qu'un certain nombre de sites présentaient des résultats relativement douteux avec en particulier des QMNA5 spécifiques excessivement élevés. Il s'agit dans la grande majorité des cas de bassins de petite dimension situés à l'aval d'importantes résurgences (généralement situés en milieu karstique) comme le bassin de la Sorgue à Cornus (O3564620) qui draine une partie des Causses du Larzac ou encore le bassin de la Bèze à Bèze (U1115020) qui constitue la résurgence d'une partie des eaux de la Tille et de la Venelle s'infiltrant à hauteur de Lux. Pour ces sites, la surface du bassin topographique est alors nettement inférieure à l'aire d'alimentation réelle (généralement mal connue) et n'est donc plus adaptée à la détermination de débits spécifiques. D'autres résultats considérés comme douteux ont également permis d'identifier des bassins soumis à l'influence d'aménagements anthropiques qui avaient échappés à la phase de critique des données effectuée au premier chapitre (on peut par exemple citer le bassin du Marillet à Château-Guibert [Barilleraie] (N3304110) situé en aval d'une importante retenue). Tous ces bassins ont ainsi été exclus de l'échantillon afin notamment de ne pas introduire de singularités

locales dans les prochaines étapes de ce travail. Pour les bassins restants (soit 1224 sites) les QMNA5 estimés (en débits spécifiques exprimés en l/s/km²) et la largeur des intervalles de confiance à 95 % associés (exprimés dans la même unité) sont représentés sur la Figure III-12 et la Figure III-13.

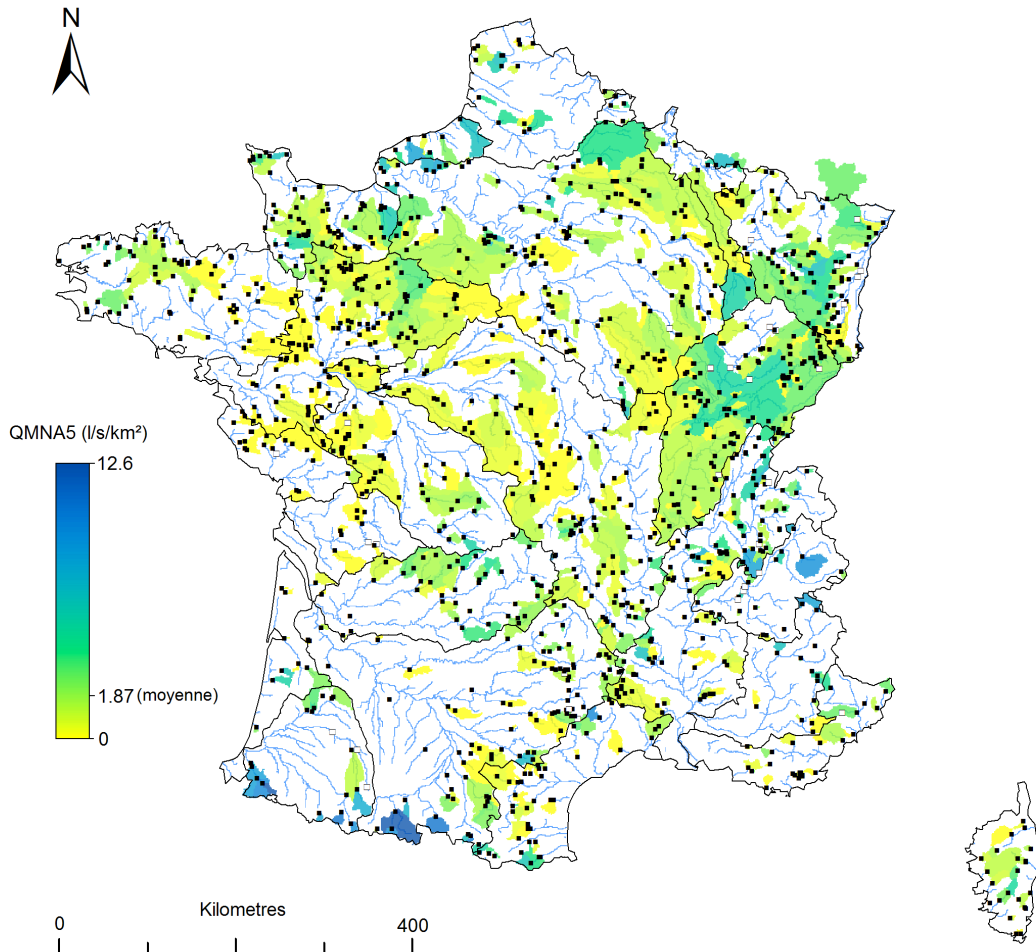


Figure III-12 : Cartographie des QMNA5 spécifiques estimés par réajustement aux stations de l'échantillon de chroniques courtes (les 33 stations exclues de l'échantillon sont représentées par un carré blanc)

La première de ces deux cartes permet de montrer que les estimations obtenues s'avèrent assez cohérentes avec les grands ensemble régionaux identifiés au Chapitre II (voir notamment la Figure II-4). Ainsi on retrouve notamment les bassins les plus productifs dans les zones montagneuses (Alpes et Pyrénées) mais aussi au Nord du Bassin Parisien (cours d'eau côtiers normands avec forte contribution des aquifères) et à l'inverse les bassins présentant les étiages les plus sévères en Vendée, dans le Centre et dans les régions méditerranéennes (hors zones de relief). Ailleurs les valeurs de QMNA5 sont autour de la moyenne nationale ou un peu supérieures dans les zones d'altitude modérée (Vosges, Jura et Massif Central).

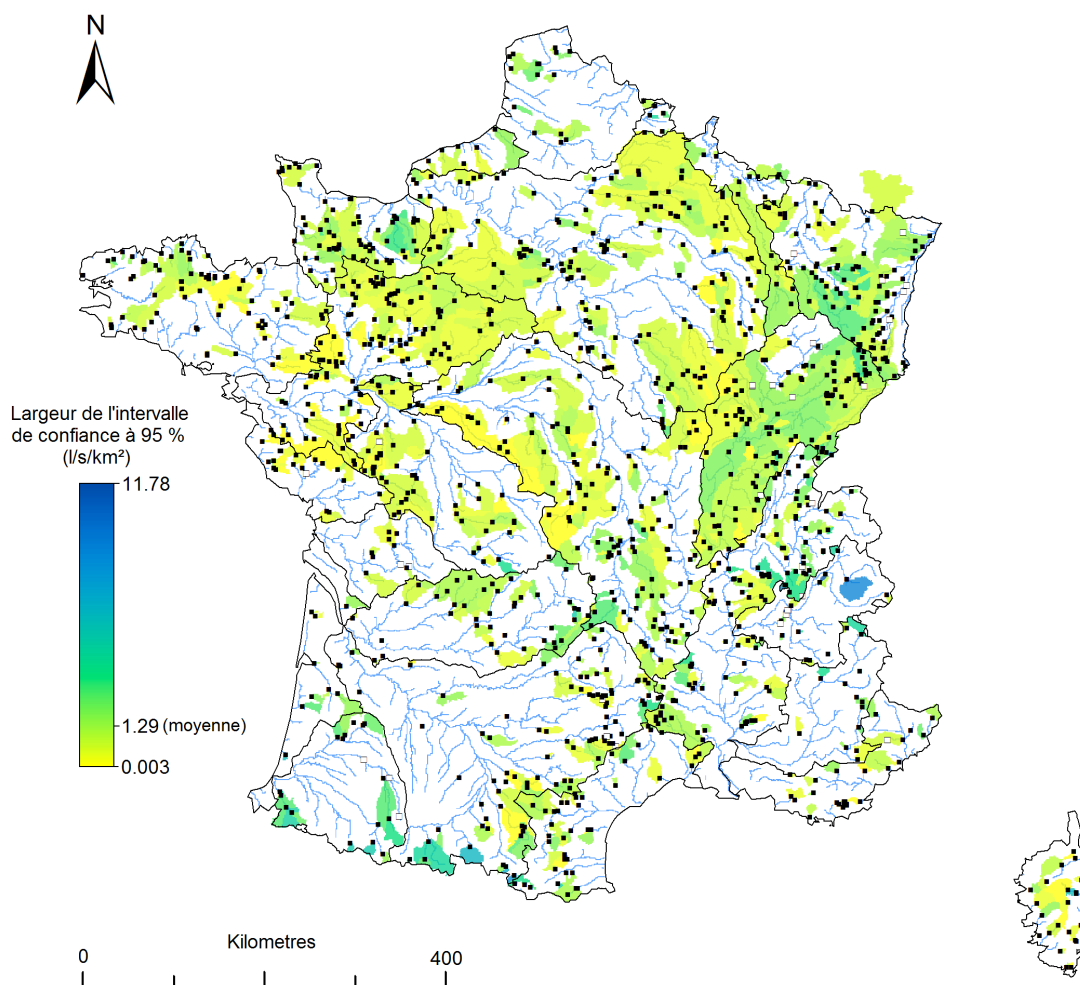


Figure III-13 : Cartographie de la largeur des intervalles de confiance à 95 % associés aux QMNA5 estimés par réajustement aux stations de l'échantillon de chroniques courtes (les 33 stations exclues de l'échantillon sont représentées par un carré blanc)

Les largeurs des intervalles de confiance à 95 % reportés sur la seconde carte reflètent quant à elles assez bien les observations effectuées à l'issue de l'analyse de la validation croisée. On retrouve ainsi les plus fortes incertitudes pour les bassins à régime nival et à l'inverse des estimations particulièrement fiables dans les secteurs où les QMNA5 sont les plus faibles (correspondants aux bassins de la troisième des quatre classes de régimes d'étiage). En comparaison l'évolution des incertitudes résultant des disparités dans les longueurs des chroniques disponibles apparaît comme marginale mais, comme le montre la Figure III-14, reste néanmoins présente.

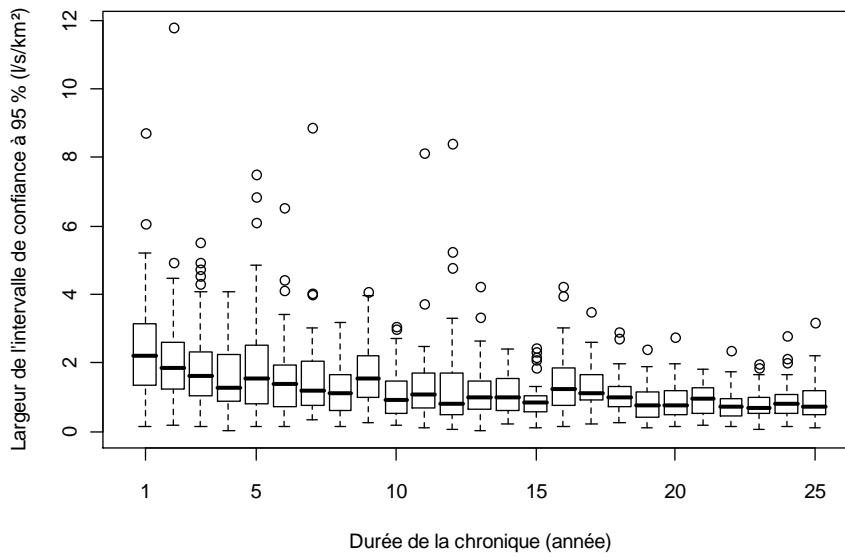


Figure III-14 : Evolution de la largeur des intervalles de confiance à 95 % en fonction de la durée de chronique disponible aux stations de l'échantillon de chroniques courtes

III.4 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de confronter plusieurs méthodes reposant sur le principe de réajustement climatique (tel qu'énoncé par Laaha et Blöschl (2005)) pour permettre de valoriser les chroniques courtes dans le cadre de la prédétermination du QMNA5. Les résultats obtenus à l'issue de la démarche de validation croisée, mise en œuvre ici à partir de l'échantillon de 632 stations de référence disponible à l'échelle nationale, ont ainsi permis de retenir la technique inspirée des travaux de Bakke *et al.* (1999). Le réajustement du QMNA5 empirique de court terme extrait au site cible (*i.e.* extrait de la chronique disponible) s'effectue alors à l'aide d'un facteur correctif régional (noté k) obtenu par ajustement d'une relation linéaire entre les QMNA5 empiriques de court terme et les QMNA5 de long terme (déterminé à partir de la totalité de la chronique) d'un ensemble de sites de référence voisins.

La notion de voisinage dont il est question ici a également été examinée attentivement au cours de la procédure de validation croisée ; il s'agissait essentiellement d'identifier les sites de référence présentant le plus de similitudes avec le site cible en termes de variations climatiques mais aussi vis-à-vis de la réponse des bassins à ces variations. La comparaison de plusieurs modalités de sélection des sites de référence autour de chaque site cible a ainsi permis de dégager un protocole reposant sur la simple proximité géographique en prenant soin toutefois de déterminer une taille de voisinage optimale par minimisation de la variance régionale du facteur k . Cette solution s'est notamment avérée plus avantageuse que le recours à la typologie en Hydro-Eco-Régions proposée par Wasson *et al.* (2001) mais a surtout montré un intérêt par rapport à l'emploi d'un seul et unique site de référence (*i.e.* le plus proche du site cible) ou à l'opposé par rapport à un réajustement opéré sans se préoccuper de la problématique de sélection de voisinage (*i.e.* en employant indistinctement la totalité des sites de références disponibles).

Suivant ce protocole, les résultats obtenus, peuvent être qualifiés de réellement satisfaisants (notamment par rapport aux résultats relevés dans la littérature) avec des QMNA5 estimés assez proches des valeurs effectivement observées sur le long terme (erreurs ne dépassant pas 0.5 l/s/km² en moyenne pour les chroniques les plus courtes) et des largeurs d'intervalles de confiance suffisamment raisonnables pour s'assurer de la fiabilité de la plupart des estimations obtenues. La principale exception concerne peut-être les bassins montagneux à régime nival pour lesquels le nombre limité de sites d'appui appropriés dans l'échantillon de référence conduit à des résultats plus incertains. Enfin s'il a été constaté une nette amélioration des résultats avec l'augmentation des longueurs de chronique disponible, il est également apparu que la procédure de réajustement ne présentait qu'un intérêt relativement marginal à partir d'une durée de chronique d'environ 16 années pour laquelle le QMNA5 de court terme se rapproche déjà fortement de la valeur de long terme.

Ce chapitre s'est enfin achevé sur la mise en œuvre du protocole résumé ci-dessus pour l'estimation du QMNA5 à partir du jeu de chroniques courtes effectivement constitué lors de l'étape de sélection et de critique des données à caractère hydrologique (*cf.* Chapitre I). Les résultats obtenus ont tout d'abord permis d'identifier un certain nombre de bassins présentant des singularités locales, soit d'origine naturelle (notamment dans le cas de bassin à forte composante karstique), soit en raison de perturbations d'origine anthropique. Après exclusion des sites concernés, l'analyse des résultats montre une assez bonne cohérence des QMNA5 estimés avec les valeurs existant sur le plan régional (*i.e.* valeurs aux sites de référence) tandis que les intervalles de confiance apparaissent globalement assez réduits pour justifier *a priori* l'intérêt à exploiter les estimations obtenues à partir des chroniques courtes dans la perspective d'une consolidation du jeu de stations de référence pour la prédétermination du QMNA5 en sites non jaugés (étape qui sera traitée au Chapitre VI).

Références bibliographiques

- Bakke P.D., Thomas R., Parrett C. (1999). Estimation of long-term discharge statistics by regional adjustment. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35(4), pp. 911-921.
- Fiering M.B. (1963). Use of correlation to improve estimates of the mean and variance. USGS, Prof. Pap. 434-C, pp. 20-32.
- Ghosh B. (1951). Random distances within a rectangle and between two rectangles. *Bulletin of Calcutta Mathematical Society*, Vol. 43(1), pp. 17-24.
- Gottschalk L. (1993). Interpolation of runoff applying objective methods. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 7(4), pp. 269-281.
- Hirsch R.M. (1982). A comparison of four streamflow record extension techniques. *Water Resources Research*, Vol. 18(4), pp. 1081-1088.
- Hughes D.A., Smakhtin V. (1996). Daily flow time series patching or extension : a spatial interpolation approach based on flow duration curves. *Hydrological Sciences*, Vol. 41(6), pp. 851-871.
- Laaha G., Blöschl, G. (2005). Low flow estimates from short stream flow records - a comparison of methods. *Journal of Hydrology* Vol. 306(1-4), pp. 264-286.
- Matalas N.C., Jacobs B. (1964). A correlation procedure for augmenting hydrologic data. USGS, Prof. Pap. 434-E, pp. E1- E7.
- Nicolle P., Andreassian V., Sauquet E. (2012). Blending neighbor-based and climate-based information to obtain robust low-flow estimates from short time series. *Soumis à Water Resources Research*.
- Robson A., Reed D.W. (1999). *Statistical Procedures for Flow Frequency Estimation*. Flood Estimation Handbook Vol.3. NERC, Wallingford, U.K.
- Skøien J.O., Merz R., Blöschl G. (2006). Top-kriging - geostatistics on stream networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 10(2), pp. 277-287.
- Smakhtin V.Y. (2001). Low flow hydrology : a review. *Journal of hydrology*, Vol. 240(3-4), pp.147-186
- Tallaksen L.M., Van Lanen H.A.J. (2004). (Eds) *Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. *Developments in Water Sciences* 48. Elsevier B.V., the Netherlands, 580 pp.
- Vogel R.M., Kroll C.N. (1991). The value of streamflow record augmentation procedures in low-flow and flood-flow frequency analysis. *Journal of Hydrology*, Vol. 125(3-4), pp. 259-276.
- Vogel R.M., Stedinger J.R. (1985). Minimum variance streamflow record augmentation procedures. *Water Resources Research*, Vol. 21(5), pp. 715-723.

Wasson J.G., Chandesris A., Pella H., Souchon Y. (2001). Définition des hydroécocorégions françaises. Méthodologie de détermination des conditions de référence au sens de la Directive Cadre pour la gestion des eaux. Rapport d'étude, Irstea, 190 pp.

WMO (2008). Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report n°50, 136 pp.

Chapitre IV.

Estimation du QMNA5 par valorisation de données de jaugeages volants

Le cas des chroniques courtes ayant été traité dans le chapitre précédent, il est maintenant question d'examiner la possibilité d'exploiter une seconde source d'information à caractère hydrologique que constituent les données de débit issues de campagnes de jaugeages volants (ou jaugeages épisodiques). La valorisation de ces données constitue à ce jour une approche relativement peu exploitée dans le cadre de l'estimation des débits caractéristiques d'étiage. Il s'agit pourtant d'une démarche présentant un fort potentiel dans la mesure où les travaux de référence sur le sujet démontrent là encore que la valorisation de données de jaugeages, bien que ces dernières soient très fragmentaires, est susceptible d'accroître significativement la qualité des estimations par rapport aux méthodes plus classiques d'estimation en sites non jaugés. Evidemment le second avantage est que l'acquisition ponctuelle de données de débit par jaugeage s'avère beaucoup moins coûteuse que l'acquisition de mesures en continu qui requiert l'installation, le tarage et l'entretien d'une station hydrométrique permanente, en particulier dans des situations où la section de mesure rendrait difficile l'implantation de cette dernière (*e.g.* lits en tresse, sections instables...).

Le présent chapitre est ainsi destiné à présenter la méthodologie mise en œuvre pour parvenir à la prédétermination du QMNA5 à partir de données de jaugeages volants. Au cours des simulations menées en validation croisée, il a notamment été prêté une attention particulière aux aspects relatifs à la définition de stratégies adaptées pour la réalisation de campagnes de jaugeage dédiées à l'estimation des débits caractéristiques d'étiage. La démarche engagée se place ainsi résolument dans une perspective opérationnelle et tente de répondre, au moins en partie, aux demandes exprimées par les gestionnaires de bassin.

IV.1 Eléments de méthodologie

IV.1.1 Etat de l'art des méthodes d'estimation

La méthode d'estimation employée dans cette application trouve en France son origine dans les travaux de Oberlin *et al.* (1973) qui ont les premiers reconnu l'intérêt de valoriser les données de jaugeages volants pour l'estimation de variables d'étiage et jeté les bases d'une méthodologie permettant de les exploiter. La technique a depuis fait l'objet de plusieurs applications pratiques (*e.g.* Diren Rhône-Alpes (2003), Galéa et Canali (2005)) parmi lesquelles on signalera les développements méthodologiques apportés par Chopart et Sauquet (2008) lors d'une application dédiée à l'estimation du QMNA5 dans le secteur Seine-Normandie. Bien que différents sous certains aspects, on trouve également des travaux comparables à l'étranger et plus spécifiquement aux Etats-Unis où une méthode visant la valorisation de jaugeages épisodiques (désignée sous l'appellation de « baseflow correlation method ») a été initiée par Riggs (1972) puis perfectionnée par Stedinger et Thomas (1985) et appliquée par Dingman et Putscher (1991), Reilly et Kroll (2003) et Zhang et Kroll (2007) pour la prédétermination du VCN7(10) mais aussi par Potter (2001) pour l'estimation de quantiles de débits de base. D'une manière générale, ces méthodes s'appuient sur l'identification d'une relation simple entre les débits jaugés au site cible et ceux observés à la même date au droit d'une station hydrométrique de référence dotée d'une chronique longue. Il est alors fait l'hypothèse que cette relation constitue une bonne approximation de la relation entre la statistique recherchée au site cible et celle connue au site d'appui. On citera également les travaux de Eng et Milly (2007) qui s'écartent de l'approche précédente en exploitant cette fois-ci les données de jaugeages pour (i) déterminer une constante de tarissement au site cible à partir de n couples de mesures réalisées en période de récession et (ii) déduire la variable VCN7(10) d'une relation entre le VCN7(10) et la constante de récession ajustée à partir des données d'un ensemble de site de référence.

Dans le cadre de cette application, seule la première des deux approches précitées a été retenue. Trois types de formulations différentes, inspirés des travaux relevés dans la littérature, ont alors été confrontés pour établir la relation qui permettra l'estimation du QMNA5 au site cible :

$$q_{cib}(t) = k \cdot q_{réf}(t) \quad (IV.1)$$

$$q_{cib}(t) = q_0 + k \cdot q_{réf}(t) \quad (IV.2)$$

$$q_{cib}(t) = L \cdot q_{réf}(t)^p \quad \text{ou} \quad \ln(q_{cib}(t)) = \lambda + p \cdot \ln(q_{réf}(t)) \quad (IV.3)$$

où $q_{cib}(t)$ est le débit jaugé au site cible, $q_{réf}(t)$ est le débit observé à la même date t au site d'appui, et k , q_0 , p , $\lambda = \ln(L)$ sont les paramètres obtenus par régression linéaire.

Il est rapidement apparu que le troisième type de relation, inspiré des travaux américains, constituait la solution la plus avantageuse. En effet cette relation repose tout d'abord sur une interprétation plus appropriée du comportement des bassins en période d'étiage qui consiste à considérer chaque bassin de

manière conceptuelle comme un réservoir caractérisé par la classique loi de vidange exponentielle (*i.e.* loi de Maillet). Une formulation de type puissance correspond alors à la solution analytique permettant de décrire la relation entre les débits de deux bassins dotés de propriétés différentes au cours de la phase de récession (coefficients de tarissement différents résultant par exemple de différences dans la géologie des bassins)¹. Notons que lorsque les propriétés des deux bassins sont identiques la relation devient linéaire ($p = 1$ et $\lambda = k$, Figure IV-1), la relation puissance constitue de ce fait une généralisation des autres relations envisagées ci-dessus et s'avère en particulier moins sensible au choix d'un site de référence que les relations linéaires (qui tendent à suggérer que les deux bassins doivent se comporter de manière analogue face aux variations climatiques). Un second avantage est que le mode d'ajustement des paramètres de cette relation par régression linéaire entre les logarithmes de $q_{cib}(t)$ et $q_{ref}(t)$ permet de donner intrinsèquement un poids plus important aux valeurs jaugées les plus basses. Il ne permet pas en revanche d'exploiter (ni d'estimer) des débits nuls, valeurs que nous avons par défaut remplacées dans cette application par 1 l/s (seuil de précision des données de débits fournies par la Banque HYDRO).

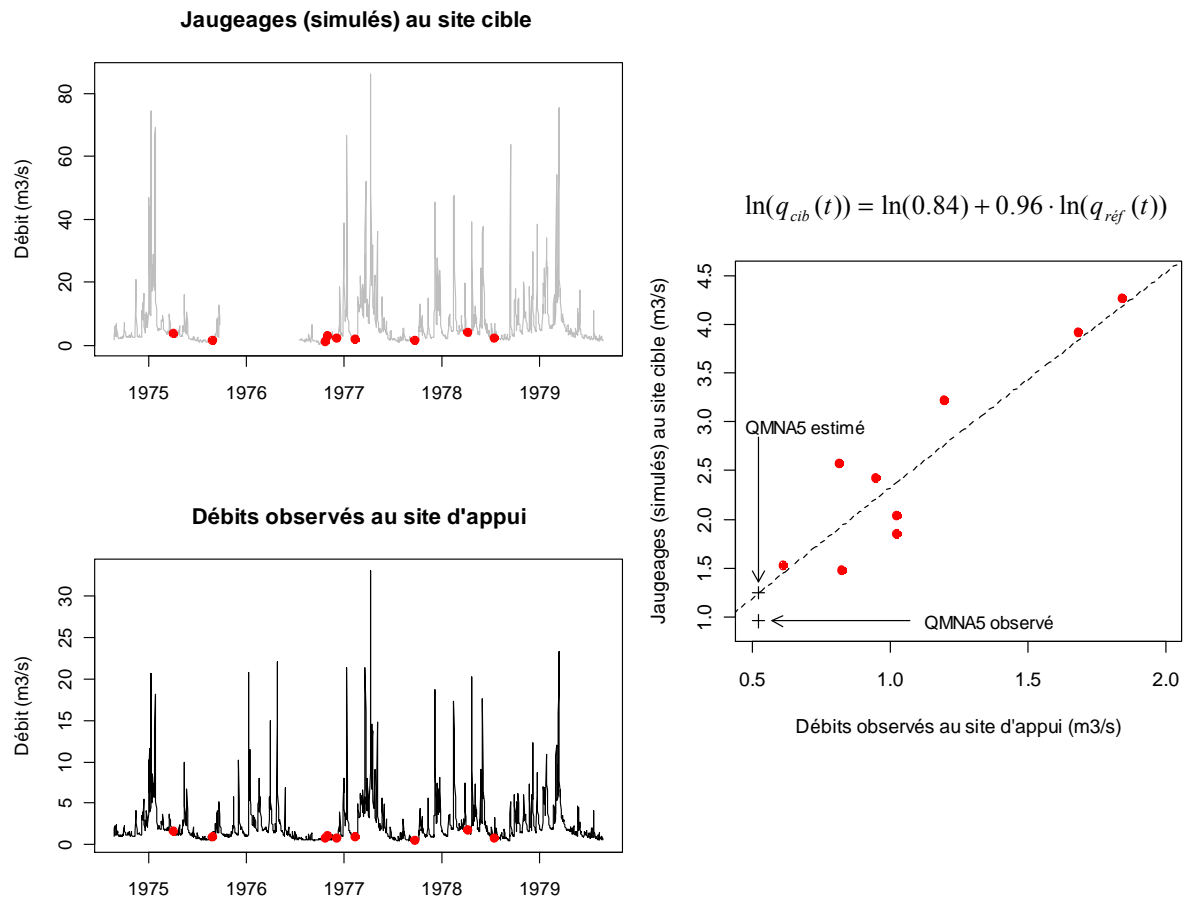


Figure IV-1 : Exemple de mise en relation entre débits jaugés au site cible (9 jaugeages simulés ici à partir d'une chronique) et débits observés à la même date sur un bassin de référence voisin

¹ Soient deux bassins possédant des coefficients de tarissement α_{cib} et α_{ref} , alors les paramètres de la relation puissance peuvent être calculés tels que : $p = \alpha_{cib} / \alpha_{ref}$ et $L = q_{cib}(t) / q_{ref}(t)^p$

IV.1.2 Stratégies de jaugeage simulées

D'un point de vue pratique, la définition d'une stratégie de jaugeage est un point essentiel qui doit permettre d'aboutir à une estimation fiable avec un minimum de données et/ou dans un délai raisonnable. Pour répondre à cette problématique nous nous sommes proposés d'examiner, au travers de différentes simulations :

- (i) l'influence du nombre de jaugeages réalisés (pour une même fréquence annuelle de jaugeage, y a-t-il un gain à poursuivre ou non une campagne de mesure ? sur combien de temps ?) ;
- (ii) l'influence de la fréquence annuelle des jaugeages (pour un même nombre final de jaugeages, peut-on écourter la période de suivi (augmenter la fréquence de jaugeage) sans perdre d'information compte tenu de la possible dépendance intra-annuelle des valeurs jaugées ?).

L'examen de ces deux aspects permet d'aller plus loin que la plupart des travaux relevés dans la littérature qui se limitent généralement à examiner l'influence de l'accroissement du nombre de jaugeages sans réelle prise en considération de la durée de suivi et surtout de la fréquence de jaugeage. Seuls Reilly et Kroll (2003) illustrent l'importance de travailler à l'aide de données indépendantes en testant des échantillonnages plus ou moins bien répartis dans le temps (jaugeages réalisés au cours d'une même période de récession, jaugeages répartis sur plusieurs périodes de récession successives, jaugeages réalisés au cours d'une unique période de récession chaque année).

A ces considérations viennent bien entendu s'ajouter des contraintes opérationnelles. Sur ce point, l'examen de données mises à notre disposition sur les secteurs Seine-Normandie et Rhône-Alpes a permis de mieux connaître les pratiques de jaugeages adoptées dans ces deux régions (*cf.* section I.1.4). Il est ainsi apparu que, si les situations rencontrées d'un point de suivi à l'autre étaient très diversifiées (tant en terme de nombre de mesures réalisées que de durée de la campagne de suivi), la principale contrainte reposait sur la fréquence annuelle de jaugeage qui, sur le long terme, ne dépasse que rarement 4 à 5 mesures en moyenne chaque année.

Parallèlement et étant donné les objectifs propres à l'estimation de débits caractéristiques d'étiage, l'ensemble des travaux relevés dans la littérature s'accordent sur l'importance de réaliser des mesures représentatives du fonctionnement de basses eaux. Ainsi les études effectuées aux Etats-Unis se basent exclusivement sur l'échantillonnage au cours de périodes de récession (quelle que soit la période de l'année) tandis que les études réalisées en France préfèrent un échantillonnage réparti tout au long de la saison de basses eaux (Chopart et Sauquet (2008) démontrent en particulier le gain à procéder ainsi par rapport à des jaugeages réalisés tout au long de l'année). Dans cette application nous avons opté pour la seconde solution, plus simple à mettre en œuvre du point de vue opérationnel, en définissant la saison d'étiage comme la période correspondant au trimestre le plus sec dans l'année (identifié en réalisant une moyenne glissante sur trois mois). S'il est possible de présumer d'une période favorable en fonction du contexte hydro-climatique du bassin cible (la majorité des cours d'eau français présentent une période d'étiage estivale entre les mois de juillet et de septembre) nous admettrons qu'en pratique la saison d'étiage n'est pas connue aux sites cibles. Nous avons donc choisi de définir la saison la plus favorable

en s'aidant de la cartographie des régimes hydrologiques mensuels établie par Sauquet *et al.* (2008) en tout point du réseau hydrographique français. Ainsi l'un des douze types de régime illustrés en section I.1.3 a été extrait pour chaque site de l'échantillon et comparé au régime observé (*i.e.* obtenu à partir de la chronique). Un examen visuel de la concordance entre ces régimes observés et prédits sur le jeu de données montre que les grands types de régimes (nappe, pluvial, transition, nival et méditerranéen) semblent correctement prédits dans une grande majorité de cas. Le même type d'examen, visant plus spécifiquement à vérifier la concordance entre les saisons d'étiage observées et prédites, se révèle également positif. Quelques sites montrent néanmoins des écarts supérieurs à un mois, il s'agit d'une part de bassins à régime de nappe pour lesquels la définition précise d'une saison d'étiage présente quelques difficultés eu égard à la faible variabilité des débits au sein d'un cycle annuel (cette variabilité peut cependant exister à l'échelle pluriannuelle) et d'autre part de bassins à régime pluvio-nival présentant deux saisons de basses eaux distinctes.

Enfin, pour assurer un minimum d'indépendance entre les valeurs obtenues (comme suggéré par Reilly et Kroll (2003)), nous avons souhaité introduire une contrainte sur la durée minimale séparant deux mesures. Celle-ci a été fixée par défaut à 15 jours, temps au bout duquel la décorrélation du signal de débit s'avère généralement suffisante pour obtenir deux mesures pas ou faiblement dépendantes (d'après les tests effectués sur les données en saison d'étiage l'autocorrélation à 15 jours est inférieure à 0.3 pour environ 90 % de l'échantillon de stations de référence). Ceci laisse alors la possibilité de réaliser jusqu'à 6 jaugeages au cours de la période d'étiage de trois mois¹.

Compte tenu de tous ces éléments et étant donné que la simulation des stratégies de jaugeage en validation croisée ne peut pas reproduire de manière exhaustive la grande diversité des situations rencontrées en pratique, il a été choisi de se limiter au cours de la validation croisée à un jeu de simulations faisant intervenir différentes combinaisons de durées de suivi en année (notées D) et de fréquence annuelle de jaugeage (*i.e.* exprimée comme le nombre de jaugeages réalisés durant la période d'étiage chaque année, notée F) pour un nombre total de jaugeages résultant donné par $N = D \cdot F$ (en imposant toutefois un minimum de $N = 4$ jaugeages pour assurer un minimum de robustesse lors de l'ajustement de la relation entre $q_{cib}(t)$ et $q_{ref}(t)$) (Tableau IV-1).

Pour chacune de ces combinaisons, la simulation des jaugeages à partir des chroniques de l'échantillon de référence a alors été réalisée par un premier échantillonnage aléatoire de la période de suivi (*i.e.* échantillonnage par bloc de D années consécutives sauf présence de lacunes) suivi d'un second tirage aléatoire de F dates au cours de chaque saison d'étiage de la période sélectionnée en imposant toutefois un espacement minimum de 15 jours comme énoncé précédemment.

¹ Toutes ces règles ont été en partie définies pour faciliter l'automatisation des simulations au cours de la validation croisée. Elles pourraient bien entendu être assouplies en pratique (par exemple si la saison d'étiage se prolonge au-delà des trois mois suggérés ici ou encore si une remontée temporaire des débits suite à un épisode pluvieux permet de considérer deux mesures espacées de moins de 15 jours comme indépendantes).

	$D = 2$	$D = 4$	$D = 8$	$D = 16$
$F = 1$	Non simulé	4	8	16
$F = 2$	4	8	16	32
$F = 3$	6	12	24	48
$F = 4$	8	16	32	64
$F = 5$	10	20	40	80

Tableau IV-1 : Combinaisons de durée de suivi (D en années) et de fréquence annuelle de jaugeage (F) simulées en validation croisée et nombre total de jaugeages résultant (N)

IV.1.3 Sélection d'un site de référence

Comme précédemment dans le cas de chroniques courtes, les dates de jaugeages obtenues par tirage peuvent ne pas correspondre à une observation sur les sites de référence voisins en raison de la présence de lacunes de mesure. Bien entendu, ce type de situation est également rencontré en pratique avec les données de jaugeage réelles, c'est pourquoi le choix du voisinage sera en premier lieu contraint par l'existence d'observations aux dates de jaugeage simulées. Par ailleurs, on remarquera dès à présent que les données au pas de temps journalier disponibles au(x) site(s) de référence sont assimilées ici par défaut à des données de débits instantanés. Cette hypothèse, difficilement acceptable pour des périodes présentant de brusques variations du débit (*e.g.* en période de crue), a été jugée recevable en période de basses eaux au cours desquelles le débit varie peu au cours d'une même journée et durant lesquelles il est recommandé de pratiquer les jaugeages.

Au-delà de ces aspects pratiques, la problématique de sélection d'un site d'appui constitue une étape clé qui vise, comme pour l'exploitation des chroniques courtes vue au chapitre précédent, à identifier le bassin de référence le plus approprié sur la base de similitudes avec le bassin cible. Ainsi dans le cadre de la valorisation des données de jaugeages, il est avant tout important de s'assurer que le bassin de référence sélectionné réagisse aux mêmes événements météorologiques que ceux éprouvés par le bassin cible. C'est pourquoi la plupart des travaux relevés dans la littérature imposent en premier lieu une contrainte sur la proximité géographique entre le bassin cible et le bassin de référence sélectionné. En complément certains auteurs proposent d'affiner la sélection des sites de référence en considérant d'autres critères de similitudes entre bassins. Pour ce faire Reilly et Kroll (2003) ont privilégié l'emploi de variables auxiliaires descriptives du bassin (*i.e.* descripteurs se rapportant au climat, à la morphologie ou à la géologie des bassins), toutefois la solution la plus intéressante de ce point de vue consiste probablement à caractériser le degré de similitude entre bassin sur la base de la corrélation entre débits mesurés au site cible $q_{cib}(t)$ et débits observés au site de référence $q_{ref}(t)$ à la même date (Stedinger et Thomas (1985) préconisent par exemple de ne retenir que les sites de référence dont la corrélation

dépasse 0.7). En effet l'emploi de la corrélation présente l'avantage de disposer d'un indicateur directement issu de l'information hydrologique disponible au site cible et pouvant se substituer de manière relativement « universelle » (*i.e.* quel que soit le contexte hydro-climatiques du site cible) à l'emploi de descripteurs de bassin.

Dans la continuité de ces différentes approches, nous proposons par conséquent de présélectionner tout d'abord pour chaque site cible un voisinage de 50 sites de référence sur la base de la proximité géographique définie par le calcul de la distance entre bassins suggérée par Ghosh (1951) (critère de distance déjà présenté précédemment en section III.1.3). Pour chacun des bassins de référence sélectionnés sont ensuite calculées les corrélations entre $q_{cib}(t)$ et $q_{ref}(t)$ (coefficient de corrélation de Pearson, noté r dans la suite de ce document) pour finalement retenir le site d'appui présentant le plus fort degré de corrélation (*i.e.* parmi les 50 sites de références sélectionnés, on privilégiera celui pour lequel la corrélation entre $q_{ref}(t)$ et $q_{cib}(t)$ est élevée au dépens de sites géographiquement proches mais présentant un degré de corrélation plus faible).

Selon ce protocole, le choix d'un site de référence est donc réalisé *a posteriori* à partir d'un échantillon préalable de sites géographiquement voisins et pourra par conséquent évoluer avec l'augmentation du nombre de jaugeages réalisés. Cette évolution est à mettre en relation directe avec la significativité de la corrélation en fonction du nombre de jaugeages réalisés. En effet, la forte incertitude associée à la corrélation lorsque le nombre de jaugeages est faible se traduit par une incertitude sur le choix du site de référence le plus pertinent. S'il reste logique de privilégier par défaut le site de référence présentant le plus fort niveau de corrélation, ce choix ne sera pas forcément le plus pertinent avec l'ajout de nouveaux jaugeages et pourra donc évoluer vers la sélection d'un site plus approprié.

IV.1.4 Quantification des incertitudes

Sur la base des éléments présentés précédemment et suivant la démarche proposée par Chopart et Sauquet (2008), une analyse approfondie des incertitudes obtenues en validation croisée a été mise en œuvre de manière à répondre à deux objectifs principaux consistant à déterminer (et si possible modéliser) l'évolution de l'incertitude d'estimation du QMNA5 en fonction :

- (i) de la stratégie de jaugeage adoptée au site cible (*i.e.* en fonction de la durée de suivi (D), de la fréquence annuelle de jaugeages (F) et du nombre de jaugeages résultant (N)) ;
- (ii) de la « proximité » du site de référence (quantifiée au travers de la corrélation entre $q_{ref}(t)$ et $q_{cib}(t)$).

Pour ce faire le protocole retenu a consisté à considérer tour à tour chacune des 632 stations de notre échantillon de référence comme un site cible puis à fournir une estimation à l'aide de la relation présentée en section IV.1.1 en (i) simulant les différentes stratégies de jaugeages décrites en section IV.1.2 par échantillonnage dans la chronique de débit disponible et (ii) en s'appuyant successivement sur un ensemble de sites de référence voisins présentant un degré de corrélation plus ou moins élevé avec le site cible. Signalons que ces différentes opérations ont été répétées 100 fois afin d'obtenir là aussi une

évaluation suffisamment robuste de l'incertitude (*i.e.* indépendante de l'échantillonnage) au terme de la validation croisée.

Pour chaque estimation fournie aux différents sites cible, l'erreur commise a été quantifiée au moyen de l'écart entre les valeurs de QMNA5 prédites et observées, préalablement transformées en débits spécifiques (les incertitudes sont ainsi exprimées en l/s/km²). L'ensemble des résultats obtenus (*i.e.* toutes stations confondues) a ensuite été rassemblé par classe de corrélation (r) permettant d'obtenir, pour chacune des stratégies de jaugeages examinées, une représentation des distributions d'erreurs en fonction de la « proximité » au site cible telle qu'illustrée sur la Figure IV-2 au moyen de boxplots.

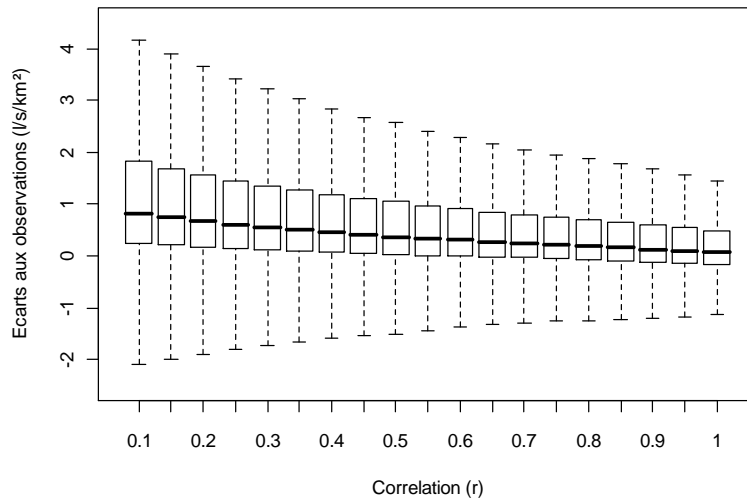


Figure IV-2 : Exemple de distributions d'erreur d'estimation du QMNA5 par classe de corrélation obtenues pour une stratégie de jaugeage simulant une fréquence annuelle de jaugeage $F = 2$ et une durée de suivi de $D = 4$ années (soit au total $N = 8$ jaugeages)

Ces distributions, qui après quelques vérifications apparaissent comme suffisamment proches d'une distribution normale, ont enfin été résumées par leurs moyennes (notées $bias_{(r,N,F)}$, différentes de la médiane représentée par un trait gras sur la Figure IV-2) et de leurs écarts types (notés $\sigma_{(r,N,F)}$) de manière à pouvoir construire un intervalle de confiance autour de chaque estimation en fonction de la corrélation (r), du nombre de jaugeages (N) et de la fréquence annuelle de jaugeage (F), comme donné en exemple ci-dessous pour un niveau de confiance à 95 % :

$$P(Q_{est} + bias_{(r,N,F)} - 1.96 \cdot \sigma_{(r,N,F)} < Q_{obs} < Q_{est} + bias_{(r,N,F)} + 1.96 \cdot \sigma_{(r,N,F)}) \approx 0.95$$

(IV.4)

IV.2 Résultats de la validation croisée et modélisation de l'incertitude

L'examen des résultats de la validation croisée en terme d'incertitude s'est avant tout concentré sur le critère d'écart type $\sigma_{(r,N,F)}$ qui détermine seul la largeur de l'intervalle de confiance et, de ce fait, constitue le critère le plus pertinent pour évaluer ici l'évolution des performances en fonction de la stratégie de jaugeage adoptée au site cible et de la « proximité » du site de référence employé pour réaliser l'estimation. Le critère de $bias_{(r,N,F)}$ sera traité dans un second temps de manière à permettre la correction des estimations et l'évaluation finale des bornes d'un intervalle de confiance de niveau de significativité voulu.

IV.2.1 Analyse et modélisation de l'écart type des erreurs d'estimation

La Figure IV-3 illustre, indépendamment pour les cinq fréquences annuelles de jaugeage simulées, les valeurs de $\sigma_{(r,N,F)}$ obtenues en validation croisée pour un nombre de jaugeages croissant et selon différentes classes de corrélation comprises ici entre 0.5 et 1 (gamme dans laquelle se trouvent plus de 99 % des valeurs de corrélation obtenues durant la validation croisée pour les sites de référence sélectionnés selon le protocole décrit en section IV.1.3).

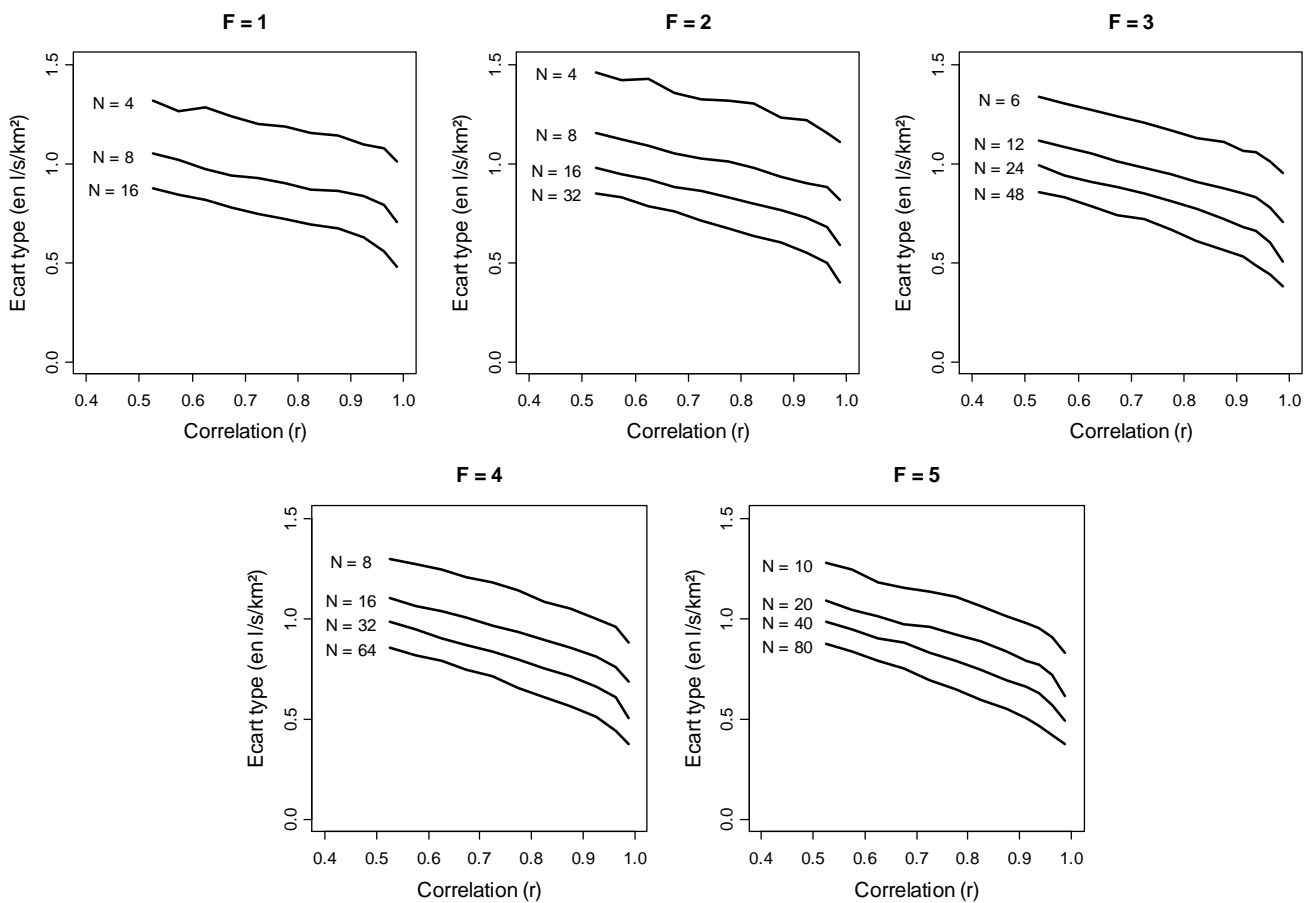


Figure IV-3 : Incertitudes d'estimation (écart type des erreurs d'estimation en l/s/km²) en fonction de la corrélation r et du nombre de jaugeages N pour les cinq fréquences de jaugeage simulées

On constate sur cette figure que, pour une même fréquence de jaugeage, l'ensemble des courbes représentées s'avère globalement parallèle, indiquant que lorsque l'on double le nombre de jaugeages simulés, le gain de performance peut être considéré comme relativement uniforme quel que soit le degré de corrélation entre les débits mesurés au site cible et les débits observés aux sites de référence. En revanche, il apparaît visiblement que ce gain diminue progressivement avec l'augmentation du nombre de jaugeages.

Quelques essais ont montré qu'il était possible de reproduire assez correctement cette évolution à l'aide d'une simple relation linéaire en fonction du logarithme du nombre de jaugeages simulé :

$$\sigma_{(r,N,F)} = a_{(r,F)} \cdot \ln(N) + b_{(r,F)} \quad (IV.5)$$

L'analyse des paramètres ajustés montre que $a_{(r,F)}$ prend comme prévu une valeur négative (*i.e.* l'incertitude décroît avec l'augmentation du nombre de jaugeages) relativement constante quel que soit r . Ce résultat confirme indirectement que le gain de performance lorsque le nombre de jaugeages augmente (*i.e.* la différence entre les incertitudes lorsque le nombre de jaugeages double) ne dépend donc pas ou peu de la corrélation.

A l'inverse le paramètre $b_{(r,F)}$ permet de rendre compte de l'évolution de l'incertitude en fonction du degré de corrélation et décroît lorsque r augmente. Il correspond en effet à la valeur d'incertitude théoriquement obtenue en extrapolation en ne réalisant qu'un unique jaugeage¹ et se réfère par conséquent à l'évolution de l'incertitude en fonction de la corrélation r , indépendamment du nombre de jaugeages réalisés ($\ln(N=1) = 0$ d'où $\sigma_{(r,N=1,F)} = b_{(r,F)}$). A l'examen des différents graphiques, il apparaît que cette évolution pourrait être à nouveau reproduite à l'aide d'une simple approximation linéaire, cependant pour pouvoir restituer correctement l'inflexion constatée entre $r = 0.95$ et $r = 1$, une fonction puissance semble *a priori* plus appropriée. Les deux solutions ont été examinées et intégrées à l'équation (IV.5) pour donner deux nouvelles formulations analytiques de l'écart type en fonction du nombre de jaugeages N et du degré de corrélation r :

$$\sigma_{(r,N,F)} = a_{(F)} \cdot \ln(N) + c_{(F)} \cdot (1-r) + d_{(F)} \quad (IV.6)$$

$$\sigma_{(r,N,F)} = a_{(F)} \cdot \ln(N) + c_{(F)} \cdot (1-r)^{d_{(F)}} \quad (IV.7)$$

Les résultats obtenus à partir de l'ajustement de ces deux modèles (illustrés sur la Figure IV-4 et la Figure IV-5 pour trois des cinq fréquences annuelles de jaugeage) montrent que l'on parvient à des performances quasiment identiques (*i.e.* l'erreur moyenne (RMSE) indique des performances proches, de l'ordre de $4 \cdot 10^{-2}$ l/s/km²) et satisfaisantes avec des écarts aux valeurs observés pratiquement négligeables devant $\sigma_{(r,N,F)}$.

¹ Cette valeur reste théorique puisque l'ajustement de la relation entre $q_{ref}(t)$ et $q_{cib}(t)$ requiert un minimum théorique de 2 jaugeages.

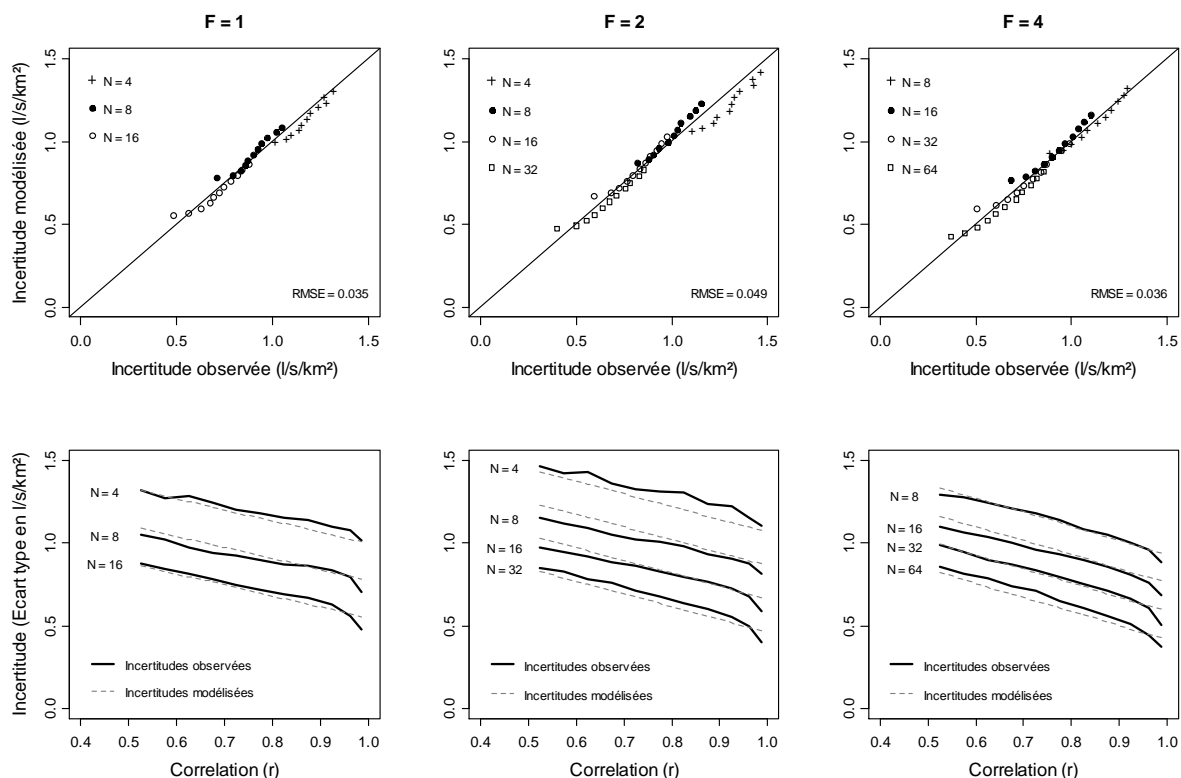


Figure IV-4 : Comparaison des incertitudes observées et modélisées à l'aide de l'équation (IV.6) en fonction de la fréquence de jaugeage

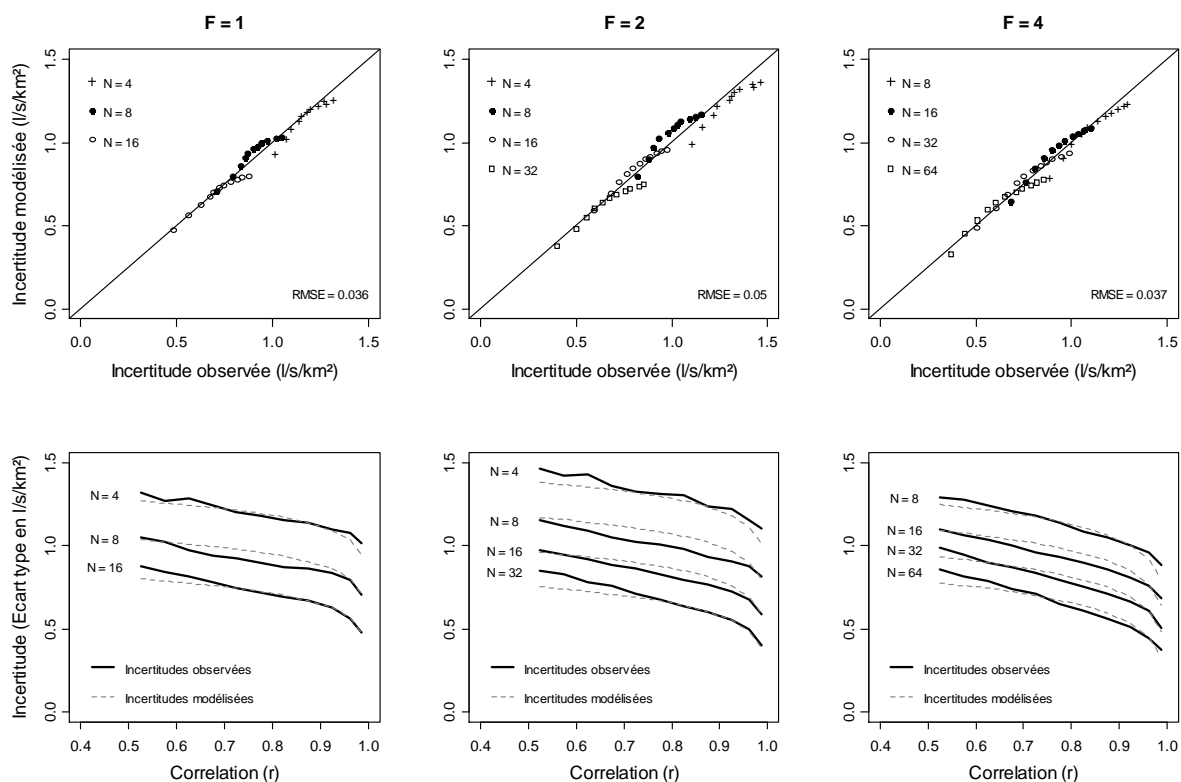


Figure IV-5 : Comparaison des incertitudes observées et modélisées à l'aide de l'équation (IV.7) en fonction de la fréquence de jaugeage

La différence entre les deux modèles provient alors essentiellement de la manière dont sont répartis les écarts en fonction de la classe de corrélation qui s'avèrent plus équilibrés lorsque l'équation (IV.6) est employée (seules les incertitudes dans la gamme de corrélation $r = 0.95$ à $r = 1$ se distinguent par une sur-estimation plus importante et presque généralisée, ce qui reste néanmoins préférable à une sous-estimation). Ces observations nous ont amenés à considérer l'équation (IV.6) comme la plus appropriée bien qu'elle soit peut-être analytiquement moins justifié que l'équation (IV.7).

Les coefficients de l'équation (IV.6), ajustés indépendamment pour les cinq fréquences annuelles de jaugeages simulées, sont reportées dans le Tableau IV-2. Ils vont être exploités dans les paragraphes suivants pour mieux caractériser l'évolution des performances d'estimation du QMNA5 en fonction de la stratégie de jaugeage.

F	$a_{(F)}$	$c_{(F)}$	$d_{(F)}$
1	-0.326	0.664	1.452
2	-0.290	0.770	1.468
3	-0.263	0.822	1.441
4	-0.248	0.849	1.446
5	-0.238	0.887	1.443

Tableau IV-2 : Paramètres des cinq modèles d'incertitude ajustés pour chaque fréquence de jaugeage simulée

▪ Influence du nombre de jaugeages

Dans un premier temps on se propose d'examiner ici, au travers des différents modèles d'incertitude ajustés, l'influence du nombre de jaugeages sur les performances d'estimation du QMNA5 et, à partir de là, de déterminer l'intérêt à poursuivre une campagne de mesures pour une fréquence de jaugeage donnée. Ainsi, il a été représenté sur la Figure IV-6, le gain cumulé théorique apporté par l'augmentation du nombre de jaugeages (volontairement poussé jusqu'à 100) en supposant le niveau de corrélation r constant.

On constate assez aisément ici que le gain de performance est nettement sensible jusqu'à environ 20 à 25 jaugeages quelle que soit la fréquence de jaugeage considérée puis qu'il s'amortit au-delà, d'autant plus rapidement que la fréquence de jaugeages est élevée. Ce résultat s'accorde relativement bien avec les conclusions des différents travaux relevés dans la littérature (*e.g.* Stedinger (1985), Reilly et Kroll (2003)) et peut donc être considéré comme une bonne recommandation sur la durée de suivi optimale d'un site selon la fréquence de jaugeage adoptée.

Cette conclusion n'a cependant qu'un caractère indicatif car il n'est pas pris en compte ici la possible évolution de la corrélation avec l'augmentation du nombre de jaugeages qui s'avère difficilement prévisible (*cf.* section IV.1.3). On peut néanmoins préciser, à partir de l'analyse des résultats de la validation croisée, que l'augmentation du nombre de jaugeages s'accompagne généralement d'une

diminution du niveau de corrélation dans environ 75 % des simulations réalisées. Si cette perte s'avère le plus souvent largement insuffisante pour annuler le gain lié à l'augmentation du nombre de jaugeages, il en résulte tout de même que le gain « réel » (*i.e.* tenant compte du différentiel de corrélation) reste généralement inférieur au gain « théorique » tel que calculé ici en supposant la corrélation constante.

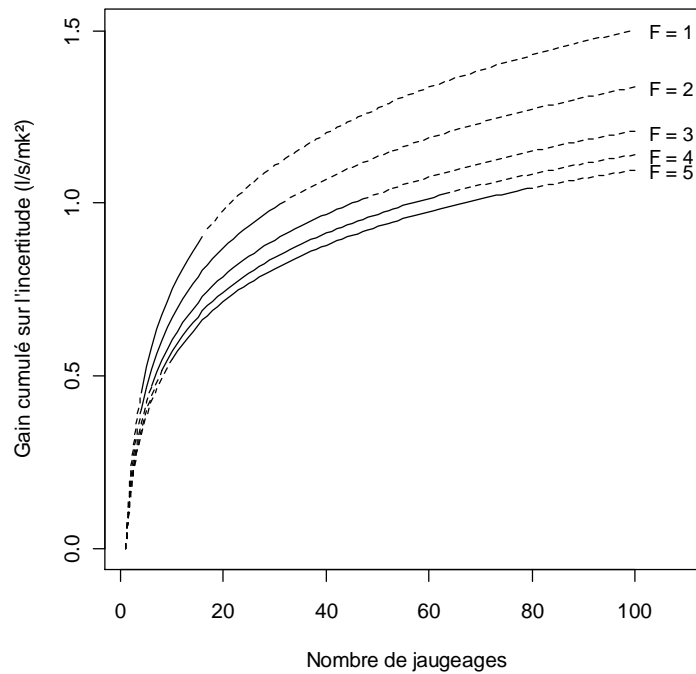


Figure IV-6 : Gains cumulés sur l'incertitude en fonction de l'augmentation du nombre de jaugeages pour les cinq fréquences de jaugeage simulées en supposant une corrélation constante (les incertitudes fournies par les modèles pour des configurations non simulées sont représentés en pointillés).

▪ Influence de la fréquence de jaugeage

L'analyse des différents paramètres du modèle E2 en fonction de la fréquence annuelle de jaugeage permet à elle seule de présumer que l'augmentation de la fréquence de jaugeage s'accompagne d'un gain de performance moins rapide, la différence étant d'autant plus marquée que le nombre de jaugeages final est élevé (autrement dit l'intérêt à augmenter le nombre de mesures pour réduire l'incertitude est d'autant plus important que la fréquence de jaugeage est faible, la Figure IV-6 déjà présentée précédemment illustre bien cette observation).

Une bonne illustration de ce résultat consiste à calculer, pour $F > 1$, le nombre de jaugeages équivalent (noté N_{eq}) permettant de parvenir aux mêmes performances que celles obtenues pour $F = 1$ et un nombre de jaugeages N donné. Ceci revient simplement à résoudre l'égalité suivante pour différentes valeurs de N :

$$\sigma_{(r,N,F=1)} = \sigma_{(r,N_{eq},F>1)} \quad (IV.8)$$

La Figure IV-7 résume les résultats obtenus pour N allant jusqu'à 20 et trois niveaux de corrélation distincts. Elle permet effectivement de constater que N_{eq} est toujours supérieur à N et croît (non linéairement) lorsque N augmente, et ce d'autant plus fortement que la corrélation est basse et que la fréquence de jaugeage est élevée. Il semble bien que l'hypothèse de l'existence d'une dépendance intra-annuelle des valeurs jaugeées (*i.e.* lorsque $F > 1$) soit à l'origine de ce résultat et qu'elle soit d'autant plus fortement ressentie que le nombre de jaugeages est élevé (autrement dit plus l'on jauge, plus le gain d'information par rapport à la réalisation d'un seul jaugeage par année diminue).

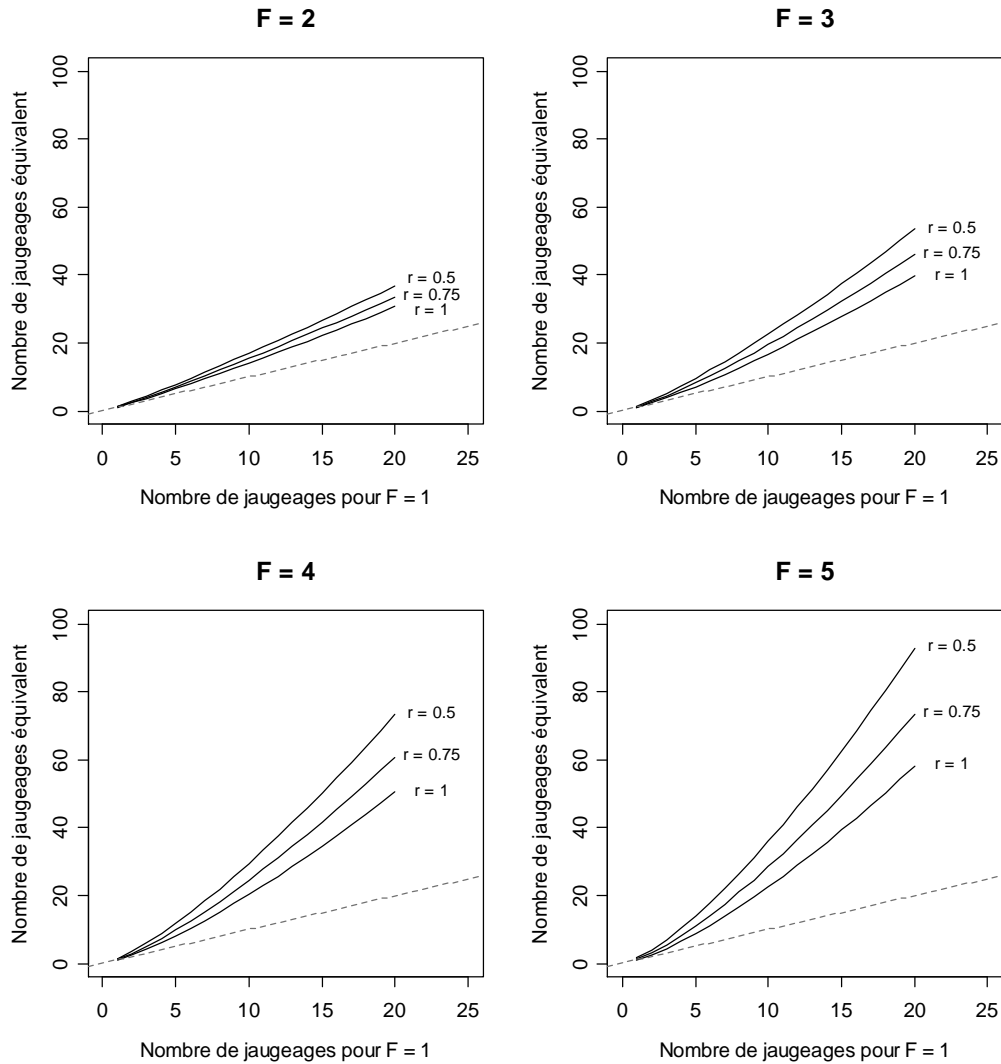


Figure IV-7 : Nombre de jaugeages équivalent pour $F > 1$ en fonction du nombre de jaugeages réalisés pour $F = 1$

Ainsi, si l'objectif est d'aboutir à la réalisation d'un total de 20 jaugeages, il sera préférable de répartir les mesures sur une durée de 20 ans (*i.e.* $F = 1$) plutôt que sur 10 ($F = 2$) ou 5 années ($F = 4$). Toutefois cette conclusion cache une ambiguïté. En effet si l'on raisonne cette fois en terme de durée de suivi équivalente ($D_{eq} = N_{eq}/F$), il apparaît que des performances identiques peuvent être obtenues sur une durée plus courte en augmentant la fréquence de jaugeage. Ce résultat est illustré sur la Figure IV-8. On constate bien que D_{eq} reste ici inférieure à D . Ainsi si l'objectif est d'aboutir à un résultat équivalent à

celui obtenu pour 20 jaugeages répartis sur 20 années, il est en réalité possible d'écourter la période de suivi à environ 17 ans pour une fréquence de jaugeage $F = 2$ (avec $N_{eq} \approx 34$ jaugeages) et à environ 15 années pour une fréquence de jaugeage $F = 4$ (avec $N_{eq} \approx 60$ jaugeages)¹.

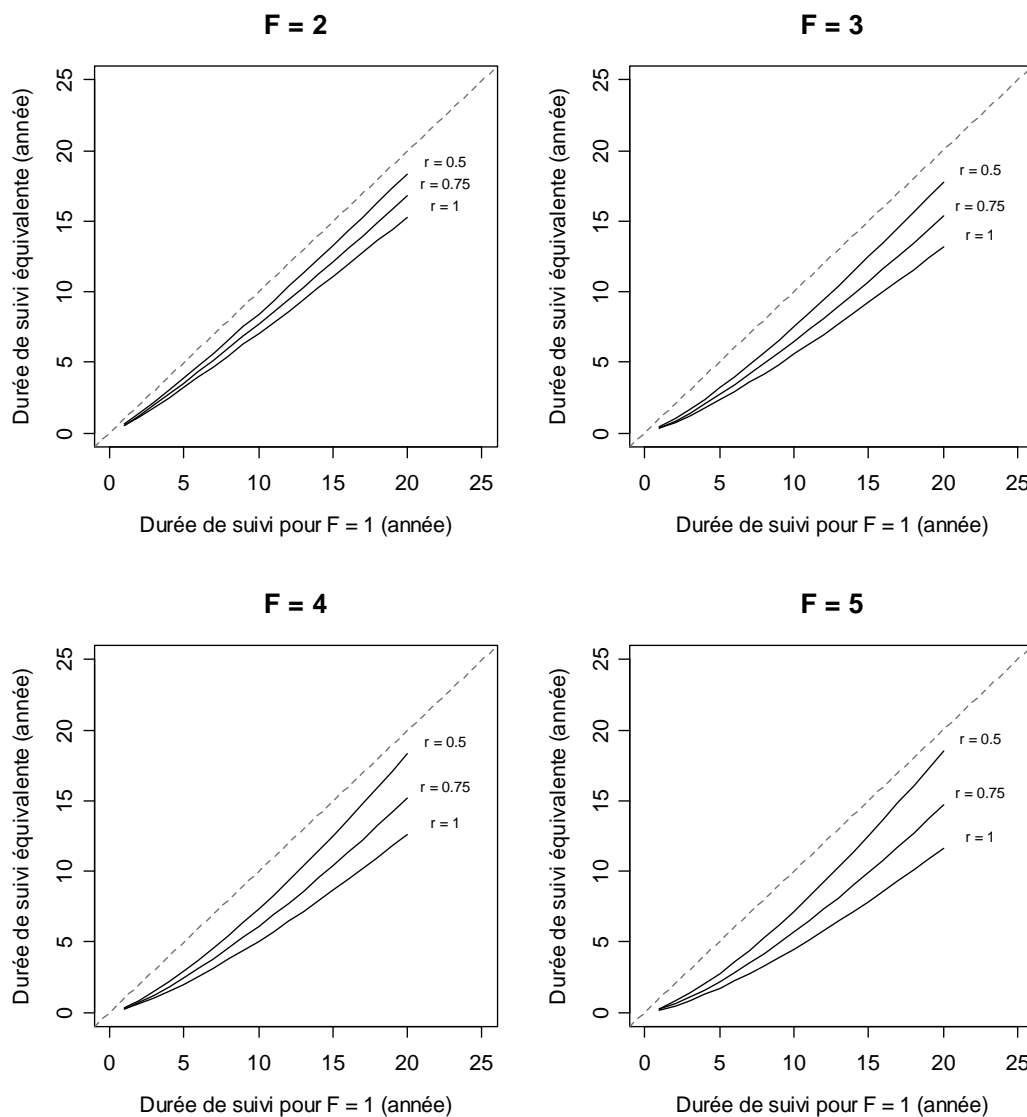


Figure IV-8 : Durée de suivi équivalente pour $F > 1$ en fonction de la durée de suivi pour $F = 1$

Compte tenu de ces observations il apparaît donc avantageux d'augmenter la fréquence annuelle de jaugeage pour écourter (un peu) la durée de suivi d'un site. A cet égard, la réalisation de trois jaugeages par année constitue sans doute le meilleur compromis. Au-delà, pour $F = 4$ ou $F = 5$, le gain supplémentaire en terme de durée de suivi par rapport à $F = 3$ s'avère pratiquement négligeable (inférieur à 1 an).

¹ Il s'agit en réalité d'une fourchette de durées équivalentes dépendant du niveau de corrélation considéré

▪ **Cas d'une stratégie de jaugeage complexe**

Jusqu'ici, l'analyse des modèles d'incertitude s'est limitée à des cas simples où la fréquence de jaugeages reste constante durant toute la campagne de suivi. Une des principales difficultés tient à la possible irrégularité de la fréquence de jaugeage durant la période de suivi du site cible comme cela s'observe le plus souvent en pratique dans les données de jaugeage. Une solution consiste alors à traiter cette irrégularité comme une succession de périodes où la fréquence de jaugeage est constante puis à raisonner en terme de gain sur l'incertitude.

A titre d'exemple, considérons une campagne de jaugeage d'une durée totale de $D = 20$ années au cours de laquelle le suivi a été effectué au moyen de deux jaugeages par an sur les dix premières années ($F_1 = 2$ et $D_1 = 10$) puis au moyen de un jaugeage par an pendant les dix années restantes ($F_2 = 1$ et $D_2 = 10$). Le nombre total de jaugeage réalisé est donné par $N = F_1 \cdot D_1 + F_2 \cdot D_2 = N_1 + N_2 = 30$ tandis que la fréquence de jaugeage moyenne est donnée par $F = N/D = 1.5$.

Si le premier modèle d'incertitude permet de quantifier directement l'incertitude de l'estimation obtenue au bout des premières dix années (noté $\sigma_{(r_1, F_1, D_1)}$), le second modèle servira en revanche à quantifier le gain apporté par les nouvelles mesures réalisées au cours de la période D_2 (noté $\Delta\sigma_{(r_2, F_2, D_2)}$). L'incertitude finale sur la totalité de la période de suivi sera simplement quantifiée par :

$$\sigma_{(r, N, F)} = \sigma_{(r_1, N_1, F_1)} + \Delta\sigma_{(r_2, F_2, D_2)} \quad (IV.9)$$

Un point important pour parvenir au bon résultat réside alors dans la manière de quantifier correctement le gain $d\sigma_{(r_2, F_2, D_2)}$. En effet, dans le cas d'une fréquence de jaugeage constante ce gain serait théoriquement donné par :

$$\Delta\sigma_{(r_2, N_2, F_2)} = a_{(F_2=1)} \cdot (\ln(N_1 + N_2) - \ln(N_1)) + c_{(F_2=1)} \cdot (r_2 - r_1) \quad (IV.10)$$

Or N_1 correspond ici au nombre de jaugeages obtenu pour $F_1 = 2$, il est donc au préalable nécessaire de calculer le nombre de jaugeage équivalent à N_1 en prenant $F_1 = 1$. Il en résulte que :

$$\Delta\sigma_{(r_2, N_2, F_2)} = a_{(F_2=1)} \cdot (\ln(N_{eq} + N_2) - \ln(N_{eq})) + c_{(F_2=1)} \cdot (r_2 - r_1) \quad (IV.11)$$

En reprenant les caractéristiques de la campagne de jaugeage décrite plus haut, les résultats obtenus par cette méthode pour déterminer $\sigma_{(r, N, F)}$ peuvent être illustrés à l'aide d'un graphique montrant l'évolution de l'incertitude en fonction du nombre de jaugeages (Figure IV-9, ici pour trois niveaux de corrélation distincts). Celui-ci permet bien de constater une modification du gain de performance lié à la modification de la fréquence de jaugeage. Bien entendu, cette démarche pourra *a priori* être répétée autant de fois qu'il y a de modifications de la fréquence de jaugeage au cours de la période de suivi de manière à reproduire pratiquement n'importe quelle campagne de jaugeage (sous réserve que les fréquences de jaugeage mises en oeuvre correspondent à celles simulées).

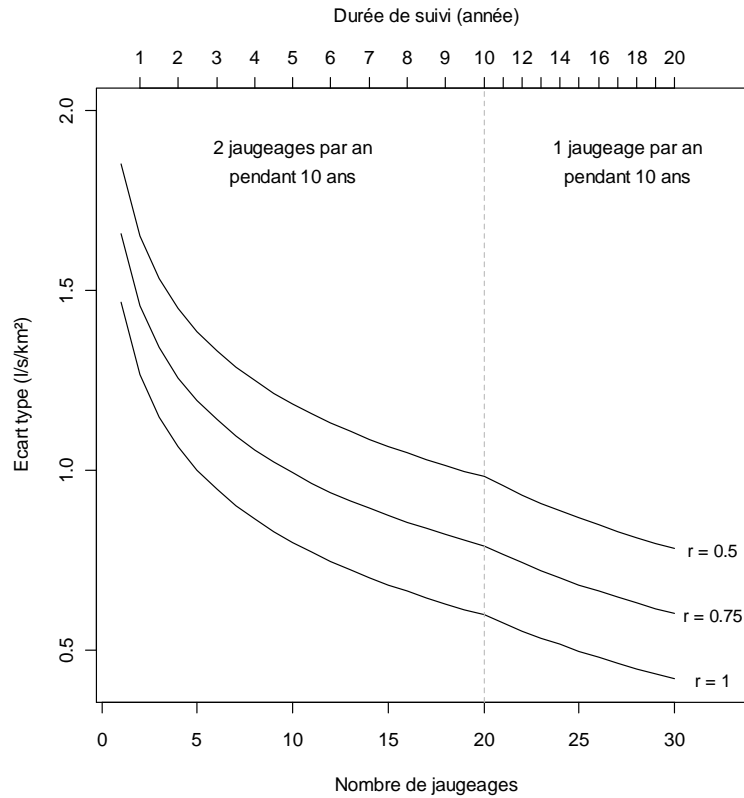


Figure IV-9 : Exemple d'évolution de l'incertitude en fonction du nombre de jaugeages dans le cas d'une modification de la fréquence de jaugeage au cours du suivi d'un site cible

IV.2.2 Analyse et modélisation du biais d'estimation

Comme mentionné en section IV.1.4, si l'objectif est de fournir une valeur approchée de l'intervalle de confiance de niveau de signification voulu pour chaque valeur de QMNA5 estimée, le modèle donnant l'écart type $\sigma_{(r,N,F)}$ en fonction du degré de corrélation r , du nombre de jaugeage N et de la fréquence annuelle de jaugeage F doit être accompagné d'un modèle permettant de corriger préalablement le biais moyen affectant les estimations ($bias_{(r,N,F)}$).

La Figure IV-10 illustre le biais d'estimation obtenu en fonction du niveau de corrélation pour les différentes fréquences annuelles de jaugeage simulées et pour un nombre de jaugeage croissant. On constate en premier lieu que ce biais est toujours positif et traduit une tendance à la sur-estimation du QMNA5.

Les graphiques montrent également que le biais est principalement conditionné par le niveau de corrélation, avec une évolution assez proche de celle observée précédemment pour $\sigma_{(r,N,F)}$ (i.e. inflexion entre $r = 0.95$ et $r = 1$ suivie d'un accroissement assez constant jusqu'à $r = 0.5$), tandis que l'influence du nombre de jaugeages est assez peu sensible.

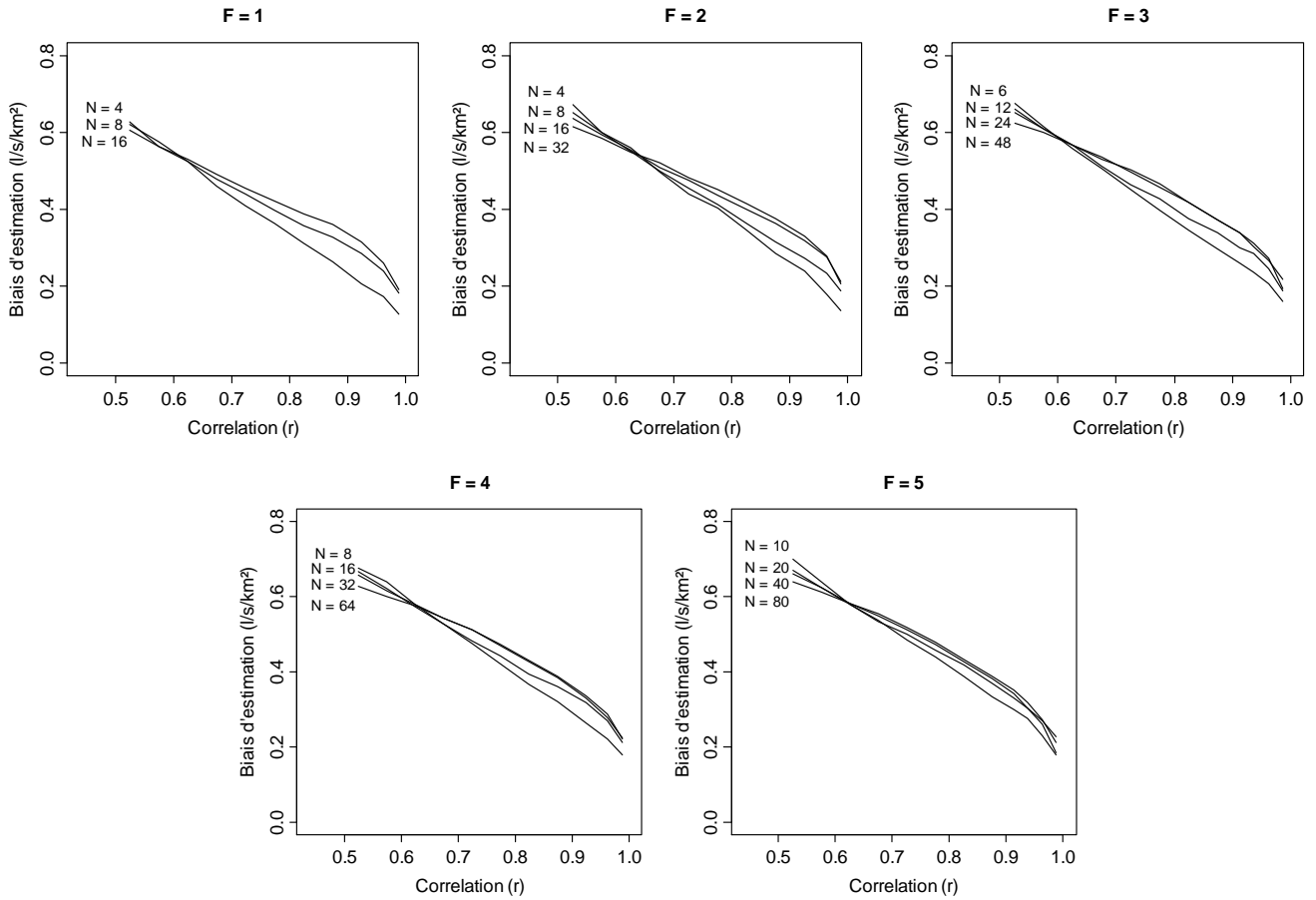


Figure IV-10 : Biais d'estimation en fonction de la corrélation r et du nombre de jaugeages N pour les cinq fréquences de jaugeage simulées

Compte tenu de ces observations il a été choisi, pour chaque fréquence de jaugeage simulée, de n'ajuster qu'une simple approximation linéaire ne dépendant que de la corrélation r :

$$bias_{(r,N,F)} = \alpha_{(F)} \cdot r + \beta_{(F)} \quad (IV.12)$$

Les paramètres ajustés et les performances moyennes (quantifiées par le RMSE) des cinq modèles en fonction de F sont reportés dans le *Tableau IV-3*. Les résultats obtenus permettent de constater que les ajustements réalisés sont très proches avec des pentes $\alpha_{(F)}$ pratiquement identiques et des ordonnées à l'origine $\beta_{(F)}$ croissantes mais comparables. Les performances s'avèrent elles-aussi très voisines et montrent une reconstitution du biais satisfaisante en moyenne. Toutefois de forts écarts aux valeurs observées peuvent survenir (de l'ordre de 0.06 à 0.08 l/s/km² pour une corrélation autour de 0.95). Si ces écarts s'avèrent non négligeables devant les valeurs de biais associées, ils restent en revanche assez peu significatifs comparés aux valeurs d'un intervalle de confiance à 95 % ce qui permet de considérer finalement ces modèles comme suffisamment satisfaisants.

F	$\alpha(F)$	$\beta(F)$	RMSE (l/s/km ²)
1	-0.908	1.095	0.023
2	-0.929	1.136	0.022
3	-0.938	1.154	0.022
4	-0.922	1.155	0.019
5	-0.942	1.177	0.019

Tableau IV-3 : Paramètres et performances moyennes des modèles de biais ajustés sur les données en fonction de la corrélation pour les cinq fréquences annuelles de jaugeage simulées

De même que dans le cas de l'écart type $\sigma_{(r,N,F)}$, on précisera pour finir que les modèles présentés ci-dessus ne peuvent être appliqués directement en cas de modification de la fréquence de jaugeage au cours d'une campagne de suivi. Si le raisonnement présenté en section IV.2.1 reste identique, l'absence de terme lié au nombre de jaugeages N simplifie grandement ici la formulation du biais final. Ainsi en reprenant les caractéristiques de la campagne de jaugeage présentée précédemment en guise d'exemple, le biais final sera donné par :

$$bias_{(r,N,F)} = bias_{(r_1,N_1,F_1)} + \Delta bias_{(r_2,N_2,F_2)}$$

$$\text{avec} \quad bias_{(r_1,N_1,F_1)} = \alpha_{(F_1=1)} \cdot r_1 + \beta_{(F_1=1)}$$

$$\text{et} \quad \Delta bias_{(r_2,N_2,F_2)} = \alpha_{(F_2=2)} \cdot (r_2 - r_1) \quad (IV.13)$$

IV.3 Comparaison avec les performances d'estimation du QMNA5 à partir de chroniques courtes

On se propose ici d'illustrer brièvement les performances relatives des techniques d'estimation du QMNA5 par valorisation des données de jaugeages d'une part et l'exploitation de chroniques courtes d'autre part. Pour ce faire nous avons repris les résultats de validation croisée obtenus au Chapitre III avec la meilleure modalité de réajustement (*cf.* section III.2). Ces résultats sont comparés à ceux fournis en simulation par la méthode de valorisation des jaugeages épisodiques dans la configuration de suivi la plus efficace pour réduire l'incertitude d'estimation du QMNA5 (fréquence annuelle de jaugeage $F = 5$) mais en ne conservant cette fois-ci que l'estimation fournie par le site d'appui présentant le meilleur degré de corrélation avec le site cible (opération là aussi répétée 100 fois pour chaque site cible).

Les résultats obtenus à durée de suivi équivalente en termes d'erreur absolue (écart entre les valeurs de QMNA5 prédites et observées en l/s/km²) et de largeur de l'intervalle de confiance à 95 % sont résumés sur la Figure IV-11 sous la forme de boxplots. La comparaison des performances montre sans surprise que la valorisation des données de jaugeages s'avère globalement moins efficace que l'exploitation des chroniques courtes pour la prédétermination du QMNA5 (on note toutefois que les

intervalles de confiance les plus larges semblent étonnamment moins fréquents avec le recours aux jaugeages volants). La quantité d'information à caractère hydrologique disponible au site cible apparaît donc bien comme un facteur d'amélioration des résultats, néanmoins la faible quantité de données nécessaire (relativement parlant) et la sobriété des moyens à mettre en oeuvre par rapport à l'implantation d'une station hydrométrique pérenne font que la technique d'estimation reposant sur les jaugeages volants reste une solution particulièrement avantageuse et ne doit pas être négligée.

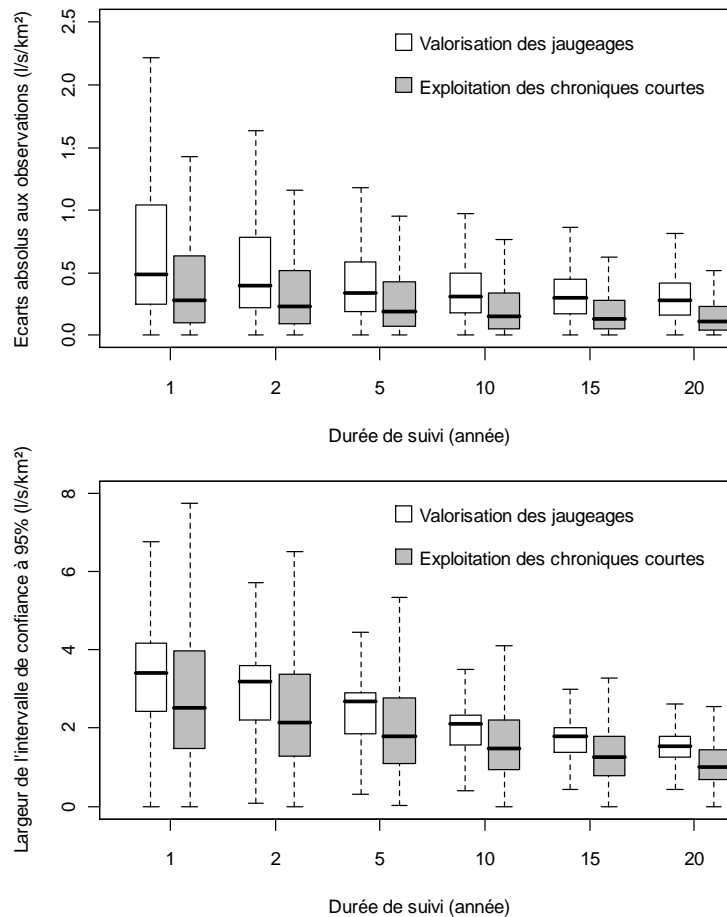


Figure IV-11 : Comparaison des performances d'estimation du QMNA5 par valorisation de données de jaugeages volants (en blanc) et par exploitation de chroniques courtes (en gris)

IV.4 Conclusion du chapitre

Au cours de ce chapitre nous avons vu différents éléments méthodologiques permettant d'exploiter les données de jaugeages volants pour parvenir à la prédétermination de la variable d'étiage QMNA5. La méthode proposée, qui s'inspire en partie des différents travaux relevés dans la littérature, fait appel à une mise en relation (log-linéaire) entre les débits jaugés au site cible et les débits observés à la même date au droit d'une station hydrométrique de référence voisine. Il est alors fait l'hypothèse que cette relation constitue une bonne approximation de la relation entre le QMNA5 recherché au site cible et celui connu au site d'appui.

Concernant le choix du site de référence, la procédure adoptée s'appuie sur la présélection d'un ensemble de stations hydrométriques géographiquement voisines parmi lesquelles est finalement retenu le site de référence dont les observations de débits sont les plus corrélées à celles issues des mesures de jaugeages réalisées au site cible. L'intérêt est alors de disposer d'un indicateur de « proximité » directement issu de l'information hydrologique disponible au site cible et considéré comme pertinent pour caractériser le degré de similitude entre bassins vis-à-vis de leur réponse aux événements climatiques.

L'application de ce protocole d'estimation en validation croisée a ensuite porté sur l'exploration de différentes stratégies de jaugeage au travers d'un jeu de simulations faisant intervenir plusieurs combinaisons de fréquences annuelles de jaugeage (F) et durées de suivi (D) pour un nombre de jaugeages résultant $N = D \cdot F$. Il s'agissait ainsi de préciser les modalités optimales de mise en œuvre d'une campagne de jaugeage dédiée à l'estimation du QMNA5. Pour ce faire et en s'inspirant de l'approche ébauchée par Chopart et Sauquet (2008), les résultats obtenus à l'issue de la validation croisée ont été traités de manière à déterminer l'intervalle de confiance de niveau de significativité voulu associé à chaque estimation en fonction de la stratégie de jaugeage adoptée au site cible et de la « proximité » du site de référence employé pour réaliser l'estimation. L'analyse des résultats, synthétisés au travers de modèles analytiques simples, a permis de mieux interpréter l'influence de ces différents paramètres. Il est ainsi tout d'abord apparu que, outre l'importance de disposer d'un site d'appui présentant une dynamique suffisamment voisine de celle du site cible (*i.e.* plus la corrélation est élevée plus les estimations sont fiables), le gain de performance apporté par l'augmentation du nombre de jaugeages était sensible jusqu'à 20 à 25 mesures environ puis qu'il s'atténuait assez rapidement au-delà. Parallèlement, il a été démontré que la réalisation de plusieurs jaugeages au cours d'une même année conduisait, pour un nombre de jaugeages équivalent, à un gain de performance moins rapide en raison semble-t-il de la dépendance intra-annuelle des débits jaugés. Néanmoins les résultats indiquent qu'il est tout de même possible d'écourter un peu la durée de suivi d'un site en augmentant la fréquence annuelle de jaugeage (le meilleur compromis semble alors être la réalisation de trois jaugeages chaque année).

La confrontation des résultats obtenus avec ceux issus de la méthode de réajustement destinée à estimer le QMNA5 à partir de chroniques courtes (vue au Chapitre III) montre sans surprise que le caractère beaucoup plus fragmentaire des données de jaugeage s'avère évidemment préjudiciable à la qualité des estimations. Néanmoins, les avantages offerts par le recours aux données jaugeages en termes de coût ou vis-à-vis des possibilités de suivi des sites difficiles à équiper d'une station hydrométrique permanente en font une source d'information à ne pas négliger. Il s'agira alors de démontrer l'intérêt de la technique mise en œuvre ici par rapport à une estimation du QMNA5 en l'absence de données de débit (*i.e.* en sites non jaugés) qui est abordée dans les prochains chapitres.

Références bibliographique

- Chopart S., Sauquet E. (2008). Using spot gauging data to interpolate low flow characteristics. *Journal of Water Science*, Vol. 21(3), pp. 267-281.
- Dingman S., Putscher J. (1991). Applicability of concurrent baseflow measurements for estimation of low-flow statistics in New Hampshire and Vermont. Water Resources Research Center, University of New Hampshire, Durham, New Hampshire.
- DIREN Rhône Alpes (2003). Les débits d'étiage en Rhône-Alpes. Rapport d'étude, 14 pp.
- Eng K., Milly P.D.C (2007). Relating low-flow characteristics to the base flow recession time constant at partial record stream gauges. *Water Resources Research*, Vol. 43(1), W01201.
- Galéa G., Canali, S. (2005). Régionalisation des modules annuels et des régimes d'étiage du bassin hydrographique de la Moselle française : lien entre modèles régionaux. *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 18(3), pp. 331-352.
- Ghosh B. (1951). Random distances within a rectangle and between two rectangles. *Bulletin of Calcutta Mathematical Society*, Vol. 43(1), pp. 17-24.
- Gottschalk L. (1993). Interpolation of runoff applying objective methods. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 7(4), pp. 269-281.
- 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.*, vol. X, No. 4, pp. 349-368.
- Potter K.W. (2001). A simple method for estimating baseflow at ungauged stations. *Journal of American Water Resources Association*, Vol. 37(1), pp. 177-184.
- Reilly C.F., Kroll C.N. (2003). Estimation of low streamflow statistics using baseflow correlation. *Water Resources Research*, Vol. 39(9), No 1236.
- Riggs H.C. (1972). *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey - Chapter B1 : Low-flow estimation*. USGS publication.
- Sauquet E., Gottschalk L., Krasovskaia I. (2008). Estimating mean monthly runoff at ungauged locations : an application to France. *Hydrology Research*, Vol. 39(5-6), pp. 403-423.
- Stedinger J.R., Thomas W.O. (1985). Low-flow frequency estimation using base-flow measurements. USGS Scientific Investigations, Report 85-95.
- Zhang Z., Kroll C. (2007). The baseflow correlation method with multiple gauged sites. *Journal of Hydrology*, Vol. 347(3-4), pp. 371-380.

TROISIEME PARTIE

ESTIMATION DU QMNA5 EN SITES NON JAUGES

Chapitre V.

Première estimation en sites non jaugés

L'estimation de variables hydrologiques en sites non jaugés, incluant un certain nombre de statistiques relatives aux étiages, constitue un domaine de l'hydrologie qui a fait l'objet de nombreux travaux ces dernières années, notamment sous l'impulsion du programme scientifique « Prediction in Ungauged Basins » (PUB) proposé en 2003 à l'initiative de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (AISH) (Sivapalan *et al.* (2003)). De réelles avancées ont ainsi été faites en la matière avec le développement de méthodes de plus en plus perfectionnées.

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'éprouver certaines de ces méthodes pour fournir une estimation du QMNA5 sur l'ensemble du réseau hydrographique français, ou plus précisément sur l'ensemble des points du réseau n'ayant jamais fait l'objet d'un suivi des débits contrairement aux sites peu jaugés traités dans les chapitres précédents. Bien entendu la tâche est délicate, notamment en raison du nombre de points concernés (72539 points drainant une surface de plus de 50 km²) et de la grande diversité des contextes hydro-climatiques existant sur le plan national. Il apparaît ainsi pratiquement impossible de restituer l'ensemble des singularités locales et les estimations fournies ne pourront évidemment se substituer à une connaissance approfondie des particularités de chaque bassin.

De ces précautions d'usage résulte évidemment la nécessité d'associer une incertitude à chaque estimation. Encore une fois, c'est au travers d'une démarche de validation croisée qu'il nous sera permis de quantifier ces incertitudes et ainsi de dégager les modalités d'estimation qui permettront de parvenir aux meilleures performances.

V.1 Eléments de méthodologie

En l'absence d'observation de débit, les techniques d'estimation en sites non jaugés compensent le défaut d'information hydrologique locale par l'emploi de l'information régionale disponible aux sites instrumentés qu'il convient alors de choisir avec soin mais aussi, selon les cas, par l'utilisation de variables descriptives du bassin versant (*e.g.* surface drainée, altitude, pluviométrie...). Il est alors fait appel à un modèle plus ou moins complexe pour expliquer et décrire la variabilité de l'information que l'on souhaite estimer et, de là, fournir une estimation au site cible.

V.1.1 Etat de l'art des méthodes d'estimation

Parmi les techniques d'estimation en sites non jaugés identifiées dans la littérature, il semble possible de différencier trois grandes familles d'approches.

- **Approche par identité des débits spécifiques**

La première d'entre-elles, qui constitue probablement l'approche la plus simpliste, consiste à considérer la surface drainée comme l'unique source de variabilité de l'information hydrologique (*i.e.* le débit observé à l'exutoire est proportionnel à la surface drainée). Une estimation est alors simplement obtenue par report de l'information d'un (ou plusieurs) site(s) de référence vers le site cible sous la forme d'un débit spécifique (usuellement exprimé en l/s/km² ou en mm/an) :

$$\frac{Q_{cib}}{S_{cib}} = \frac{Q_{réf}}{S_{réf}} \quad \text{d'où} \quad Q_{cib} = \frac{S_{cib}}{S_{réf}} \cdot Q_{réf} \quad (V.1)$$

où Q_{cib} est la variable de débit recherchée au site cible de surface S_{cib} , $Q_{réf}$ est la variable caractéristique de débit connue au site de référence de surface $S_{réf}$. Cette approche a souvent été mise en pratique en raison du manque d'alternatives (moyens de calcul, connaissance d'informations auxiliaires sur les bassins) ou à titre de méthode de référence (*e.g.* Vandewiele et Elias (1995)). Néanmoins, si elle s'avère relativement appropriée dans le cas de variables de débits moyens à l'échelle annuelle, elle n'est généralement plus adaptée lorsqu'il s'agit d'estimer des variables plus extrêmes qui mettent en jeu des processus hydrologiques complexes. Dans ce cas, le choix d'un voisinage approprié prend alors un sens particulièrement important.

Pour mémoire on mentionnera une technique voisine consistant à élaborer, à partir de plusieurs points de mesure le long d'un même cours d'eau, un profil en long permettant de visualiser l'évolution du débit en fonction de la surface drainée ou de la distance le long du réseau (technique dite « flow accretion diagram », *e.g.* Riggs (1972), Carter *et al.* (1988)). Une valeur en tout point du profil peut alors être déterminée par interpolation entre les points de mesure. Si cette méthode peut s'avérer efficace puisqu'elle s'appuie implicitement sur l'information de bassins situés sur un même linéaire (*i.e.* bassins emboîtés partageant *a priori* des caractéristiques voisines), elle reste inutilisable sur les tronçons dépourvus de stations hydrométriques de référence.

▪ **Approche par interpolation spatiale**

La seconde famille de techniques dédiées à l'estimation de variables hydrologiques en sites non jaugés fait appel à des procédés que l'on qualifiera d'interpolation spatiale. D'une manière générale, on pourra regrouper sous cette appellation toutes les techniques consistant à fournir une estimation de la variable $Z(x)$ au point x à partir d'une combinaison linéaire pondérée des valeurs de tout ou partie des sites de référence voisins :

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (V.2)$$

où $Z(x)$ est la variable estimée au point x , $Z(x_i)$ la variable observée et λ_i le poids attribué aux $i = 1, \dots, n$ sites de référence. Le mode de détermination du facteur de pondération λ_i admet alors plusieurs déclinaisons (e.g. Gambolati et Volpi (1979), Isaaks et Srivastava (1989)). La plus simple consiste probablement à pondérer chaque valeur $Z(x_i)$ par l'inverse de la distance au site cible. Cependant, il est aujourd'hui plus couramment fait appel aux techniques de krigeage qui reposent sur un cadre méthodologique plus rigoureux (meilleur estimateur linéaire non biaisé, Matheron (1965)) et ont fait l'objet de nombreux développements ces dernières années dans le cadre de l'estimation de variables hydrologiques (Gottschalk *et al.* (1993a et 1993b), Vandewiele et Elias (1995), Daviau *et al.* (2000), Sauquet *et al.* (2000), Adamowski et Bocci (2001), Eaton *et al.* (2002), Skoien *et al.* (2003), Merz et Blöschl (2004 et 2005), Chokmani et Ouarda (2004), Gottschalk *et al.* (2006), Sauquet (2006), Skoien *et al.* (2006), Castiglioni *et al.* (2009), Castiglioni *et al.* (2011)).

Cette technique consiste essentiellement à traduire la variabilité spatiale de l'information hydrologique sous la forme d'un modèle variographique, celui-ci étant ajusté sur un semi-variogramme empirique construit à partir de l'information disponible aux sites instrumentés. Ce dernier vise alors à résumer l'évolution de la variance de la variable étudiée en fonction de la distance en calculant pour chaque couple de points :

$$\gamma(d_{ij}) = 0.5 \cdot (Z(x_i) - Z(x_j))^2 \quad (V.3)$$

où $\gamma(d_{ij})$ est la semi-variance de deux observations $Z(x_i)$ et $Z(x_j)$ éloignées de la distance d_{ij} . L'ensemble des points ainsi obtenus peut alors être représenté sous la forme d'une « nuée variographique ». Cependant, en pratique, le variogramme empirique est obtenu en calculant la semi-variance moyenne $\gamma(d)$ des $p = 1, \dots, m$ couples de points éloignés de la distance d_{ij} comprise dans la classe de distance $d \pm \Delta d$:

$$\gamma(d) = \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m \gamma(d - \Delta d < d_{ij} < d + \Delta d) \quad (V.4)$$

Si la variable étudiée présente une organisation spatiale, il est alors attendu que la variance augmente avec la distance (*i.e.* plus deux points seront éloignés plus la différence entre les valeurs observées sera forte et inversement). La structure du variogramme constitue alors à elle seule une source d'information particulièrement intéressante pour caractériser la structure spatiale de l'information examinée. Sans revenir sur l'ensemble des interprétations possibles (*e.g.* variogrammes cycliques, variogrammes emboîtés, variogrammes à effet de pépite...), on signalera que, dans les cas de variogrammes les plus classiques, il est utile de faire référence à la notion de « portée » (Figure V-1) qui correspond à la distance pour laquelle le semi-variogramme atteint ou approche son maximum (palier). Celle-ci est le plus souvent interprétée comme une indication sur la distance à partir de laquelle il n'y a plus de relation entre l'information portée par deux points (*i.e.* observations indépendantes). Autrement dit, plus la portée est faible, plus le caractère de dépendance spatiale est limité et la qualité des estimations sera alors fortement conditionnée par la présence de sites de référence dans le voisinage immédiat du site cible (dans les cas extrêmes, où il n'apparaît aucune structure spatiale (*i.e.* indépendance totale des observations dans l'espace quelle que soit la distance), le variogramme présente une allure horizontale. On parle alors d'effet de pépite pur et la technique de krigeage n'a alors pas plus d'intérêt que d'employer une simple moyenne des observations. Bien entendu la représentativité du variogramme obtenu est sensible à la répartition spatiale des points employés pour sa construction. La densité spatiale de l'information doit ainsi être suffisante pour quantifier correctement la variance dans l'ensemble des classes de distance.

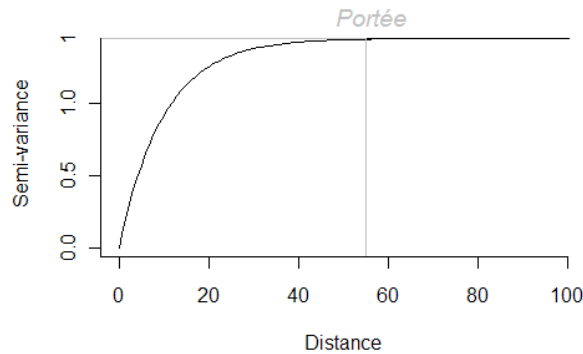


Figure V-1 : Définition de la portée sur un variogramme « classique »

Selon la structure du semi-variogramme empirique obtenu, un certain nombre de modèles variographiques pourra être employé pour décrire l'évolution de la variance avec la distance parmi lesquels les plus courant sont les modèles linéaire, exponentiel, gaussien et sphérique. L'information spatiale ainsi interprétée peut alors être intégrée dans une procédure d'interpolation. Les valeurs de pondération λ_i associées à chaque point éloigné de la distance d sont obtenues par résolution d'un produit matriciel employant les valeurs prévues par le modèle variographique :

$$\begin{pmatrix} \gamma(d_{11}) & \gamma(d_{12}) & \cdots & \gamma(d_{1n}) & 1 \\ \gamma(d_{21}) & \gamma(d_{22}) & \cdots & \gamma(d_{2n}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(d_{n1}) & \gamma(d_{n2}) & \cdots & \gamma(d_{nn}) & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & \cdots & 0 \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} \gamma(d_{01}) \\ \gamma(d_{02}) \\ \vdots \\ \gamma(d_{0n}) \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu \end{pmatrix} \quad (V.5)$$

où λ_i est le poids attribué à chaque site de référence, $\gamma(d_{ij})$ est la valeur prévue par le modèle variographique pour la distance d_{ij} entre le point $i = 1, \dots, n$ et le point $j = 1, \dots, n$, d_{0j} est la distance entre le site cible et le point $j = 1, \dots, n$, et μ est le multiplicateur de Lagrange. En complément, il est possible de fournir, parallèlement à l'estimation elle-même, une incertitude sous la forme d'une variance d'estimation :

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \gamma(d_{ij}) + \mu \quad (V.6)$$

L'une des principales difficultés associée à l'emploi de ce type de méthode réside dans la nature de la donnée hydrologique qui résulte d'un processus intégrateur sur l'ensemble d'un bassin et qui ne peut pas être traitée de la même manière que les phénomènes continus pour lesquels la méthode est habituellement employée (Gottschalk *et al.* (1993b)). Le travail mené par Skoien *et al.* (2006), qui à ce jour constitue probablement l'un des développements les plus poussés dans le domaine du krigeage appliqué à l'hydrologie, tente d'apporter des solutions à ce problème (méthode dite « Top-kriging » pour faire référence à la prise en compte de la topologie particulière du réseau hydrographique). Afin de tenir compte des spécificités liées à l'emploi d'une information hydrologique (*i.e.* processus d'agrégation sur le bassin (considérée comme linéaire) et hiérarchisation amont-aval), la démarche adoptée ne considère plus la valeur à l'exutoire comme une valeur ponctuelle $Z(x)$ mais comme la résultante d'une intégration de $i = 1, \dots, n$ valeurs ponctuelles $z(x)$ sur un support de surface non nulle discrétisé selon une grille de résolution donnée. Ainsi la variance entre les observations de deux bassins $\gamma(S_{ij})$ devient :

$$\gamma(S_{ij}) = \frac{1}{S_i \cdot S_j} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (z(x_i) - z(x_j))^2 \quad (V.7)$$

On voit que l'approche adoptée ici rejoint alors le concept de distance entre bassins telle que définie par Ghosh (1951) (déjà évoqué en section III.1.3). Contrairement aux travaux de Sauquet *et al.* (2000) qui s'appuient sur cette même base, Skoien *et al.* (2006) choisissent ici d'ajouter un terme supplémentaire pour tenir compte de l'effet de lissage lié à la taille du support, il est alors sous-entendu que plus le support est grand plus la variance de la valeur moyenne des $i = 1, \dots, n$ valeurs ponctuelles $z(x)$ est faible (ceci découle logiquement de l'application du calcul de la variance d'un bassin à lui-même) :

$$\begin{aligned} \gamma(S_{ij}) = & \frac{1}{S_i \cdot S_j} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (z(x_i) - z(x_j))^2 \\ & - 0.5 \cdot \left(\frac{1}{S_i^2} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (z(x_i) - z(x_j))^2 + \frac{1}{S_j^2} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (z(x_i) - z(x_j))^2 \right) \end{aligned} \quad (V.8)$$

Cette définition de la semi-variance « entre bassins » peut alors être introduite de manière classique dans le système de krigeage pour fournir une estimation en tous points de la grille utilisée pour discrétiser l'espace.

Les semi-variances empiriques sont quant à elles obtenues en s'appuyant directement sur les valeurs $Z(x)$ observées aux points d'observation et en quantifiant la distance d_{ij} à l'aide de la distance euclidienne entre centres de gravité des bassins. Un variogramme empirique multidimensionnel est enfin construit en rassemblant les couples de bassins par classes de distance mais aussi par classes de rapport entre surfaces drainées (en pratique est défini un variogramme empirique pour chaque classe de rapport de surface). Pour résumer, la Figure V-2 permet d'illustrer les effets relatifs de taille et de l'emboîtement des bassins sur les poids attribués dans la procédure d'interpolation. Elle permet notamment de voir dans quelle mesure la dépendance amont-aval est privilégiée au dépend de bassins juxtaposés.

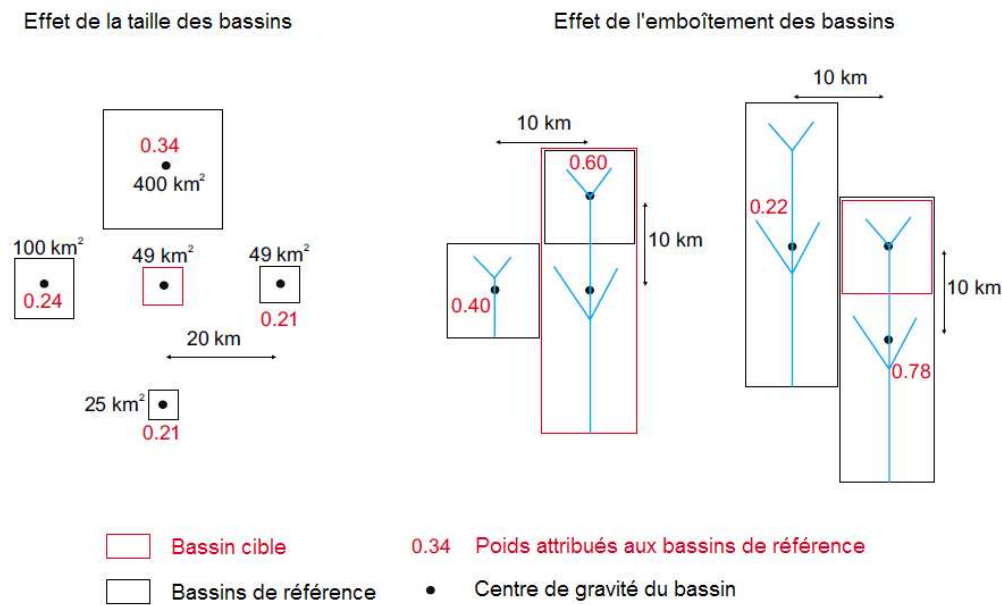


Figure V-2 : Illustration de l'effet de taille et d'emboîtement des bassins dans la procédure de krigeage développée par Skoien *et al.* (2006). Figure modifiée d'après Skoien *et al.* (2006).

La comparaison en validation croisée de cette nouvelle approche avec un krigeage plus classique (reposant seulement sur la distance entre centres de gravité des bassins versants) mené par Skoien *et al.* (2006) pour l'estimation d'un quantile de crue de période de retour 100 ans à partir d'un jeu de 600 bassins jaugés montre que la procédure Top-kriging permet de parvenir à des performances équivalentes sinon meilleures (néanmoins on peut regretter que les auteurs n'illustrent leurs résultats que sur 18 bassins).

Afin de s'affranchir des difficultés liées à l'emploi d'une distance à caractère purement géographique et revenir à un cadre d'interpolation continu, une autre approche, défendue par Chokmani et Ouarda (2004), Hundecha *et al.* (2008) et plus spécifiquement Castiglioni *et al.* (2009) pour la cartographie de variables d'étiage par krigeage, consiste à définir la distance entre points dans un nouvel espace élaboré à partir de combinaisons linéaires de plusieurs descripteurs de bassins (approche dite « PSBI » pour Physiographical Space Based Interpolation). Les auteurs suggèrent alors de construire le nouveau référentiel par analyse en composantes principales (Chokmani et Ouarda (2004), Castiglioni *et al.* (2009)).

ou encore par analyse canonique des corrélations (Hundecha *et al.* (2008), méthode qui sera détaillée plus loin en section V.1.2). Les résultats obtenus par Castiglioni *et al.* (2009) pour l'estimation du Q355 (débit dépassé en moyenne 355 jour par an, proche du Q97) montrent que le krigeage dans l'espace des descripteurs de bassins surpasse les méthodes d'interpolation plus simples mais aussi l'emploi des techniques d'estimation par régression linéaire multiple (méthode présentée ci-après).

Pour terminer sur les techniques de krigeage, on signalera qu'une comparaison des approches « Top-kriging » et « PSBI » a été mise en œuvre récemment par Castiglioni *et al.* (2011) pour l'estimation du Q355 à partir d'un jeu de 51 bassins instrumentés. Ces travaux parviennent à montrer que les performances globales des deux méthodes peuvent être considérées comme relativement équivalentes. Une différence est toutefois constatée entre les estimations pour les bassins de tête, où la méthode « PSBI » semble fournir de meilleurs résultats, et les estimations pour les bassins d'ordre supérieur pour lesquels l'approche « Top-kriging » fournit les estimations les plus fiables.

▪ Approche par régression multiple

Les techniques de régression multiple constituent la dernière famille de méthode dont il sera question ici. Il s'agit probablement de l'approche d'estimation en site non jaugé la plus répandue en hydrologie et celle-ci a donné lieu à une riche littérature scientifique, trop importante pour être traitée ici de manière exhaustive. Dans le cadre de l'estimation des descripteurs du régime d'étiage, la revue proposée par Smakhtin (2001) fournit déjà un aperçu relativement complet des différents travaux sur le sujet.

Dans cette approche la dépendance de la variabilité spatiale de l'information hydrologique étudiée vis-à-vis des variations régionales de géologie, climat, altitude, etc. est décrite sous la forme de relations établies par régression linéaire multiple entre la variable étudiée et différents descripteurs du bassin (« RLM », procédure décrite dans de nombreux ouvrages, *e.g.* Yevjevich (1972), Haan (1977), Gordon *et al.* (1992)) :

$$Z(x_j) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot V(x_j)) + \varepsilon_j \quad (V.9)$$

avec $Z(x_j)$ la variable observée au point x_j , $V(x_j)$ les $j = 1, \dots, n$ descripteurs de bassin explicatifs, α_i les coefficients assignés à chaque descripteur de bassin et ε_j le résidu d'estimation. L'estimation en sites non jaugés s'appuie alors sur la relation ainsi établie dans le voisinage pour calculer la variable d'intérêt à partir des descripteurs du bassin disponibles localement.

Les coefficients $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots$, qui permettent d'attribuer un poids à chaque variable $V(x_j)$, sont ajustés sur les valeurs observées par minimisation d'un critère d'optimisation parmi lesquels le critère des moindres carrés est le plus couramment employé (Thomas et Benson (1970), Hardison (1971)). En théorie cette procédure d'ajustement repose sur plusieurs hypothèses implicites à commencer évidemment par la linéarité de la relation mais aussi la normalité et l'homoscédasticité des résidus. La

violation de ces hypothèses, qui peut être mise en évidence *a posteriori* au moyen de différents tests statistiques sur les résidus, peut indiquer l'existence des problèmes suivants :

- la non normalité des variables employées pour l'ajustement (elle pourra être corrigée à l'aide d'une transformation appropriée de la variable concernée, le plus souvent une transformation logarithmique) ;
- l'omission d'un ou plusieurs prédicteurs dans le modèle (indiquée par l'apparition d'une relation entre valeurs prédites et résidus) ;
- l'évolution de la variance au sein des observations (*e.g.* accroissement ou diminution de l'incertitude de mesure avec la valeur observée).

Afin de résoudre en partie le dernier point (*e.g.* différences d'incertitudes liées aux disparités de longueur des séries chronologiques employées pour la calibration du modèle) mais aussi de tenir compte de l'éventuelle corrélation spatiale entre les observations, Tasker (1980) puis Stedinger et Tasker (1985) ont proposé l'emploi de critères plus perfectionnés (moindres carrés pondérés (« Weighted Least Square ») et moindres carrés généralisés (« Generalized Least Square »)). L'efficacité de ces derniers, comparés au critère traditionnel des moindres carrés, a été démontrée par Moss et Tasker (1991) ou encore Kroll et Stedinger (1998), en particulier pour résoudre les problèmes d'hétéroscédasticité au sein des résidus.

Le choix des variables explicatives employées dans le modèle, c'est-à-dire l'identification des facteurs de variabilité, reste l'une des problématiques les plus délicates dans ce type de méthode. Lorsqu'il n'est pas simplement limité par la disponibilité des données, ce choix peut être guidé par une certaine connaissance des processus physiques prédominants dans l'explication de l'écoulement (Downer (1981), Vogel et Kroll (1992), Skop et Loaiciga (1998)). Afin de s'affranchir de l'aspect subjectif de cette démarche et dans la mesure où l'élaboration de modèles régressifs est parfois considérée comme une méthode qui n'a de sens que statistiquement (Nathan et McMahon (1992)), certains auteurs privilégient l'emploi de méthodes plus objectives. Une première approche, employée par Demuth (1993) pour l'estimation du débit de base, consiste à sélectionner une variable représentative de chaque grande famille identifiée par analyse en composantes principales (composantes portant le plus de variance). Une seconde approche repose sur l'élaboration de modèles au moyen d'une procédure dite « pas à pas » (« stepwise regression », *e.g.* Laaha et Blöschl (2006a)) consistant à introduire (ou exclure) progressivement les variables explicatives dans le modèle et déterminer si le gain apporté est significatif (un critère de décision est pour cela appliqué à chaque étape, *e.g.* « Akaike Information Criterion », « Bayesian Information Criterion » ou encore « Mallows' criterion »). Ce type de procédure présente par ailleurs l'avantage de permettre de maîtriser le nombre de variables explicatives retenues dans le modèle et ainsi restreindre les problèmes de colinéarité entre descripteurs pour assurer la robustesse du modèle (dans les procédures de régression classique l'absence de redondance entre variables peut également être vérifiée au moyen de tests de significativité (test de Student) comme le suggèrent Ashwanden et Kan (1999) qui recommandent par ailleurs l'emploi d'un nombre de variables explicatives au moins 10 à 20 fois inférieur au nombre de points utilisés en calage).

Compte tenu du nombre important de relations aujourd'hui établies dans des contextes hydro-climatiques variés, et ce pour une grande diversité de descripteur du régime d'étiage, un inventaire exhaustif des variables explicatives employées s'avère laborieux. On retrouve néanmoins les grandes catégories déjà décrites en section I.2.2 qu'il convient de rappeler ici :

- les caractéristiques climatiques (précipitations, température, évapotranspiration...);
- les caractéristiques morphologiques (localisation, surface, altitude, pente, longueur du talweg principal, densité de drainage, forme du bassin);
- les caractéristiques d'occupation des sols (proportion du bassin couvert par les lacs, les glaciers, la forêt, les zones agricoles ou urbaines...);
- les caractéristiques géologiques/pédologiques (type de roche/sol, épaisseur de sol, perméabilité, porosité, capacité d'infiltration du sous-sol...).

Sur ce point on remarque toutefois qu'en excluant l'effet de taille lié à la surface drainée et dans la mesure où le comportement en étiage résulte essentiellement des processus permettant d'assurer un débit de base, de nombreux auteurs privilégient les variables liées aux propriétés géologiques ou hydrogéologiques pour l'explication de la variabilité des caractéristiques d'étiage. Dans cette catégorie de variable, le type de données le plus répandu consiste en une description qualitative de la nature des roches/sol couvrant le bassin (*e.g.* type de sol interprété au travers d'une classification (*e.g.* HOST classification, Gustard *et al.* (1992)), principale caractéristique géologique, pétrographique ou hydrogéologique représentée le long du talweg (Schreiber et Demuth (1997)), rapport des superficies couvertes par les sols sableux et limono-argileux (Skop et Loaiciga (1998)), proportion de bassin couverte par les roches cristallines, les calcaires, les flysch, les sédiments tertiaires ou quaternaires (Laaha et Blöchl (2006b et 2007)), proportion de bassin couverte par les roches perméables et imperméables (Longobardi et Villani (2008))). Quelques données quantitatives permettant de décrire les propriétés hydrauliques du sous-sol sont également employées (*e.g.* conductivité hydraulique (Haberlandt *et al.* (2001)), épaisseur de sol (Stuckey (2006)), profondeur de la surface piézométrique (Laaha et Blöchl (2006b et 2007))). Cependant en raison de la difficulté à acquérir de telles données à l'échelle du bassin versant celles-ci sont souvent substituées par des variables de nature hydrologiques, telles que le BFI (Tallaksen (1989), Clausen et Pearson (1995)) ou les constantes de récession (Vogel et Kroll (1992)), obtenues à l'issue d'une première étape d'estimation, on parle alors d'« augmented regression ».

On signalera pour finir la possibilité de coupler deux des grandes familles d'approches évoquées ci-dessus en (i) s'appuyant sur les méthodes de régression multiple pour fournir une première estimation de la variable étudiée puis (ii) en faisant appel aux techniques d'interpolation pour estimer les résidus de la relation explicative et enfin corriger l'estimation obtenue au site cible. Le principe est alors de considérer la variance non expliquée par la relation régionale comme elle-même structurée dans l'espace. A cet égard, il est intéressant de citer les travaux de Sauquet *et al.* (2000) et Chopart et Sauquet (2008) où ce type de démarche est mis en œuvre au travers d'une procédure de krigeage (procédure dénommée « Krigeage des Résidus » qui s'apparente à une procédure de krigeage à dérive externe).

V.1.2 Aperçu des méthodes de définition de voisinages

Comme évoqué au début du chapitre et comme le suggère la littérature scientifique à ce sujet, la sélection d'un voisinage approprié constitue une étape fondamentale pour assurer l'efficacité des techniques d'estimation en sites non jaugés (et plus largement de toutes les démarches de régionalisation incluant, malgré quelques particularités, les méthodes d'estimation en sites peu jaugés vues aux chapitre III et IV). Il s'agit alors de regrouper les bassins de référence de manière à permettre une description optimale de la variabilité de l'information hydrologique autour du site cible considéré. Dès lors, cette problématique a fait l'objet de nombreuses investigations, principalement dans le cadre des approches d'estimation par régression multiple. Dans le cas des techniques de krigeage, il est généralement admis que la procédure d'estimation ne nécessite pas de définition de voisinage de référence à proprement parler, l'ensemble de l'information disponible pouvant être exploitée. Il est toutefois légitime de s'interroger sur ce point dans la mesure où le choix des sites participant à la construction des variogrammes empiriques puis théoriques sur lesquels reposent toute la procédure d'interpolation ne peut être considéré comme indifférent. Concrètement, certains secteurs montrant une forte variabilité des réponses hydrologiques aboutiront naturellement à des variogrammes à faible portée et inversement dans le cas de secteurs plus homogènes. Dans ce type de situation, il semblerait par conséquent plus pertinent de travailler avec plusieurs variogrammes représentatifs de chacun des secteurs plutôt qu'avec un seul variogramme commun pour l'ensemble du territoire (autrement dit, on cherche ainsi à affiner la description de la variabilité spatiale du phénomène étudié).

Parmi les méthodes permettant de constituer des voisinages, il apparaît intéressant de distinguer deux catégories principales (Figure V-3) qui consisteront (i) à subdiviser un territoire donné en un ensemble d'entités « figées » (ou régions) qui donneront lieu à l'identification d'un modèle « régional » valable pour tous les sites non jaugés du secteur ou (ii) à identifier un voisinage spécifique pour chaque site cible (ou voisinages « glissants ») pour lesquels seront alors élaborés autant de modèles différents (approche usuellement désignée par le terme anglo-saxon « Region Of Influence », Burn (1990)).

Une autre distinction importante repose sur la continuité spatiale des voisinages ainsi définis. En effet, rien n'impose *a priori* de conserver ici une cohérence géographique et il est alors possible d'envisager d'identifier des voisinages éclatés dans l'espace pour regrouper des bassins versants au comportement similaire mais pouvant être éloignés géographiquement (à l'échelle de la France un bon exemple serait de regrouper les bassins à régime nival des Alpes et des Pyrénées).

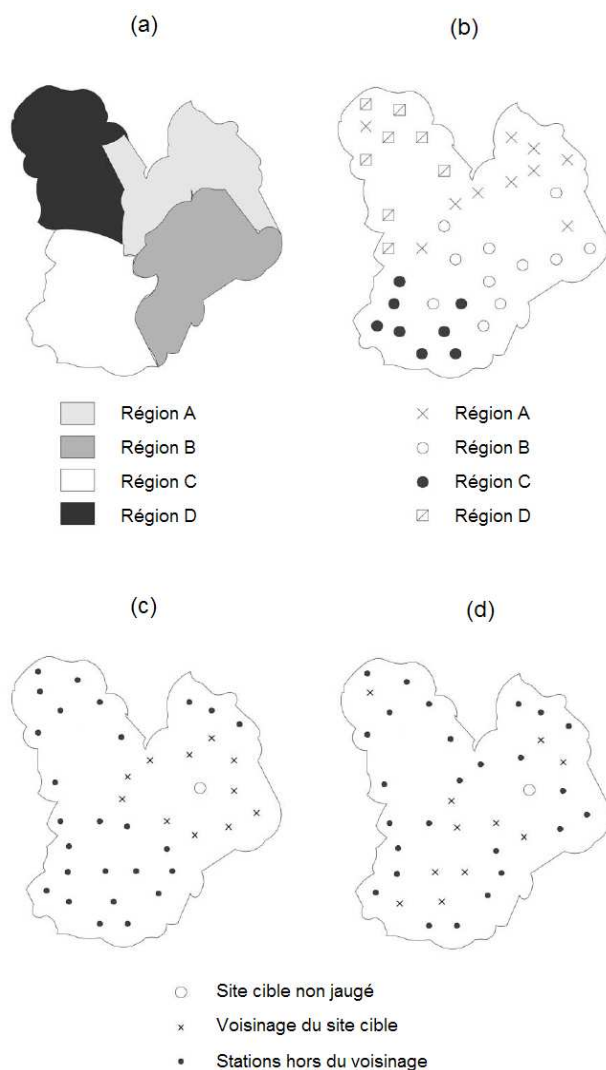


Figure V-3 : Illustration des différents modes de sélection de voisinage : régions contiguës (a) ou éclatées dans l'espace (b), voisinages « glissants » (ROI) basés sur la proximité géographique (c) ou non (d). Figure modifiée d'après Ouarda et al. (2001)

▪ Regroupements en régions par classification d'expert

Les travaux de Laaha et Blöschl (2006b) fournissent une bonne illustration des solutions envisageables pour constituer des regroupements en régions à forte cohérence géographique. On y retrouve notamment deux approches, que l'on pourra qualifier de « classification d'expert », consistant à regrouper « manuellement » les bassins susceptibles de posséder un comportement hydrologique similaire. Ce mode d'identification de voisinages s'appuie le plus souvent sur un examen visuel de la répartition spatiale d'un ou plusieurs descripteur(s) du régime hydrologique, connu(s) aux sites instrumentés (Laaha et Blöschl (2006b) exploitent par exemple la saisonnalité des étiages), que l'on pourra confronter à certaines connaissances auxiliaires de nature géologique, morphologique et/ou climatique. Une autre solution assez répandue repose sur l'examen de la structure spatiale des résidus d'un modèle régressif rudimentaire, établi entre la variable hydrologique d'intérêt et un jeu de

descripteurs de bassins pour l'ensemble des sites instrumentés disponibles (Hayes (1991), Aschwanden et Kan (1999), Laaha et Blöschl (2006b)). En raison des hypothèses sur les propriétés statistiques des résidus, il apparaît en effet que l'existence d'une structure spatiale explicite (*i.e.* distinction de secteurs où le modèle est plus ou moins performant) peut être employée comme un indicateur susceptible de mettre en évidence des sous-entités homogènes. Ce type de regroupements aboutit le plus souvent à la constitution d'entités géographiquement cohérentes mais s'accompagne d'une définition relativement arbitraire et imprécise des limites entre les différentes entités, en particulier dans les secteurs où les sites de référence font défaut.

▪ **Regroupements en régions par classification automatique**

Pour gagner en objectivité, différents auteurs choisissent d'exploiter des méthodes de classification automatique (voir notamment la revue proposée par Olden *et al.* (2011)). Il s'agit alors de caractériser la « proximité » entre bassins sur la base de critères mathématiques ou statistiques (*i.e.* critères de « distance » entre bassin) visant à comparer un jeu de variables, qu'elles soient de nature hydrologique et/ou relatives à la description du bassin¹. Nathan et McMahon (1990a), dans le cadre de travaux de régionalisation des caractéristiques d'étiage (VCN7(2), VCN7(10), Q90 et BFI), comparent par exemple différents algorithmes de classification hiérarchique permettant de regrouper (ou partitionner), sur la base de différents critères de distance (*e.g.* distance de Ward), les bassins instrumentés de manière à former des classes homogènes les plus distinctes possibles (*i.e.* minimisation de la variance intragroupe et maximisation de la variance intergroupe) en fonction de variables auxiliaires préalablement sélectionnées² selon leur pouvoir explicatif vis-à-vis de l'information hydrologique étudiée. Les auteurs choisissent ensuite de caractériser les différentes classes obtenues par une courbe d'Andrews (Andrews (1972)) moyenne permettant ainsi d'affecter un site cible à l'une des classes en comparant, à l'aide d'un critère mathématique, la courbe locale à celle de chaque classe.

Laaha et Blöschl (2006b) reprennent également cette procédure et la comparent à une classification par arbre de régression (CART, Brieman *et al.* (1984)). Dans ce cas, la classification s'effectue par partitionnement récursif binaire en séparant successivement les individus de manière conditionnelle en groupes non recouvrants de plus en plus homogènes vis-à-vis d'une variable cible pouvant correspondre dans ce cas à un descripteur hydrologique. En termes plus pratiques, l'algorithme explore par étapes successives toutes les partitions possibles d'un espace constitué de n variables et produit une série de règles de décision du type « si $P(i) < 534$ mm alors l'individu i appartient au groupe A sinon il appartient au groupe B » de manière à maximiser l'homogénéité dans chaque nouveau groupe vis-à-vis de la variable cible choisie (minimisation de la somme des écarts quadratiques à la moyenne). Ce mode de construction permet de placer aux premiers niveaux de décision les variables les plus discriminantes à grande échelle et fournit ainsi une hiérarchie explicite des facteurs les plus importants vers les moins

¹ Dans une démarche de régionalisation les descripteurs hydrologiques étant inconnus aux sites cibles, l'affectation d'un bassin dans l'une des classes ne pourra que s'appuyer sur des variables auxiliaires.

² Ces variables peuvent être préalablement standardisées afin de leur donner un poids équivalent dans le calcul des distances entre bassins ou transformées sous la forme de combinaisons linéaires.

importants. Un avantage majeur de ce type de classification est de tenir compte explicitement d'une information hydrologique dans la procédure de regroupement. Il est alors probable que, comme le démontrent les résultats de Laaha et Blöschl (2006b), cet avantage soit à l'origine de l'identification de regroupements plus appropriés que la procédure proposée par Nathan et McMahon (1990a).

Pour achever cet aperçu des méthodes de classification automatique, on mentionnera l'approche par cartes auto-organisatrices (SOM pour « Self Organizing Map », Kohonen (1982, 2001)). Cette technique, qui s'appuie sur le cadre théorique des réseaux de neurones, consiste à synthétiser un jeu de données (*e.g.* un jeu de variables hydrologiques ou de descripteurs de bassin) en répartissant chaque individu dans une grille à deux dimensions contenant n cellules (ou neurones jouant le rôle de classes) caractérisées par un prototype d'individu (*i.e.* représenté par un point dans l'espace des variables d'entrée). L'algorithme optimise (ou réorganise) progressivement l'ensemble du système de manière itérative en minimisant l'écart global entre les individus à classer et les prototypes de chaque cellule (cet écart pouvant être rapproché d'une distance dans l'espace des variables d'entrée). L'avantage de cette méthode est de faire apparaître une topologie explicite entre les différentes classes mais aussi d'autoriser la création de classes intermédiaires dans lesquelles aucun individu n'est affecté (mais laissant la possibilité d'assigner de nouvelles observations). Les travaux de Ley *et al.* (2010) constituent un bon exemple d'application de cette méthode pour la classification de bassins versants qu'ils soient jaugés ou non. Pour ce faire, ils proposent de générer deux SOM de même dimension, l'une à partir de variables hydrologiques et l'autre à partir de variables descriptives du bassin et identifient ensuite des correspondances entre les classes ainsi créées en déterminant celles qui partagent le plus d'individus en commun. Si la procédure se révèle moyennement performante (le degré de concordance entre les individus affectés dans chacune des classes des deux ensembles n'atteint que 67 %), son intérêt est surtout interprétatif en permettant de mettre en évidence des rapprochements entre certains prototypes de réponses hydrologiques et certaines caractéristiques dominantes des bassins.

- **Regroupements par définition d'un voisinage spécifique autour du site cible**

Les méthodes visant à identifier des regroupements spécifiques autour de chaque site cible non jaugé s'avèrent moins couramment employées que les précédentes. Il est néanmoins attendu que ce type d'approche offre une grande souplesse dans la description de la variabilité de l'information hydrologique puisque la procédure d'estimation fera appel à autant de modèles de variabilité qu'il existe de sites cibles (en contrepartie la démarche demande des moyens de calcul beaucoup plus importants). Pour identifier ce type de voisinage, la solution la plus simple consiste probablement à considérer que des bassins géographiquement proches partagent des caractéristiques voisines et sont, par conséquent, susceptibles de fournir une réponse hydrologique analogue (Vandewiele et Elias (1995), Merz et Blöschl (2005)). Le recours à la proximité géographique soulève toutefois le problème de la façon dont est calculée la distance entre bassins. Encore une fois, si la distance euclidienne entre centres de gravité des bassins est la plus couramment employée, il semble préférable d'adopter la distance introduite par Ghosh (1951) pour tenir compte plus efficacement de la topologie du réseau hydrographique.

Comme dans le cas du krigeage, une solution alternative consistera à changer de référentiel en élaborant un nouvel espace pour quantifier le degré de « proximité » entre bassins. Pour cela il est possible de s'appuyer sur les descripteurs de bassin disponibles. Le choix des variables pertinentes pour la constitution du nouveau référentiel est alors essentiel. Il passe le plus souvent par une étape de transformation des variables initiales, par exemple au moyen d'une analyse en composante principale (ne sont alors conservées que les composantes les plus explicatives) ou bien par la construction d'un modèle régressif rudimentaire permettant d'expliquer une partie de la variabilité de l'information hydrologique et ainsi de mieux discriminer les bassins (Nathan et McMahon (1990a)). Une solution relativement similaire dans le principe mais plus perfectionnée que les précédentes repose sur l'emploi de l'analyse canonique des corrélations (ACC, Ouarda *et al.* (2001), Haché *et al.* (2002), Blum (2003), Hundecha *et al.* (2008)). Cette technique vise à construire deux jeux de variables transformées (*i.e.* variables canoniques), le premier à partir de descripteurs hydrologiques, le second à partir des descripteurs de bassin, de telle sorte que la corrélation soit maximale entre variables transformées des deux groupes et nulle entre variables d'un même groupe. Les propriétés de corrélation entre les espaces ainsi définis (*i.e.* espaces canoniques) offrent alors la possibilité d'inférer la position d'un individu dans l'espace canonique hydrologique connaissant la réalisation de ce même individu dans l'espace canonique des descripteurs de bassin et il est ainsi possible de déterminer la distance entre un individu pour lequel seules les variables descriptives du bassin sont connues (*i.e.* un site cible non jaugé) et l'ensemble des bassins de référence localisés dans l'espace canonique hydrologique. Pour ce faire Ouarda *et al.* (2001) recommandent l'emploi de la distance de Mahalanobis (1936) qui permet de tenir compte du degré de corrélation entre les deux espaces. Bien entendu, quelle que soit la technique retenue ici, la détermination du nombre de sites de référence à inclure dans le voisinage reste souvent arbitraire. Dans les cas les plus simples sont conservés les n sites de référence les plus proches quel que soit le site cible considéré. Une solution plus élégante, suggérée par Ouarda *et al.* (2001) dans le cadre de l'ACC, repose sur la propriété de répartition des valeurs de la distance de Mahalanobis selon une loi khi-deux χ^2 à p degrés de liberté. Il est ainsi possible de déterminer le voisinage du site cible en fixant un seuil d'appartenance à ce voisinage défini par la valeur de la loi χ^2 pour un niveau de confiance α . La taille du voisinage sera alors différente d'un individu à l'autre, cependant le choix du niveau de confiance se substitue ici au choix du nombre de sites de référence à inclure dans le voisinage et peut s'avérer tout aussi délicat à fixer¹.

V.1.3 Application à l'estimation du QMNA5

Dans cette application, nos efforts se sont essentiellement portés sur la mise en œuvre des techniques de régression multiple pour l'estimation du QMNA5 spécifique (exprimé en l/s/km²). Des essais de krigeage ont également été réalisés mais les résultats obtenus en validation croisée sont rapidement apparus comme peu encourageants, soit en raison d'une information hydrologique peu structurée dans l'espace (variogrammes empiriques présentant une allure très erratique, difficile à restituer à l'aide de modèles variographiques simples), soit en raison du caractère très local de la dépendance spatiale (portée faible) et de l'absence de sites d'appui suffisamment proches pour apporter de l'information. Une brève discussion à ce sujet sera proposée en section V.2.5.

¹ D'après notre propre expérience dans le cadre de la régionalisation des courbes de débits classés (Sauquet et Catalogne (2010)).

▪ Protocole d'ajustement et de sélection des modèles régressifs

Pour revenir à l'application des méthodes d'estimation par régression multiple, il a été mis au point un protocole visant à explorer de manière exhaustive l'ensemble des combinaisons comprenant de 1 à 4 variables explicatives parmi les descripteurs de bassins à notre disposition (*cf.* section I.2.2) pour finalement dégager le modèle le plus performant en validation croisée et respectant, dans la mesure du possible, les hypothèses statistiques propres à la méthode employée. L'architecture de ce protocole est résumée sur la Figure V-4.

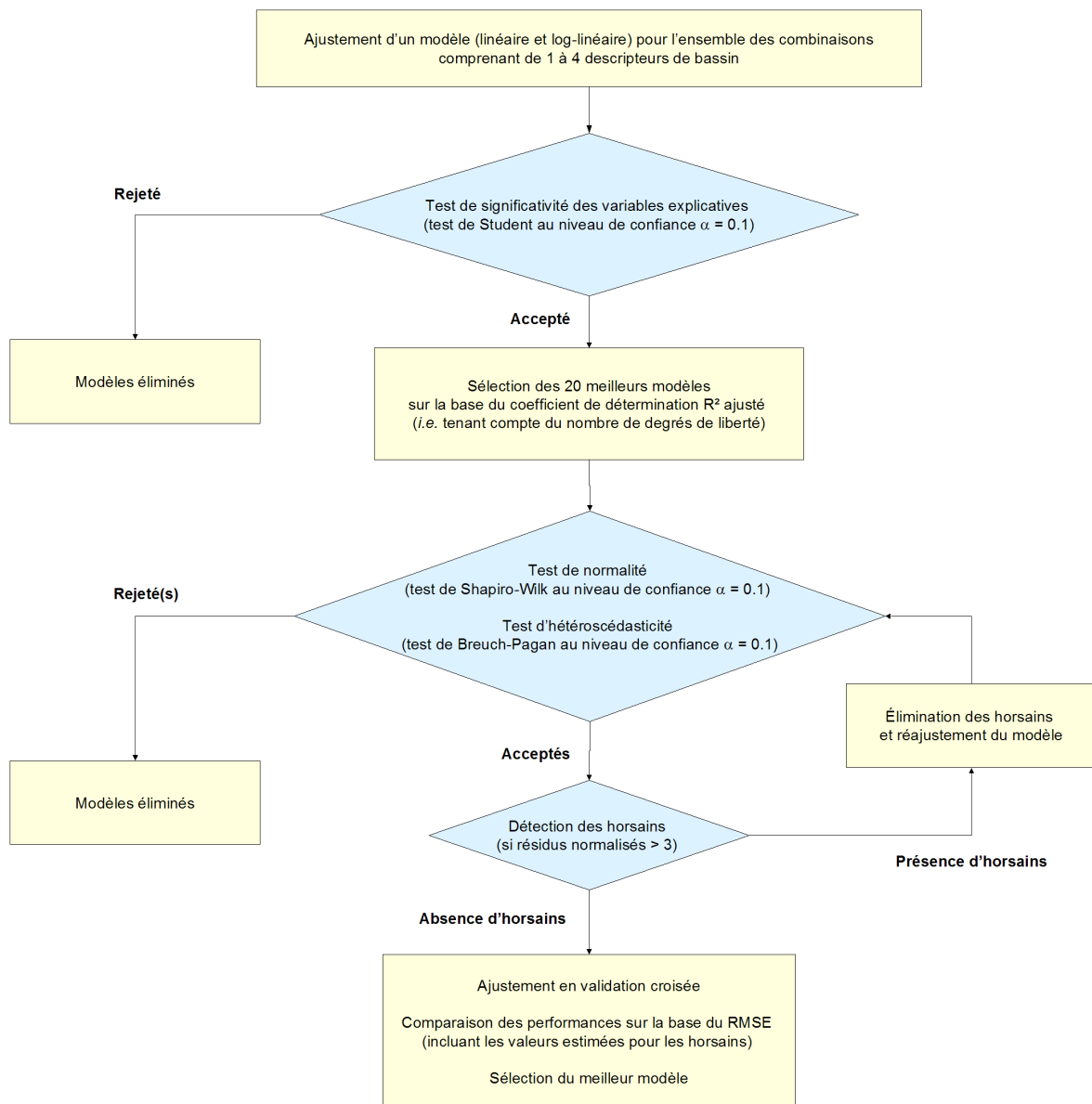


Figure V-4 : Architecture du protocole permettant la sélection des modèles régressifs les plus performants

- **Modalités de définition des voisinages**

Nous nous sommes ensuite attachés à examiner avec attention la problématique de définition de voisinages, considérée comme l'une des principales clefs pour parvenir à des résultats performants. Il était notamment question de confirmer l'importance de cette démarche vis-à-vis de la qualité des estimations obtenues au moyen des techniques de régression multiple. Ainsi, avant de procéder à la définition de voisinages dédiés à l'estimation en sites non jaugés proprement dite, nous nous sommes proposés d'examiner le potentiel d'estimation dans le cas de voisinages « idéalement connus », sur la base de similitudes hydrologiques, et de démontrer le gain apporté par rapport à l'estimation fournie par un unique modèle régressif ajusté à l'échelle nationale (*i.e.* modèle ajusté à partir de tous les sites de référence disponibles). Pour ce faire, il a tout d'abord été envisagé d'établir un modèle régressif pour chacune des quatre classes de régimes d'étiage définies en section II.2.2 puis il a été examiné la possibilité de définir des voisinages « glissants » sur la base de la proximité (*i.e.* distance euclidienne) dans l'espace hydrologique élaboré par ACP, à l'exception des 22 bassins à régime nival qui constitueront toujours un groupe à part entière (section II.2.1). Afin de tenir compte de leur importance relative dans la discrimination des régimes d'étiages et le calcul des distances entre bassins, on remarquera que chacune des deux dimensions *ACP1* et *ACP2* a préalablement été pondérée par la valeur propre (pourcentage de variance expliquée) qui lui était attribuée lors de l'ACP. De là, quelques essais préalables ont permis de retenir une taille de voisinage optimale de 50 sites de référence.

Une telle démarche (qui à notre connaissance n'a jamais été abordée ainsi dans la littérature) nous est apparue comme un préalable important pour (i) définir la borne haute des performances attendues (au même titre que les résultats du modèle national constitueront la borne inférieure) et (ii) s'assurer de la pertinence de l'information hydrologique qui pourra alors être introduite comme critère d'homogénéité dans les méthodes de définition de voisinage en site non jaugé.

Cette étape ayant été réalisée avec succès (les résultats sont détaillés en section V.2.1), il a alors été examiné trois modalités principales de définition de voisinage pouvant être exploitées en sites non jaugés. Comme dans le cas de la valorisation des chroniques courtes, la première de ces modalités consistait à exploiter la typologie en Hydro-Eco-Régions proposée par Wasson *et al.* (2001) (*cf.* section I.2.2) en considérant celle-ci comme un bon point de départ pour regrouper/discriminer les bassins sur la base de similitudes hydro-climatiques (il s'agit alors d'une modalité que l'on peut rapprocher d'une classification d'expert avec des voisinages à forte cohérence géographique). Encore une fois, la présence de bassins situés à cheval sur plusieurs HER devait être prise en compte dans la procédure d'estimation. Pour ce faire, un modèle régressif a été ajusté pour chacune des HER sur l'ensemble de l'échantillon disponible en accordant un poids plus ou moins important aux individus selon la proportion de surface de bassin occupée par l'HER considérée¹. A l'issue des ajustements, une estimation est alors simplement fournie pour chaque site cible à partir d'une combinaison des estimations obtenues pour chaque HER, pondérées là encore par les proportions de surface correspondantes. On notera enfin que, pour certaines

¹ Autrement dit un bassin totalement inclus dans l'HER possède un poids maximum tandis qu'un bassin hors de l'HER a un poids nul et n'intervient pas dans la procédure d'ajustement.

HER, le nombre de stations participant effectivement à l'ajustement s'avère très faible (< 10), voire insuffisant pour permettre cet ajustement (< 4). Il a donc été nécessaire de procéder à des regroupements de manière à obtenir un minimum de 20 sites par région¹ (soit au moins cinq fois plus d'individus que de variables explicatives). Finalement 16 entités distinctes sont utilisées ici avec un effectif moyen de 52 individus.

Dans un second temps il a été choisi d'examiner une méthode de classification automatique pour notamment identifier des regroupements plus éclatés dans l'espace. Parmi les différentes méthodes relevées dans la littérature (*cf.* section V.1.2), la méthode de classification par arbre de régression nous est apparue comme la plus avantageuse, en particulier en ce qu'elle permet aussi bien d'exploiter des variables qualitatives que quantitatives. Pour ce faire, le package « rpart » proposé par Therneau *et al.* (2010) a été utilisé.

Parmi les options possibles, et en s'écartant tout d'abord des applications traditionnelles, l'une des solutions envisagées était d'appliquer la procédure CART de manière à déterminer la probabilité d'appartenance de chaque point du réseau hydrographique non jaugé à l'une des quatre classes de régime d'étiage puis d'exploiter ces résultats pour fournir une estimation du QMNA5 à partir des modèles régressifs ajustés pour chacune des classes. Malheureusement, les résultats obtenus en validation croisée se sont révélés relativement médiocres et cette piste a été abandonnée au profit d'une démarche plus classique. Ainsi, il a finalement été choisi de retenir la première dimension de l'espace hydrologique (*ACP1*) comme critère d'homogénéité. Il a ensuite été laissé à l'algorithme une totale liberté dans le choix des variables de décision parmi l'ensemble des descripteurs de bassin disponibles (*cf.* section I.2.2), à l'exception des variables de localisation du bassin (*Xcg* et *Ycg*) afin de ne pas contraindre la construction des regroupements sur une base explicite de proximité géographique. D'autre part, afin de limiter de manière automatique le nombre de groupes créés mais aussi d'obtenir dans chacun d'entre eux un effectif suffisant pour permettre d'assurer la robustesse des modèles régressifs régionaux, l'algorithme a été contraint de s'arrêter dès la création d'un groupe contenant là aussi un effectif minimal de 20 individus. On notera enfin que les 22 bassins à régime nival distingués sur la base de l'indice de saisonnalité *SR* ($SR > 1$, bassins appartenant à la quatrième classe de régime d'étiage, *cf.* section II.2) n'ont pas été introduits dans la procédure et ont été considérés comme une classe à part entière. Pour ces bassins, une brève analyse des données a logiquement révélé une forte dépendance de la variabilité de l'indice *SR* à la température moyenne annuelle de bassin (corrélation de -0.72) et indirectement avec les variables d'altitude, de proportion de précipitation solide et de proportion de bassin sans végétation. Pour discriminer les bassins non jaugés susceptibles d'appartenir à cette classe il a donc été choisi de se baser sur un critère (arbitraire mais relativement robuste) d'altitude moyenne (*Z50*) fixé à 1400 m qui constituera le premier niveau de décision de l'arbre de classification (les bassins instrumentés de la classe concernée s'échelonnent entre 1420 et 2615 m d'altitude).

¹ Ces regroupements sont les suivants : Landes/Coteaux aquitains, Corse/Méditerranéen, Dépressions sédimentaires/Val de Saône, Alsace/Vosges et Dépôts argilo-sableux/Tables calcaires

L'arbre de classification obtenu à l'issue de cette procédure est illustré sur la Figure V-5. Cette classification a abouti à la constitution de 18 groupes (si l'on inclut le groupe de bassins à régime nival) avec un effectif moyen de 35 individus. En termes de variables de décision, il est intéressant de noter que l'on retrouve aux premiers niveaux les variables se rapportant à la nature plus ou moins perméable du substratum (*i.e.* densité de drainage), à l'évapotranspiration potentielle estivale et aux précipitations estivales ou automnales qui semblent ainsi constituer les facteurs de variabilité les plus discriminants à l'échelle nationale. Bien que la représentation sous forme de carte s'avère assez confuse et peu lisible en raison du fort éclatement des groupes dans l'espace, il est tout de même intéressant de noter que la classification semble également permettre de retrouver quelques ensembles assez cohérents, par exemple en Bretagne où l'on voit s'individualiser la partie la plus occidentale, très arrosée (Groupe J), et la Vendée qui connaît des périodes estivales beaucoup plus sèches (Groupe L).

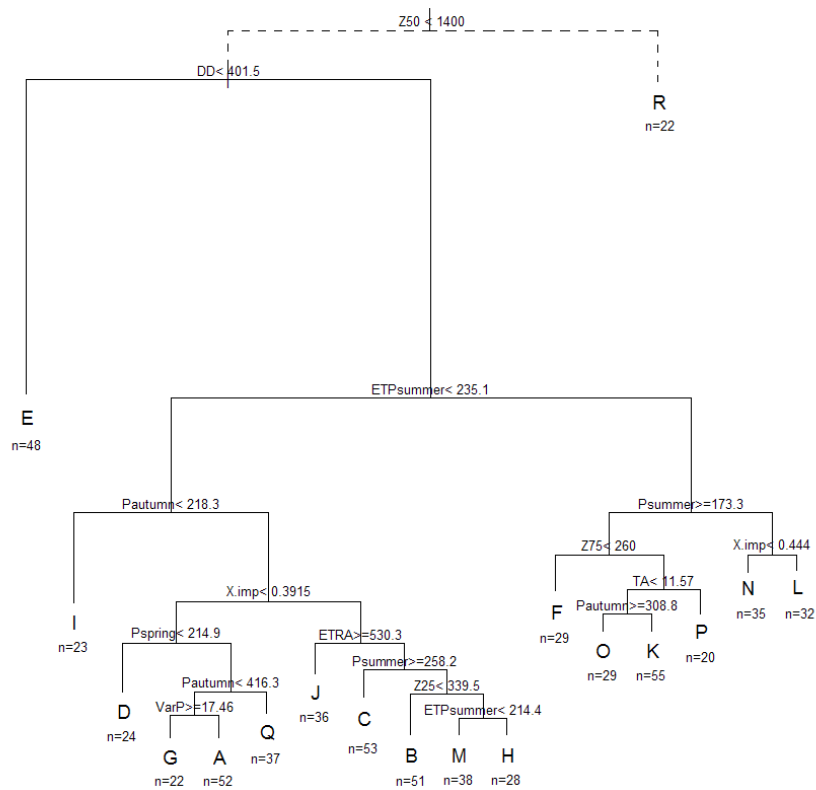


Figure V-5 : Arbre de classification obtenu en considérant la première dimension de l'espace hydrologique comme critère d'homogénéité (n correspond au nombre d'individus par classe)

En complément, nous avons envisagé la possibilité d'exploiter à nouveau la cartographie des régimes hydrologiques mensuels, réalisée par Sauquet (2006) (*cf.* section I.1.3), en considérant cette fois cette information comme une variable susceptible d'aider à l'identification de groupes homogènes bien qu'elle soit issue d'une étape d'estimation préalable et s'accompagne d'un certain degré d'incertitude (il s'agit par ailleurs d'une variable qualitative). Cette information a donc été introduite dans la procédure CART en guise de variable de décision en utilisant la même procédure que précédemment excepté le fait que les 22 bassins à régime nival sont ici individualisés sur la base de l'appartenance aux classes de régimes mensuels nivaux (types A et B) et glaciaire.

Lorsque cette variable est proposée à l'algorithme, trois des classes de régime mensuel sont retenues aux deux premiers niveaux de décision (Figure V-6). On note en particulier qu'au premier niveau, la procédure CART distingue les individus de la classe de régime uniforme (régime de nappe essentiellement représentée dans le Bassin Parisien, classe I) qui vient alors se substituer à la variable de densité de drainage (qui permettait d'individualiser le groupe E dans la précédente classification). Sur le reste de l'échantillon il est ensuite fait une distinction entre deux groupes sur la base de l'appartenance ou non à deux régimes pluviaux (régimes nivo-pluviaux type A et B venant se substituer à la variable ETPsummer) au sein desquels les regroupements se poursuivent à l'aide des autres descripteurs de bassins. La classification qui en résulte, assez proche de la précédente, comprend 20 groupes possédant un effectif moyen de 32 individus.

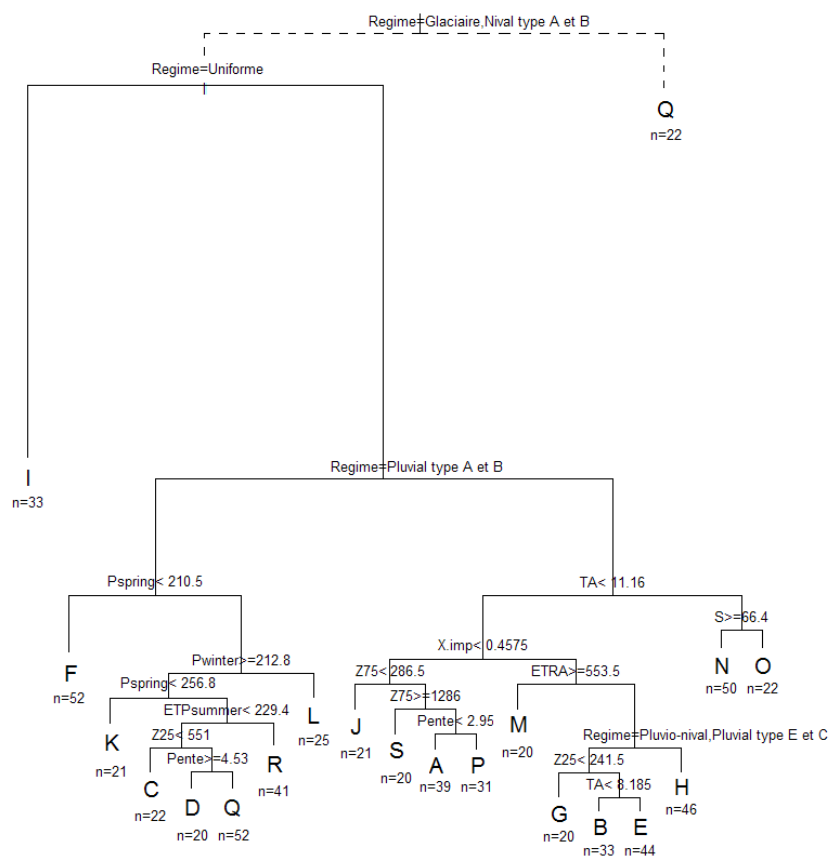


Figure V-6 : Arbre de classification obtenu en introduisant l'information sur le régime hydrologique mensuel et en considérant la première dimension de l'espace hydrologique comme critère d'homogénéité

Enfin, la troisième et dernière modalité de définition de voisinage s'est avérée la plus délicate à mettre en œuvre. Afin de compléter notre aperçu des techniques existantes, il était en effet envisagé de travailler sur des voisinages « glissants » en commençant par quantifier la proximité entre bassins sur la base de la proximité géographique (distance de Ghosh (1951)). Cependant la forte hétérogénéité des comportements hydrologiques pouvant exister sur des bassins pourtant proches (comme le montre la cartographie des classes de régime d'étiage présentée en section II.2.2) nous est apparue comme un argument en faveur de l'identification d'un espace plus approprié pour décrire la similitude entre bassins.

Comme suggéré dans la littérature, il a donc été envisagé de s'appuyer sur les descripteurs de bassin disponibles pour élaborer un nouveau référentiel susceptible de permettre une bonne discrimination entre bassins. La solution la plus naturelle était alors de rechercher un espace pouvant se rapprocher de l'espace hydrologique établi suite à l'ACP (*cf.* section II.2.1). Une analyse préliminaire des corrélations entre le jeu de descripteurs de bassin et chacune des deux dimensions de l'espace hydrologique a permis de rapidement montrer qu'il n'apparaissait aucune relation réellement significative (aucune corrélation ne dépassant 0.4, Figure V-7) mais aussi l'existence d'une forte redondance entre les variables descriptives du bassin.

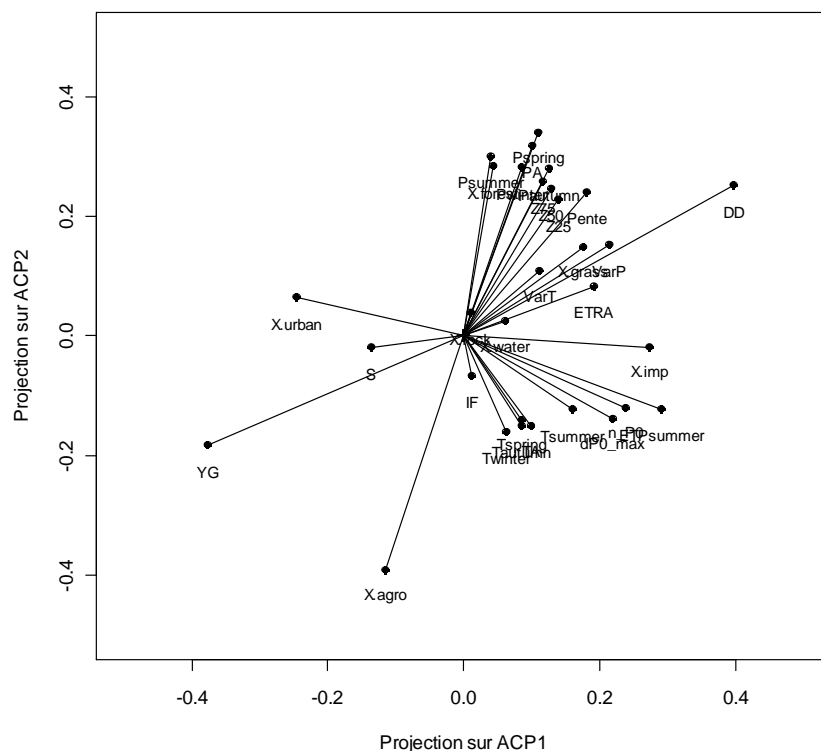


Figure V-7 : Projection des variables descriptives du bassin dans le premier plan factoriel issu de l'ACP des variables caractéristiques d'été

Afin de renforcer les liens entre les deux jeux de données, il a donc été envisagé de construire un ensemble de combinaisons linéaires de variables pouvant se substituer aux différentes variables descriptives du bassin prises individuellement. Pour ce faire, un certain nombre de techniques inspirées de la littérature a été exploré (*cf.* section V.1.2). Cependant le résultat le plus concluant a été obtenu au moyen d'une procédure de régression dite « PLS » (« partial least square », Wold *et al.* (1984)), technique qui peut être assimilée à la réalisation d'une ACP des variables d'entrée (les descripteurs de bassins) mais sous contrainte d'optimiser l'explication de la variance d'un ou plusieurs terme(s) cible(s), ici représentés par les deux premières dimensions de l'espace hydrologique *ACP1* et *ACP2*. Les combinaisons linéaires (*i.e.* les variables explicatives de substitution) ainsi construites possèdent la propriété d'être indépendantes deux à deux et ainsi d'éliminer le risque de multi-colinéarité. D'autre part le choix des variables explicatives est ici substitué par le choix du nombre de dimensions significatives.

On remarquera que, dans sa finalité, la démarche adoptée ici (*i.e.* ACP des variables hydrologiques couplée à la régression PLS) s'avère en apparence très voisine de la technique d'ACC. Ainsi dans les deux cas sont construits deux jeux de variables transformées, définis de manière à renforcer les liens de dépendance entre les deux ensembles et minimiser les interactions entre variables d'un même ensemble (*i.e.* orthogonalité des variables d'un même ensemble). Néanmoins alors que l'ACC peut conduire à une déformation simultanée des deux espaces d'origine (à divers degrés), la procédure de régression PLS préserve ici l'espace hydrologique (et les voisinages qui en découlent) ce qui nous a semblé plus favorable pour l'application que l'on se propose de mener.

D'après la Figure V-8, on constate que les pourcentages de variance expliquée obtenus à l'issue de la procédure de régression PLS (en validation croisée) se renforcent progressivement avec l'accroissement du nombre de composantes pour atteindre un maximum de 45 et 33 % respectivement avec chaque dimension de l'espace hydrologique. Cependant l'accroissement des pourcentages de variance expliquée ne semble plus réellement significatif au-delà de la troisième composante (37 et 25 % respectivement), témoignant ainsi indirectement de la forte redondance entre les descripteurs de bassin disponibles. Si ces niveaux s'avèrent les meilleurs obtenus avec les données à notre disposition, ils restent relativement faibles vis-à-vis des objectifs de définition de voisinages en site non jaugé. Ainsi, si l'on ne conserve que les trois premières composantes, la concordance entre voisinages attendus (dans l'espace hydrologique) et voisinages prédits (dans l'espace des descripteurs de bassin) s'avère très médiocre quelle que soit la taille voisinage retenue (Figure V-9). La définition de voisinages spécifiques pour chaque site non jaugé apparaît d'ores et déjà comme relativement incertaine et il semble difficile de parvenir à améliorer ce résultat en l'absence de descripteurs du bassin susceptibles de permettre une meilleure discrimination des comportements hydrologiques à l'échelle nationale. Pour mémoire on précisera qu'en termes de variables explicatives, les poids attribués aux différents descripteurs de bassin dans les combinaisons linéaires fournies par la régression PLS permettent à nouveau d'identifier les variables les plus discriminantes. Ainsi pour *ACP1* les variables se rapportant à la densité de drainage (DD), la latitude du centre de gravité du bassin (Y_{cg}), le pourcentage de surface imperméable (%imp) et l'ETP estivale (ETPsummer) sont les plus explicatives tandis que pour *ACP2* on retrouve essentiellement les variables se rapportant aux pourcentages de surface agricole (%agro) et forestière (%forest), la densité de drainage (DD) et les variables de précipitations moyennes annuelle et saisonnières (PA, Pwinter, Pspring...).

Le protocole présenté en début de section pour l'identification du meilleur modèle régressif régional a été mis en œuvre pour chaque type de voisinage présenté précédemment en calculant là encore un intervalle de confiance à 95 % autour de chaque estimation. On notera que les résultats des modèles linéaires étant occasionnellement susceptibles de fournir des valeurs négatives (tant vis-à-vis du QMNA5 estimé que des bornes de l'intervalle de confiance associé), celles-ci ont été systématiquement remplacées par zéro. A l'issue des ajustements, l'ensemble des résultats obtenus en validation croisée a été réuni et analysé, comme dans le cas des estimations en sites peu jaugés, au travers de l'écart absolu entre valeurs de QMNA5 prédites et observées (en débit spécifique), au travers des largeurs de l'intervalle de confiance à 95 % mais aussi en calculant un coefficient de détermination linéaire R^2 .

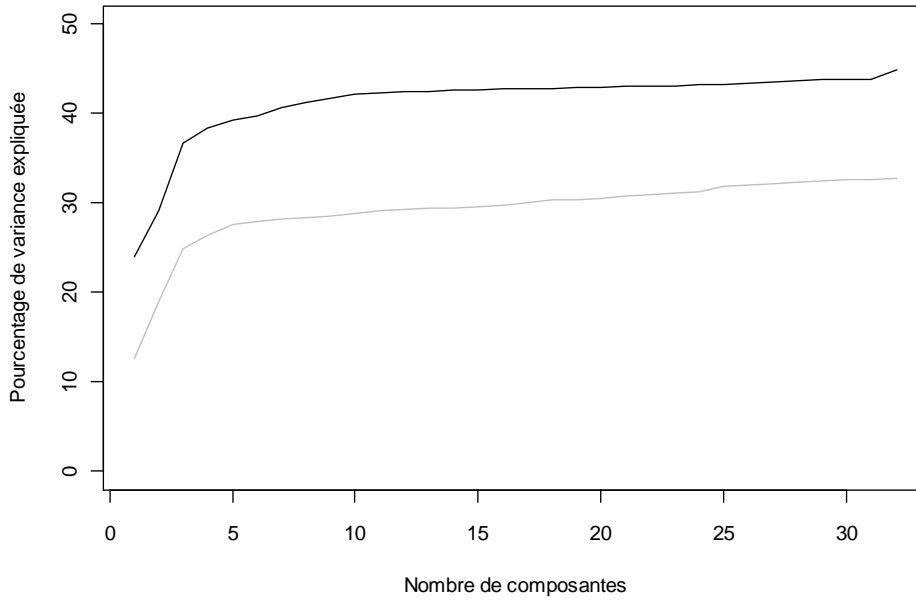


Figure V-8 : Evolution du pourcentage de variance expliquée en fonction du nombre de composantes retenues à l'issue de la procédure de régression PLS (en noir : première dimension de l'espace hydrologique (ACP1), en gris : seconde dimension de l'espace hydrologique (ACP2))

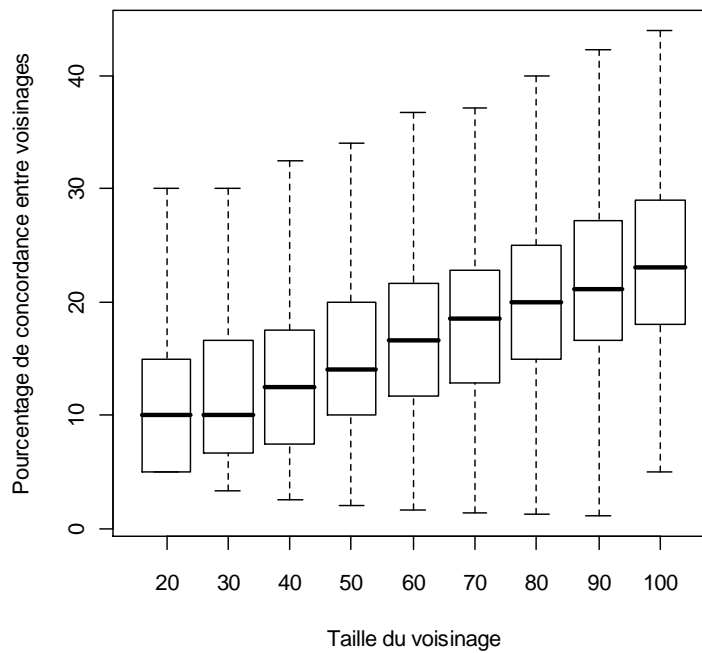


Figure V-9 : Pourcentage de concordance entre voisinages attendus dans l'espace hydrologique et voisinages prédits dans l'espace des descripteurs de bassin

V.2 Résultats de la validation croisée

Nous nous proposons ici d'examiner les résultats obtenus en validation croisée pour les 632 sites de l'échantillon de référence suite à l'application de la procédure exposée ci-dessus pour l'estimation du QMNA5 spécifique (exprimé en l/s/km²). Il est alors essentiellement question de déterminer, parmi les différentes solutions examinées (résumées dans le Tableau V-1), la modalité de définition de voisinage permettant de parvenir aux meilleures performances, en commençant par démontrer l'efficacité de la démarche dans le cas de voisinages « idéalement connus ». Il sera ensuite envisagé de comparer ces performances à celles obtenues en sites peu jaugés (Chapitre III et IV) mais aussi de confronter nos résultats à ceux d'une approche reposant sur la régionalisation des paramètres d'un modèle hydrologique dédié à l'estimation du QMNA5 (les grandes lignes de cette approche, développée par Folton *et al.* (2011) de l'UR OHAX d'Aix-en-Provence, ainsi que les résultats obtenus seront exposés en section V.2.4).

Modalité de d'identification des voisinages	Désignation dans la suite de ce document
Pas de voisinage (ajustement d'un modèle unique à l'échelle nationale) ⁽¹⁾	<i>NAT</i>
Classes de régime d'étiage ⁽¹⁾	<i>CRE</i>
Voisinage dans l'espace hydrologique ⁽¹⁾	<i>ROI_H</i>
Hydro-éco-régions	<i>HER</i>
Classification par arbre de régression sans introduction de l'information sur les classes de régime hydrologique mensuel	<i>CART1</i>
Classification par arbre de régression avec introduction de l'information sur les classes de régime hydrologique mensuel	<i>CART2</i>
Voisinage sur la base de la proximité géographique	<i>ROI_G</i>
Voisinage dans l'espace des descripteurs de bassins	<i>ROI_V</i>

⁽¹⁾ Voisinages de référence

Tableau V-1 : Récapitulatif des modalités d'identification des voisinages examinées

V.2.1 Démonstration de l'intérêt de la définition de voisinages dans le cas de voisinages idéalement connus

Comme proposé en section V.1.3, il nous paraît intéressant de montrer tout d'abord dans quelle mesure l'identification de voisinages permet d'accroître les performances de la procédure d'estimation par régression multiple par rapport à l'emploi d'un unique modèle ajusté à l'échelle nationale sur l'ensemble des sites de référence à notre disposition (modalité *NAT*). Pour ce faire nous nous sommes donc placés dans un cas « idéal » en identifiant les voisinages sur la base de similitudes hydrologiques soit en s'appuyant sur l'appartenance à l'une des 4 classes de régime d'étiage (modalité *CRE*), soit en définissant la proximité entre bassins dans l'espace hydrologique élaboré par ACP des variables caractéristiques d'étiage (en conservant les 50 sites de référence les plus proches du site cible, modalité *ROI_H*).

Les modèles retenus suite à la procédure d'ajustement sont reportés ci-dessous pour les modalités *NAT* et *CRE* (il n'est en revanche pas possible de détailler l'ensemble des 632 modèles pour la modalité *ROI_H*) :

$$NAT \quad QMNA_5 = 6,145 + 2,544 \cdot 10^{-3} \cdot PA - 1,848 \cdot 10^{-2} \cdot ETP_{summer} - 0,833 \cdot \%imp + 7,003 \cdot \%rock$$

$$CRE\ 1 \quad \ln(QMNA_5) = 18,105 - 1,167 \cdot \ln(Y_{cg}) + 1,609 \cdot \ln(PA) - 2,148 \cdot \ln(nP0) - 0,152 \cdot \ln(\%agro)$$

$$CRE\ 2 \quad QMNA_5 = 17,437 + 6,639 \cdot 10^{-3} \cdot PA - 1,017 \cdot TA - 1,449 \cdot VarT - 2,394 \cdot \%agro$$

$$CRE\ 3 \quad QMNA_5 = 2,270 + 7,784 \cdot 10^{-7} \cdot X_{cg} + 2,309 \cdot 10^{-3} \cdot PA - 0,390 \cdot VarT - 3,996 \cdot 10^{-3} \cdot ETRA$$

$$CRE\ 4 \quad \ln(QMNA_5) = -5,860 + 0,206 \cdot \ln(S) + 1,241 \cdot \ln(PA) - 1,159 \cdot \ln(VarP) - 0,267 \cdot \ln(\%agro)$$

Parmi les variables explicatives retenues on remarque que le modèle national fait appel à la fois à des descripteurs relatifs au climat et des descripteurs relatifs à la nature plus ou moins perméable du substratum et il semble bien que l'on retrouve logiquement certaines des variables ayant servi à discriminer les bassins dans l'étape de constitution de voisinages en sites non jaugés. Dans le cas des modèles établis pour chaque classe de régime d'étiage, les variables explicatives retenues font cette fois essentiellement appel à des caractéristiques de type climatique et plus secondairement de localisation ou d'occupation des sols ($\%agro$ apparaît dans trois des modèles) tandis que, étonnamment, la nature plus ou moins perméable du substratum ne semble plus jouer de rôle important. Cette observation tendrait à confirmer que les classes de régimes d'étiage telle qu'elles ont été définies intègrent déjà partiellement cette information et s'avèrent suffisamment homogènes de ce point de vue. L'interprétation physique des modèles s'avère en revanche plus délicate. On notera *a minima* l'existence d'une cohérence des signes attribués aux variables climatiques (positif pour les précipitations annuelles et négatif pour la température ou l'évapotranspiration) vis-à-vis de leurs effets sur l'écoulement.

La Figure V-10 illustre les résultats obtenus pour chacune des modalités examinées sous la forme de boxplots. Les critères de performance montrent sans trop de surprise que le recours à des voisinages pour l'établissement de modèles régressifs apporte globalement un gain très significatif par rapport à l'ajustement d'un unique modèle national. Les résultats obtenus peuvent même être qualifiés de particulièrement satisfaisants si l'on se réfère aux coefficients de détermination qui atteignent 0.79 et 0.75 respectivement pour les modalités *CRE* et *ROI_H* (contre 0.43 pour la modalité *NAT*). Ainsi, il semble bien que le recours à ces voisinages permette d'éliminer une partie de la variabilité existant à l'échelle nationale et que les descripteurs de bassin à notre disposition soient suffisamment appropriés pour permettre l'explication de la variabilité résiduelle. Il est notamment encourageant de voir l'amélioration apportée ici au moyen d'une discrimination en seulement 4 classes qui semble confirmer que la classification en régime d'étiage permet bien de regrouper des bassins au comportement similaire. Néanmoins les meilleurs résultats sont tout de même obtenus lorsque la procédure d'estimation est appliquée à des voisinages « glissants » définis sur la base de la proximité dans l'espace hydrologique confirmant ainsi l'intérêt de l'identification de voisinages (et des modèles régressifs qui en résultent) spécifiques à chaque site cible.

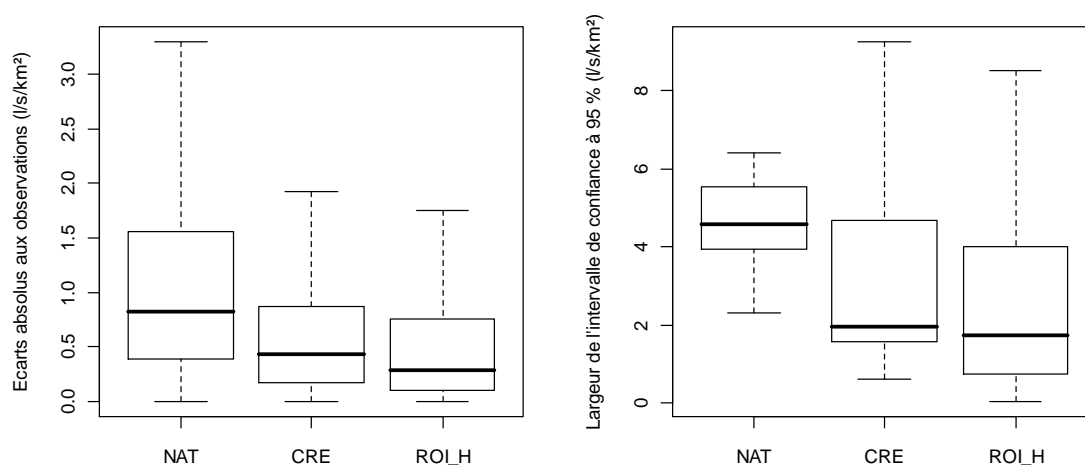


Figure V-10 : Comparaison des performances d'estimation du QMNA5 selon les modalités de définition de voisinage NAT, CRE et ROI_H

Une réserve concerne toutefois les incertitudes associées aux estimations (vues ici au travers de la largeur des intervalles de confiance à 95 %) qui, si elles restent plus faibles dans une grande majorité des cas, peuvent parfois dépasser celles fournies par le modèle national. Cette observation semble montrer que le pouvoir prédictif de certains modèles « régionaux » (*i.e.* leur robustesse) peut se trouver en défaut. L'examen des sites concernés montre qu'il s'agit de manière presque exclusive de bassins à régime nival (bassins de la quatrième classe de régime d'étiage) pour lesquels les estimations, quoique assez proches des valeurs observées (le coefficient de détermination approche 0.72 pour ces bassins), restent paradoxalement particulièrement incertaines. Il semble possible d'attribuer ce résultat au faible effectif (21 sites d'appui en validation croisée) et à la forte variance des valeurs de QMNA5 observées au sein de ce groupe de bassin.

Pour le reste de l'échantillon on remarquera que certaines estimations s'écartent parfois beaucoup des valeurs observées quelle que soit la modalité de voisinage retenue (*e.g.* Figure V-11). Les bassins concernés ont été identifiés et examinés plus en détail. Parmi ceux-ci on retrouve d'une part des bassins karstiques (*e.g.* station U2604030 (la Loue à Vuillafans) et station W3335210 (l'Adouin à Saint-Martin-en-Vercors [Tourtre])) ou à forte composante souterraine (*e.g.* station H4033010 (la Juine à Méréville) et station S4214010 (le Magescq à Magescq)) pour lesquels les modèles conduisent à des estimations nettement sous-estimées. Ce résultat n'est pas surprenant, il démontre la difficulté à traiter correctement le cas de bassins atypiques (*i.e.* présentant une forte singularité locale) au travers de modèles régressifs régionaux. On notera qu'ils sont d'ailleurs généralement traités comme des horsains et ne participent pas à l'ajustement des modèles. A l'inverse, un certain nombre de surestimations assez marquées sont associées à des bassins sur lesquels persiste un doute quant à la qualité des données. Il s'agit en effet de stations influencées mais conservées dans l'échantillon dans la mesure où les débits fournis dans la Banque HYDRO sont qualifiés de « naturels reconstitués » (*e.g.* W0224010 (le Doron de Bozel à la Perrière [Vignotan]), W2714010 (la Romanche à Mizoën [Chambon amont]) et Y6234010 (la Tinée à la Tour [Pont de La Lune])). A ce stade et dans la mesure où ces bassins sont traités comme des horsains (*i.e.* ne participent pas aux ajustements), ils ont été conservés dans la suite de ces travaux pour permettre de poursuivre l'analyse des résultats sans avoir à modifier l'échantillon de référence.

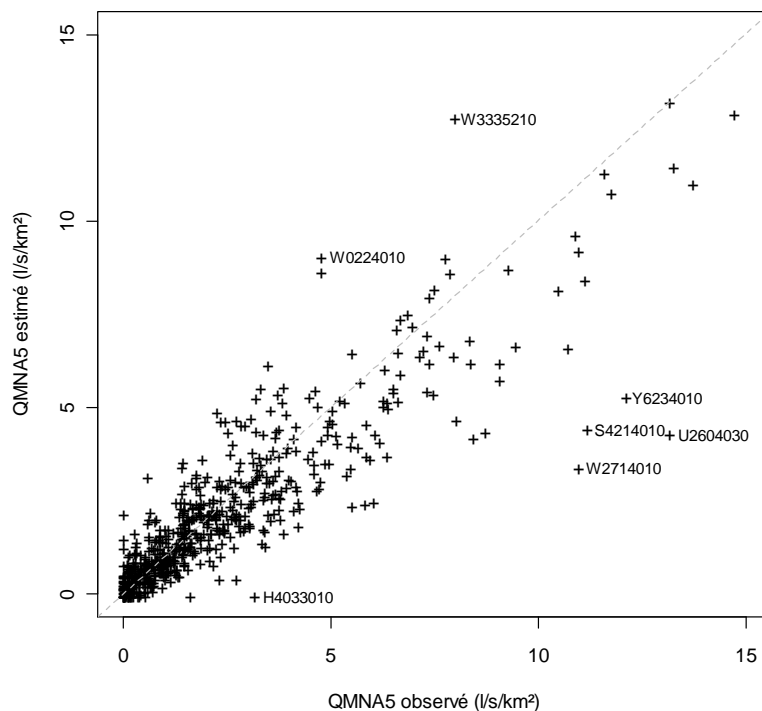


Figure V-11 : QMNA5 spécifiques observés et estimés à partir des modèles régressifs ajustés pour les quatre classes de régime d'étiage

V.2.2 Comparaison des méthodes de définition de voisinage en sites non jaugés

Le potentiel d'estimation dans le cas de voisinages idéalement connus étant démontré, il s'agit maintenant de déterminer si les méthodes de définition de voisinage en sites non jaugés reflètent suffisamment bien les similitudes entre bassins pour parvenir à des résultats aussi performants. Ceux-ci sont représentés sur la Figure V-12 qui rassemble l'ensemble des modalités examinées dans cette application.

Lorsque l'on examine le premier des deux critères de performance (*i.e.* l'écart absolu entre valeurs prédites et observées), on constate qu'une distinction assez nette apparaît entre les modalités *HER*, *CART1* et *CART2* d'une part et d'autre part les modalités *ROI_G* et *ROI_V* qui fournissent des résultats assez médiocres (avec des coefficients de détermination atteignant péniblement 0.52 et 0.41 respectivement), à peine meilleurs que les résultats fournis par l'ajustement d'un unique modèle national. La définition de similitudes entre bassins selon ces deux dernières modalités se montre alors clairement insatisfaisante par rapport aux voisinages de référence identifiés sur la base de la proximité dans l'espace hydrologique (*ROI_H*). Ce résultat démontre notamment que la proximité géographique (*ROI_G*) est loin de constituer ici un critère suffisamment pertinent en termes de similitude des comportements hydrologiques d'étiage. Par ailleurs les tentatives visant à restituer ces similitudes au travers d'un espace élaboré à partir des descripteurs de bassin (*ROI_V*) se révèlent encore plus décevantes et ne semblent pas apporter de gain par rapport au voisinage géographique si ce n'est en permettant de réduire les largeurs des intervalles de confiance.

Parmi les trois autres techniques de définition de voisinages, les modalités *HER* et *CART2* se distinguent par des performances d'estimation relativement satisfaisantes (s'approchant des résultats de la modalité *CRE* en termes d'écarts aux observations) et pratiquement équivalentes avec des coefficients de détermination atteignant 0.70 et 0.75 respectivement. Bien entendu certains des bassins signalés précédemment comme atypiques ou influencés présentent toujours des estimations particulièrement mauvaises (Figure V-13). La discrimination réalisée par le biais des *HER* ou au moyen de la procédure *CART2* (qui contrairement à la procédure *CART1* intègre une information qualitative à caractère hydrologique dans les variables de décision (*i.e.* les classes de régime hydrologique mensuel)), apparaît comme relativement efficace pour regrouper les bassins présentant un comportement similaire et assurer l'efficacité des modèles régionaux à expliquer la variabilité résiduelle du QMNA5. Pour départager ces deux modalités, il est alors nécessaire de se référer au second critère de performance qui reflète le degré d'incertitude associé aux estimations. Il en ressort assez nettement que la procédure de classification *CART2* s'avère la plus efficace en permettant de d'accroître sensiblement la confiance dans la majorité des estimations. Il convient en revanche de remarquer que l'on s'écarte ici sensiblement des résultats de référence obtenus dans le cas de voisinages idéalement connus. L'incertitude associée aux estimations apparaît ainsi nettement plus marquée et peut parfois largement dépasser celle fournie par le modèle national même s'il existe un gain pour la majorité de l'échantillon. Encore une fois, il semble que cette observation soit à mettre en rapport avec les effectifs de stations employés pour ajuster les modèles régionaux, qui, lorsqu'ils s'avèrent trop faibles, conduisent à des modèles parfois insuffisamment robustes (même s'ils se révèlent performants par ailleurs). On trouve ici un bon argument pour justifier

le recours aux estimations obtenues en sites peu jaugés dans le but de consolider l'échantillon de référence (*i.e.* augmenter le nombre de sites employés pour l'ajustement des modèles régionaux), étape qui sera traitée dans le prochain chapitre (*cf.* Chapitre VI). Pour confirmer cet intérêt, il conviendra évidemment de déterminer au préalable s'il existe un gain significatif à valoriser l'information hydrologique disponible aux sites peu jaugés par rapport à l'estimation obtenue ici aux sites non jaugés.

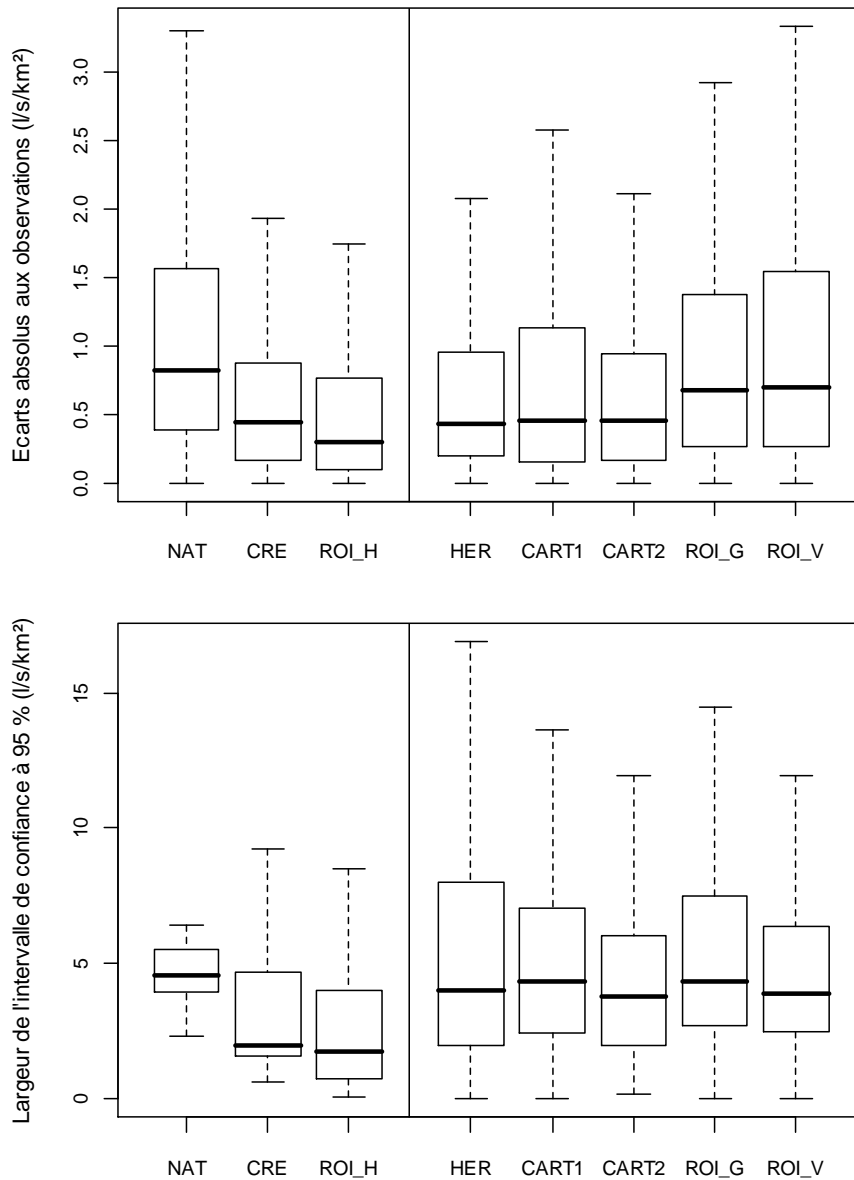


Figure V-12 : Comparaison des performances d'estimation du QMNA5 selon l'ensemble des modalités de définition de voisinage examinées

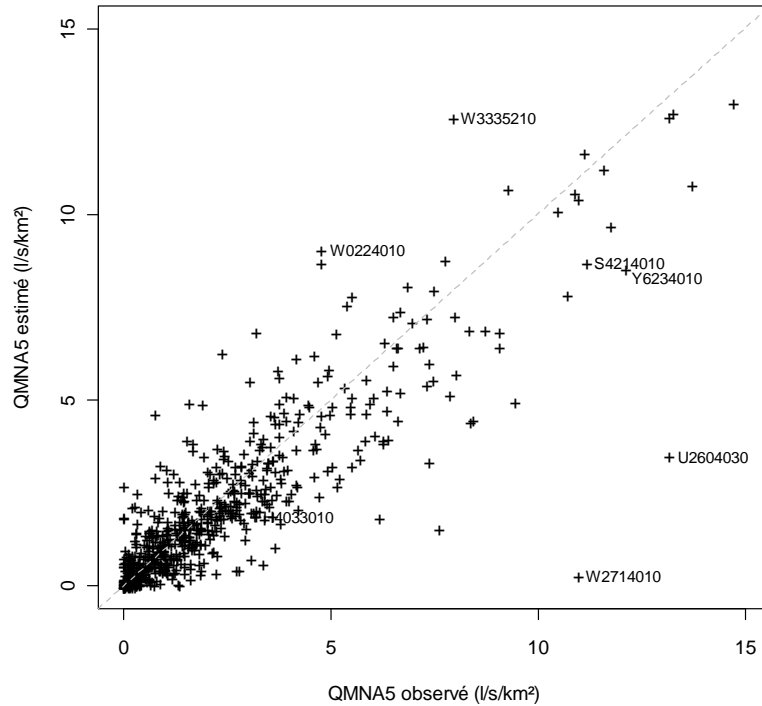


Figure V-13 : QMNA5 spécifiques observés et estimés à partir des modèles régressifs ajustés pour les regroupements issus de la procédure CART2

Auparavant nous nous proposons tout de même d'apporter rapidement quelques précisions vis-à-vis des résultats obtenus à l'issue de la procédure d'estimation finalement retenue ici. On signalera notamment que l'analyse des modèles régressifs régionaux ajustés pour les regroupements issus de la procédure CART2 montre que les différentes variables de bassins disponibles sont représentées de manière relativement équilibrée parmi les variables explicatives avec toutefois une légère prédominance des descripteurs relatifs à la pluviométrie, la température et l'occupation des sol.

Encore une fois l'interprétation physique des modèles s'avère hasardeuse si ce n'est vis-à-vis des signes attribués aux variables climatiques qui apparaissent à nouveau cohérents dans la majorité des cas vis-à-vis des processus de génération d'écoulement (*i.e.* le QMNA5 augmente avec les précipitations et diminue avec la température ou l'évapotranspiration).

Si l'on examine le détail des performances d'estimation par classe de régime d'étiage (Figure V-14), on constate que l'on retrouve une hiérarchie assez proche de celle mise en évidence précédemment pour les estimations reposant sur l'exploitation des chroniques courtes. Ainsi les estimations les plus fiables sont à nouveau obtenues pour la classe de bassins les plus « secs » (classe 3). Les estimations pour les bassins des deux premières classes (bassins productifs à forte inertie et bassins à régime intermédiaire) s'avèrent plus mitigées avec une diminution très nette de la fiabilité des valeurs fournies. Enfin la classe 4 qui regroupe les bassins à régime nival présente là encore les résultats les plus médiocres. On remarquera à ce titre que les performances d'estimation pour cette catégorie de bassins, bien que ceux-ci soient peu nombreux, influencent assez significativement la partie haute de la distribution des incertitudes.

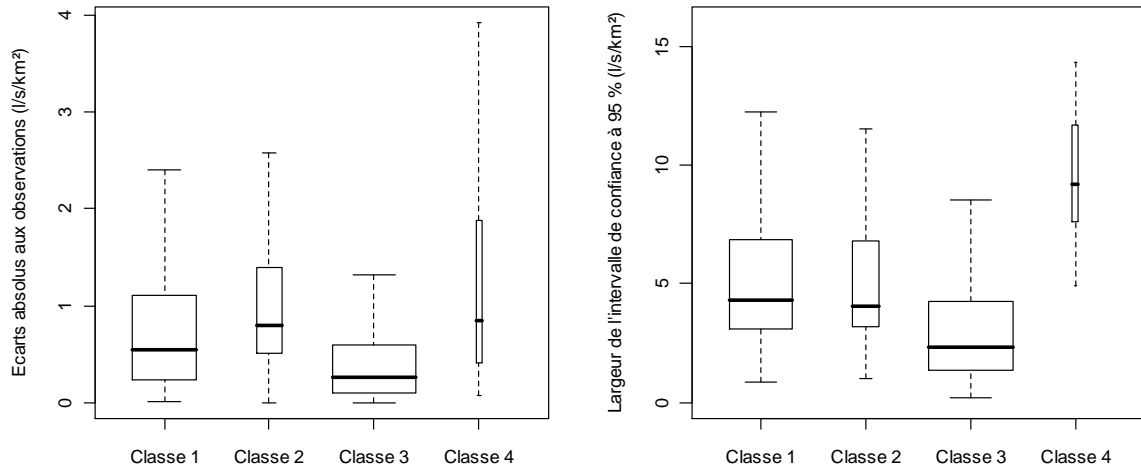


Figure V-14 : Détail des performances d'estimation du QMNA5 par classes de régime d'étiage à l'issue de la procédure d'estimation CART2 (la largeur des boxplots est proportionnelle au nombre de sites appartenant à chaque classe)

V.2.3 Comparaison avec les performances d'estimation en sites peu jaugés

Afin de déterminer le gain à exploiter une information locale à caractère hydrologique, on se propose de comparer ici les performances d'estimation du QMNA5 spécifique en sites non jaugés selon la meilleure des modalités dégagée précédemment avec les performances d'estimation obtenues en sites peu jaugés, que ce soit par valorisation de chroniques courtes ou de jaugeages épisodiques. Pour ce faire, nous avons repris les résultats les plus satisfaisants dégagés dans les Chapitres III et IV à l'issue de la procédure de validation croisée menée à partir du même échantillon de station de référence pour différentes durées de suivi ($D = 1, 2, 5, 10, 15, 20$) et, dans le cas des jaugeages épisodiques, avec la réalisation de 5 jaugeages chaque année (voir notamment la Figure IV-11 en section IV.3)

Les résultats obtenus en conservant les mêmes critères de performance (écart entre les valeurs de QMNA5 prédites et observées et de largeur de l'intervalle de confiance à 95 %, exprimés en $l/s/km^2$) sont résumés sur la Figure V-15, toujours sous la forme de boxplots.

Si l'on examine tout d'abord les résultats de l'estimation en sites non jaugés et ceux issus de la valorisation des données de jaugeage, la comparaison des erreurs absolues semble indiquer que l'emploi des données de jaugeages n'est réellement profitable qu'à partir de deux années de suivi. En deçà, l'estimation en sites non jaugés peut s'avérer meilleure. Toutefois il apparaît que le recours aux données de jaugeage permet de réduire significativement la largeur des intervalles de confiance associés aux estimations, quelle que soit la durée de suivi. Autrement dit, la robustesse des estimations obtenues s'avère globalement meilleure, ce qui constitue un réel avantage de l'exploitation des données de jaugeages éventuellement disponibles au site cible.

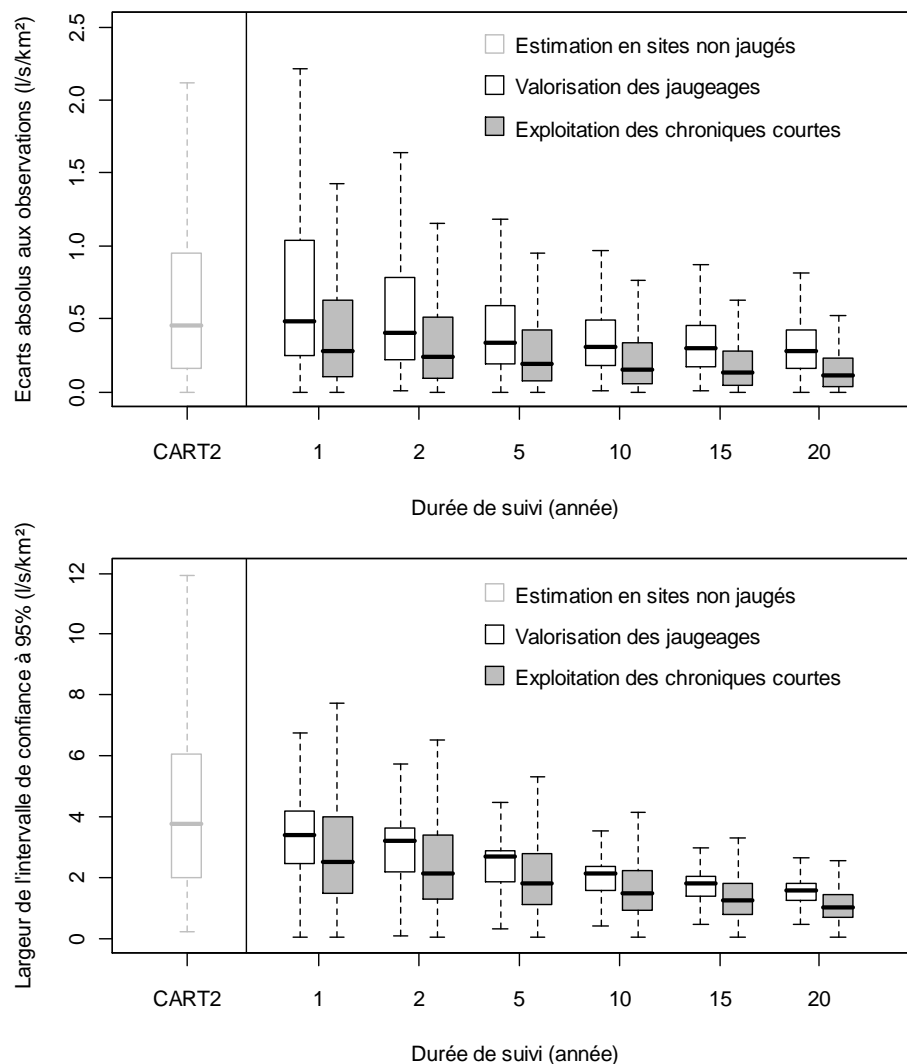


Figure V-15 : Comparaison des performances d'estimation du QMNA5 en sites non jaugés, par valorisation de données de jaugeages volants (5 jaugeages par année) et par exploitation de chroniques courtes

Cet avantage est encore plus sensible lorsque l'estimation repose sur l'exploitation de chroniques courtes avec évidemment un gain d'autant plus marqué que la durée de chronique disponible est importante. Ainsi, à l'image des conclusions des quelques travaux similaires relevés dans la littérature, notamment pour des variables comparables au QMNA5 (*e.g.* le Q95, Laaha et Blöschl (2006a)), il apparaît sans surprise que la valorisation au moyen de méthodes appropriées d'une information à caractère hydrologique disponible localement au site cible se révèle potentiellement très profitable pour l'estimation de débits caractéristiques d'étiage par rapport à une estimation en sites non jaugés. Il s'agira alors de déterminer si les incertitudes associées aux estimations en question sont suffisamment réduites pour apporter de l'information lors de l'étape de consolidation du jeu de stations de référence qui sera menée dans le Chapitre VI.

V.2.4 Comparaison avec une approche par régionalisation des paramètres d'un modèle hydrologique

Pour terminer avec l'analyse des résultats obtenus en validation croisée, il nous paraissait intéressant de confronter la méthode appliquée dans le cadre de nos travaux à une approche basée sur la régionalisation des paramètres d'un modèle hydrologique pluie-débit. Ce type d'approche a été mis en œuvre par Folton *et al.* (2011) dans le cadre de la convention ONEMA-Cemagref pour la réalisation d'une cartographie nationale de synthèse des débits d'étiage (méthode *LOIEAU*). Comme mentionné en introduction, l'avantage d'une telle démarche repose avant tout sur les possibilités offertes par la reconstitution d'une chronique de débit en sites non jaugés, qui permet, au terme de la procédure d'estimation, d'extraire tout un panel de statistiques hydrologiques pour répondre aux différentes problématiques de gestion. Il s'agit alors d'illustrer ici le type de démarche employée, ses implications et les résultats obtenus vis-à-vis de l'estimation du QMNA5.

La méthode retenue fait ici appel au modèle hydrologique GR2M pour modéliser les écoulements moyens mensuels. Ce modèle de type conceptuel (modèle à réservoirs) présente une structure classique reposant sur (i) une fonction de production permettant de quantifier la pluie efficace (lame d'eau ruisselée) et (ii) une fonction de transfert qui détermine la répartition des débits dans le temps (Figure V-16) en assurant le respect du bilan en eau. Dans le module de production, la donnée d'entrée est une série temporelle de variables climatiques (précipitations liquides et solides, températures, évapotranspiration, extraites ici de l'archive SAFRAN agrégée au pas de temps journalier). Ces données sont traitées de manière à quantifier la pluie efficace (avec prise en compte du stock neigeux et un paramètre de fonte constant, fonction de la température) en chaque maille de la grille de référence SAFRAN (mailles de résolution 8 km²). La lame d'eau ruisselée est alors agrégée sur le bassin au pas de temps mensuel et injectée dans le module de transfert. Celui-ci est caractérisé par un jeu de paramètres propre à chaque bassin (notés *XV1* et *XV2* respectivement). La première étape consiste alors à déterminer les paramètres *XV1* et *XV2* permettant de restituer correctement les débits observés aux sites instrumentés (*i.e.* calage du modèle). Ce calage a été effectué sur un jeu de 1577 bassins de référence disposant d'au moins 12 années de chronique en s'appuyant sur un critère d'optimisation permettant de parvenir à un bon compromis entre la restitution des QMNA5 observés et la restitution des lames d'eau annuelles (critère défini suite à l'analyse des résultats de modélisation pour 919 bassins disposant d'au moins 22 années de chronique).

A partir de ces résultats, il est ensuite envisagé de régionaliser les paramètres *XV1* et *XV2* pour pouvoir appliquer le modèle hydrologique en sites non jaugés, y simuler une chronique de débits moyens mensuels et en déduire une valeur de QMNA5. Dans un premier temps une relation est établie par régression multiple entre chacun des deux paramètres et un jeu de descripteurs du bassin, la démarche est alors analogue à celle que nous avons employé (les variables explicative retenues à l'échelle nationale sont ici l'altitude du bassin et les niveaux initiaux de saturation du réservoir sol en hiver et en été). A ce stade, la reconstitution des paramètres du modèle s'avère relativement médiocre (coefficients de détermination de l'ordre de 0.21 et 0.3 pour *XV1* et *XV2* respectivement). Il est alors apporté une correction en fonction de l'appartenance des bassins à une classe de fonctionnement hydrogéologique en attribuant à chaque classe un coefficient correctif ajusté à partir des données pour optimiser la

reconstitution de chacun des deux paramètres (on retrouve ainsi une approche par voisinage). Néanmoins le gain apporté étant modeste (coefficients de détermination de l'ordre de 0.32 et 0.49 pour $XV1$ et $XV2$ respectivement), Folton *et al.* (2011) suggèrent de procéder à une seconde correction des paramètres estimés par interpolation spatiale des résidus selon une procédure reposant sur l'inverse de la distance entre bassins. Cette dernière étape permet cette fois d'améliorer sensiblement les résultats (coefficients de détermination de l'ordre de 0.78 et 0.91 pour $XV1$ et $XV2$ respectivement) et vient parachever la procédure d'estimation.

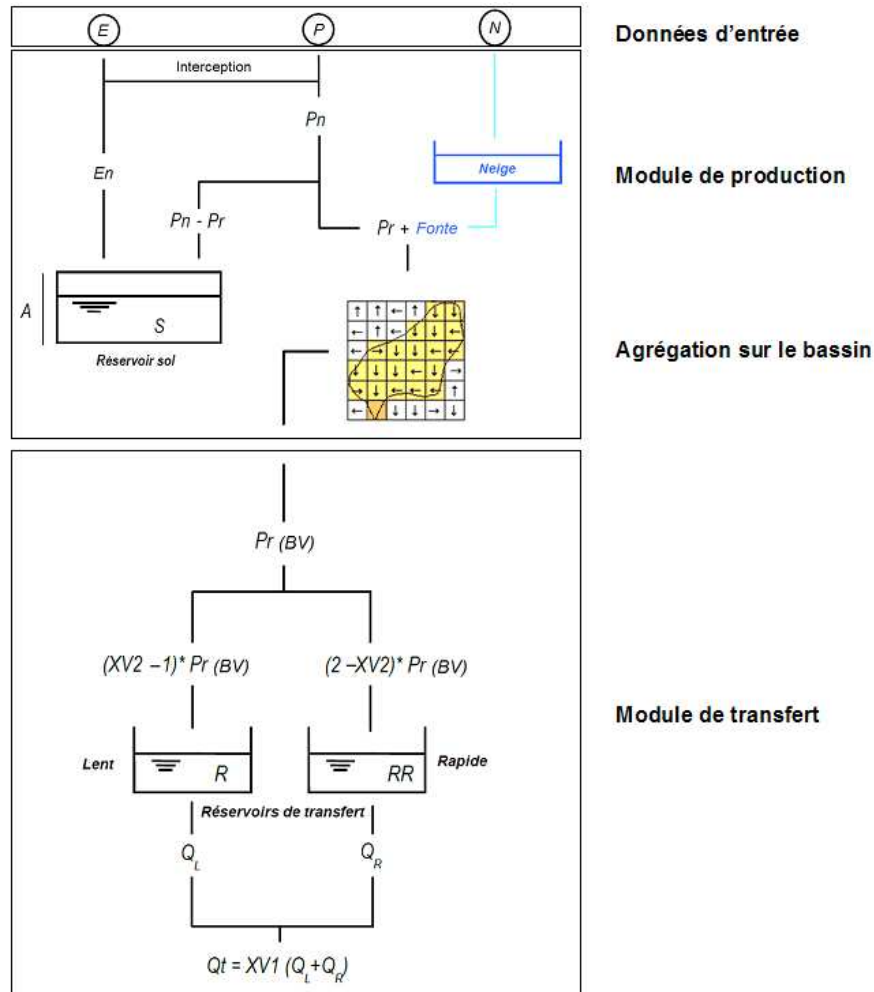


Figure V-16 : Structure du modèle GR2MLOIEAU modifié pour les besoins de l'étude

Celle-ci est alors appliquée en validation croisée sur les 919 bassins disposant d'au moins 22 années de chronique (*i.e.* en excluant tour à tour chacun de ces bassins), échantillon qui inclut les 632 sites de référence que nous-même avons employés. Il est alors permis de confronter nos propres résultats avec ceux obtenus au terme de la procédure LOIEAU (en l'absence d'information sur la variance d'estimation dans la méthode LOIEAU, seul le critère d'écart entre valeurs observées et prédites peut-être présenté ici, Figure V-17).

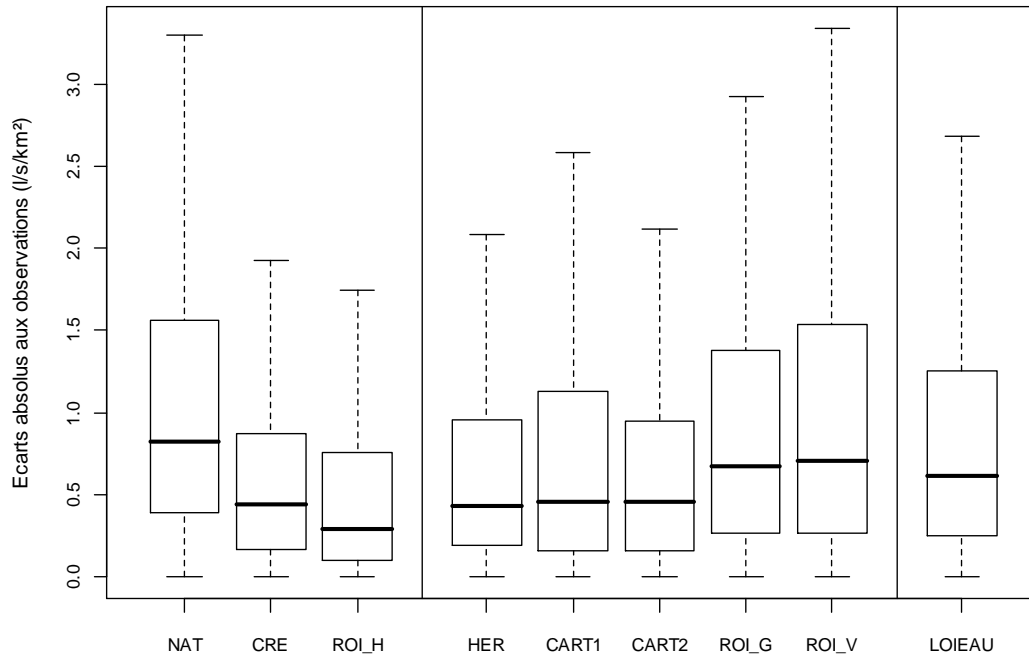


Figure V-17 : Comparaison des performances relatives d'estimation du QMNA5 spécifique de la méthode LOIEAU et de l'approche par régression multiple basée sur différentes modalités de définition de voisinage

D'après ces résultats, on constate que la méthode LOIEAU ne permet pas de parvenir à des performances d'estimation équivalentes à celles obtenues dans le cas d'une régionalisation directe du QMNA5 au moyen de l'approche CART2 (d'autant que la régionalisation des paramètres du modèle s'appuie ici sur un plus grand nombre de bassins de référence incluant notamment des bassins instrumentés dotés de chroniques courtes). Il existe cependant un gain assez net par rapport à l'ajustement d'un unique modèle national ce qui montre que la méthode présente tout de même un intérêt (outre le fait qu'elle permet la reconstitution d'une chronique dans son intégralité).

Cette observation, qui rejoint les conclusions de Engeland et Hisdal (2009) dans le cadre d'une application très similaire, montre dans quelle mesure la difficulté à estimer convenablement les paramètres d'un modèle hydrologique, malgré de bonnes performances en calage, présente une forte influence sur la détermination des statistiques hydrologiques extraites des chroniques modélisées. L'absence de contrôle concernant les éventuelles interactions (*e.g.* effets de compensation) entre les paramètres estimés constitue vraisemblablement l'un des principaux aléas de ce type de technique. Il en résulte que le recours à un modèle hydrologique, généralement conçu pour restituer l'ensemble des processus de génération d'écoulement, se trouve probablement désavantagé par rapport à une procédure s'attachant à estimer directement la variable d'intérêt. En contrepartie, l'approche permet d'assurer une certaine cohérence entre variables estimées (par exemple plusieurs quantiles de périodes de retour croissantes) ce que ne garantirait pas la mise en œuvre de procédures d'estimation indépendantes.

V.2.5 Discussion autour de l'application des techniques de krigeage pour l'estimation du QMNA5

Comme mentionné en préambule de la section V.1.3, les tentatives d'application des techniques de krigeage pour l'estimation du QMNA5 se sont révélées peu efficaces. Nos essais se sont en premier lieu orientés vers le cas le plus simple en appliquant la technique de krigeage à l'échelle nationale et en construisant le variogramme empirique associé sur la base de la proximité géographique définie par la distance entre centres de gravité des bassins versants (Figure V-18).

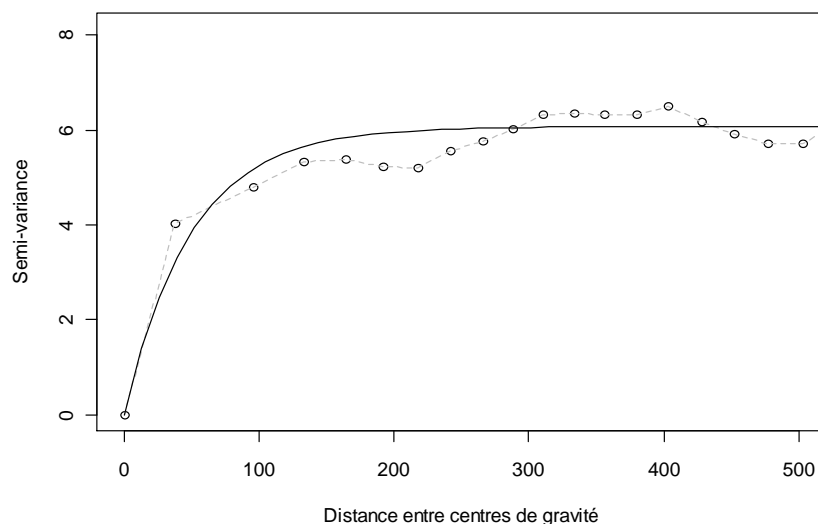


Figure V-18 : Variogramme « national » des QMNA5 spécifiques

Si le variogramme obtenu présente bien une allure qui démontre l'existence d'une certaine organisation spatiale (avec notamment une portée relativement importante, de l'ordre de 150 km), les résultats d'estimation fournis en validation croisée s'avèrent peu satisfaisants (Figure V-19) ou du moins comparables à ceux obtenus dans le cas de l'estimation par régression multiple à l'échelle nationale. Il semble bien que ce résultat confirme l'importance de procéder à des regroupements de bassins susceptibles de permettre la construction de variogrammes « régionaux » plus adaptés à la description de la variabilité locale du QMNA5. Les essais effectués en ce sens, par exemple au travers des HER ou au moyen de la définition de voisinages « glissants » définis sur la base de la proximité géographique (*i.e.* de manière à construire un variogramme propre à chaque site cible, approche qui n'a jamais été examinée dans la littérature) se sont montrés infructueux. Il est notamment apparu, dès la construction des variogrammes « régionaux », que la proximité géographique ne constituait plus, dans certains cas, un facteur structurant et aboutissait à des variogrammes empiriques présentant une allure très erratique ou une portée excessivement faible (voire nulle). L'idée d'exploiter un espace de substitution élaboré à partir des descripteurs de bassin (approche « PSBI ») pour s'affranchir de l'utilisation d'une distance à caractère géographique n'a pas permis de parvenir à des résultats plus probants, notamment en raison de la difficulté à identifier un espace approprié.

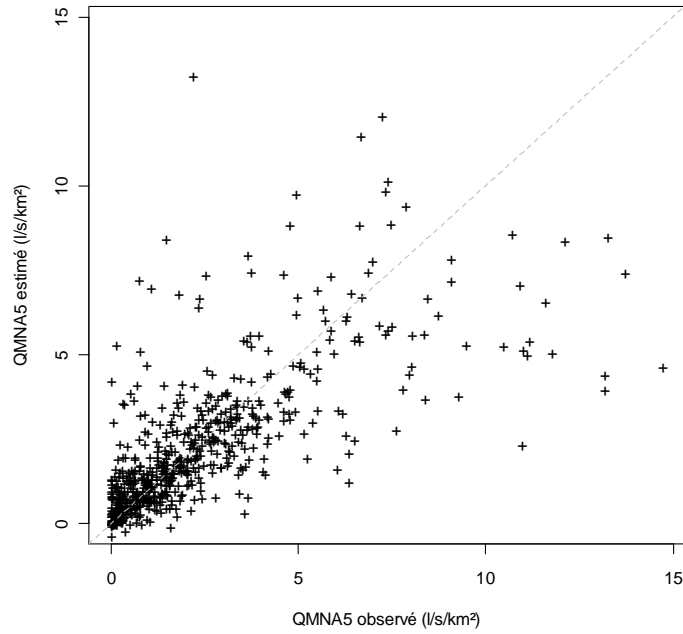


Figure V-19 : QMNA5 spécifiques observés et estimés par krigeage à partir du variogramme « national »

Enfin, il aurait pu être envisagé d'appliquer une procédure de krigeage aux résidus de la procédure d'estimation *CART2*. Là encore les difficultés rencontrées sont multiples (notamment la difficulté à caractériser la structure spatiale des résidus issus de modèles régressifs régionaux distincts sur des regroupements par ailleurs éclatés dans l'espace). Il est par ailleurs légitime de s'interroger sur la pertinence d'une telle démarche dans la mesure où la part de variance non expliquée par les modèles régressifs régionaux repose vraisemblablement sur des processus très locaux que l'on pourrait presque qualifier d'aléatoires. En tout état de cause, un variogramme de ces résidus à l'échelle nationale indique une très faible dépendance des valeurs dans l'espace géographique (portée de 50 km environ, Figure V-20) et ne permet pas d'appliquer le krigeage avec succès.

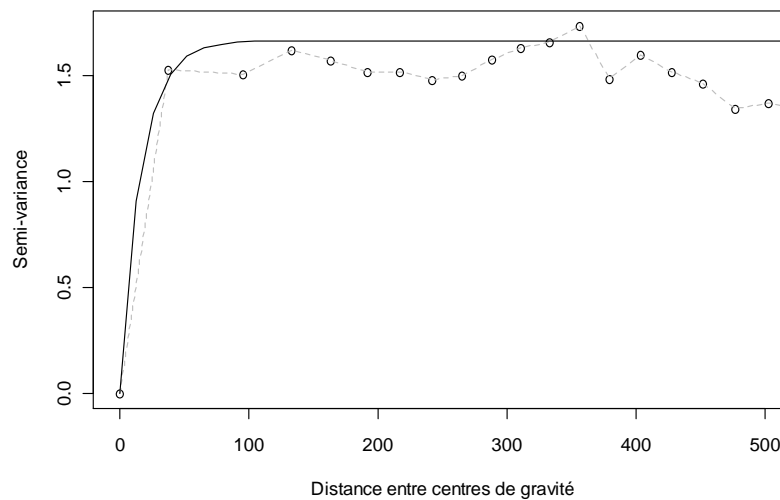


Figure V-20 : Variogramme « national » des résidus de l'estimation du QMNA5 par la procédure *CART2*

V.3 Première cartographie du QMNA5 spécifique en sites non jaugés

La validation croisée ayant permis de dégager la meilleure modalité de définition des voisinages (CART2) et l'identification des modèles régressifs régionaux les plus performants, nous avons appliqué la procédure d'estimation dans son intégralité de manière à cartographier le QMNA5 spécifique (exprimés en $l/s/km^2$) en tout point du réseau hydrographique français drainant une surface de plus de $50 km^2$ (comme spécifié en section I.2.2). On rappellera que les variables de bassin utilisées pour réaliser l'estimation n'étant pas toujours disponibles sur la partie amont des bassins frontaliers, les valeurs obtenues pour ceux-ci (en particulier pour le Rhin et le Rhône) ne sont pas exploitables.

Une première carte des estimations obtenues est présentée sur la Figure V-21. Sur celle-ci sont figurés en rouge les points (ou portions) du réseau hydrographique pour lesquels les estimations fournies se révèlent anormales, voire totalement irréalistes (avec des valeurs de QMNA5 spécifiques dépassant plusieurs milliers de $l/s/km^2$). Après vérification, il a été constaté que ces anomalies se produisaient systématiquement pour cinq des vingt régions pour lesquelles les modèles ajustés (généralement de forme log-linéaire) se révèlent alors fortement instables en extrapolation (*i.e.* lorsque les caractéristiques de bassins aux sites concernés se trouvent hors de la gamme des valeurs employées pour ajuster le modèle). Ce problème, rarement soulevé dans la littérature où la démonstration de l'efficacité d'une méthode se contente généralement du résultat fourni en validation croisée, montre bien dans quelle mesure la validation croisée ne constitue pas toujours un gage suffisant vis-à-vis de la robustesse des modèles ajustés en extrapolation, en particulier lorsque l'ajustement porte sur de trop petits effectifs (malgré les précautions prises à ce sujet).

Dans la mesure où il n'était pas possible de se satisfaire d'un tel résultat, nous avons pris le parti d'examiner plus attentivement les modèles pour les cinq régions concernées de manière à identifier un nouveau modèle permettant de parvenir à des résultats équivalents tout en fournissant des estimations réalistes en extrapolation¹. A l'issue de cette étape de correction, les performances d'estimation en validation croisée telles qu'analysées en section V.2.2, restent pratiquement inchangées (*e.g.* le coefficient de détermination passe de 0.75 à 0.74) ce qui ne remet pas en cause le choix de la meilleure modalité de sélection de voisinage. La nouvelle carte des estimations ainsi obtenues est présentée sur la Figure V-22 tandis que les largeurs des intervalles de confiance à 95 % associés à chaque estimation sont reportées sur la Figure V-23.

A cette échelle, il apparaît que les estimations s'avèrent relativement cohérentes avec les grandes caractéristiques hydro-climatiques régionales identifiées précédemment à partir des observations locales disponibles aux stations hydrométriques. On retrouve ainsi des valeurs de QMNA5 spécifique particulièrement élevées ($QMNA5 > 10 l/s/km^2$ voire $15 l/s/km^2$) dans les zones de reliefs connaissant des phénomènes de stockage/fonte de neige avec des étiages préférentiellement hivernaux (Alpes, Pyrénées), des valeurs assez fortes ($QMNA5 > 5 l/s/km^2$) dans les zones d'altitude moyenne (Jura,

¹ En reprenant le protocole présenté en section V.1.3, le renouvellement du modèle régional est effectué, lors de la dernière étape, par ordre de performance jusqu'à parvenir à une résultat convenable en extrapolation.

Vosges, Massif Central) ou dans les régions présentant des échanges nappes-rivière généralisés et importants (Bassin Parisien, cours d'eau côtiers normands, Landes), des valeurs moyennes (QMNA5 autour de 1 à 2 l/s/km²) dans les zones présentant une influence océanique marquée (Bretagne occidentale, Cotentin) et enfin des valeurs faibles ou nulles (QMNA5 < 0.1 l/s/km²) dans les secteurs à substratum fortement imperméable et/ou à saison estivale particulièrement sèche (Vendée, Coteaux de Gascogne, pourtour méditerranéen).

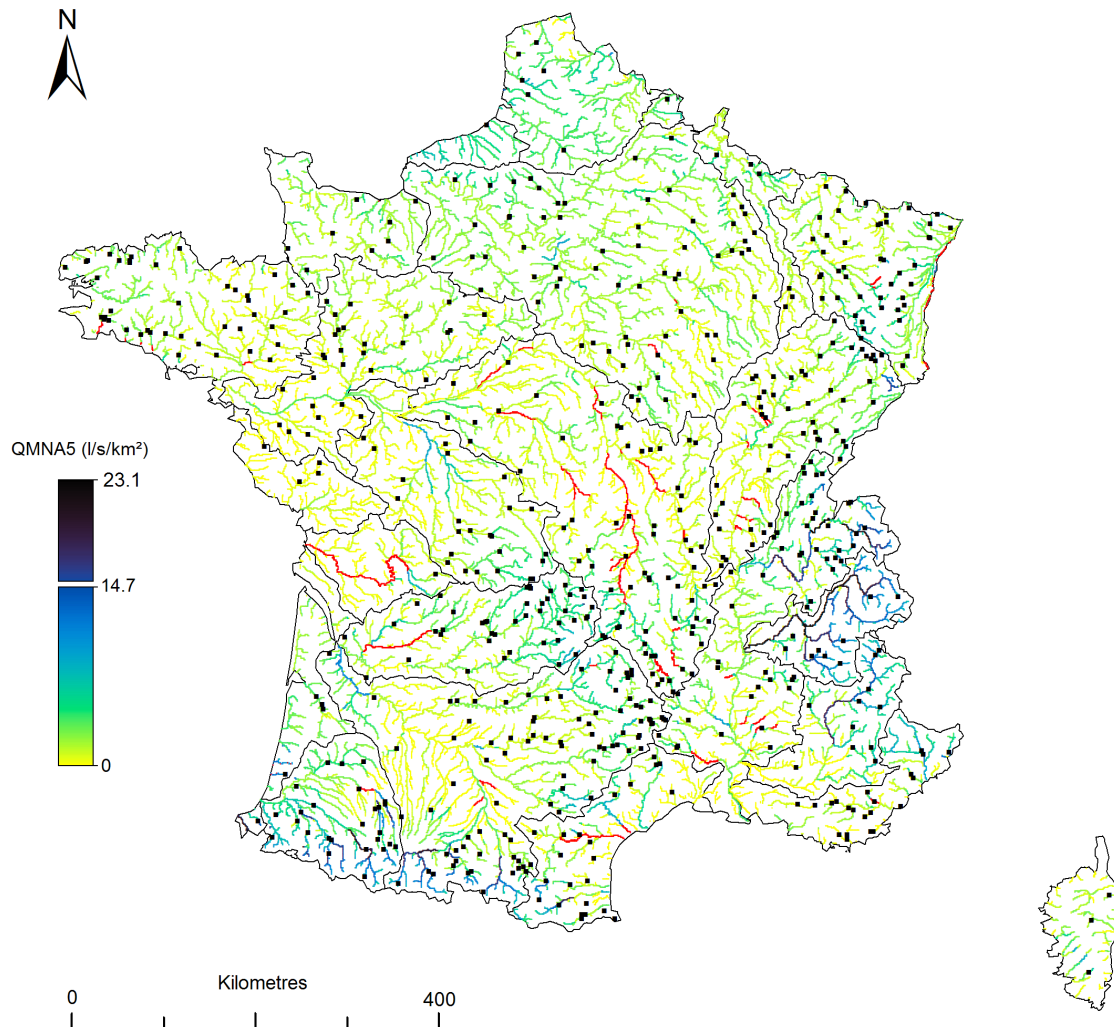


Figure V-21 : Cartographie du QMNA5 spécifique (l/s/km²) estimé par régression multiple (sans correction des modèles) sur l'ensemble des points du réseau hydrographique théorique drainant une surface supérieure à 50 km² (la partie supérieure de l'échelle de couleur représente les valeurs hors de la gamme de QMNA5 observée dans l'échantillon de référence ; les valeurs au-delà, considérées comme aberrantes, sont figurées en rouge)

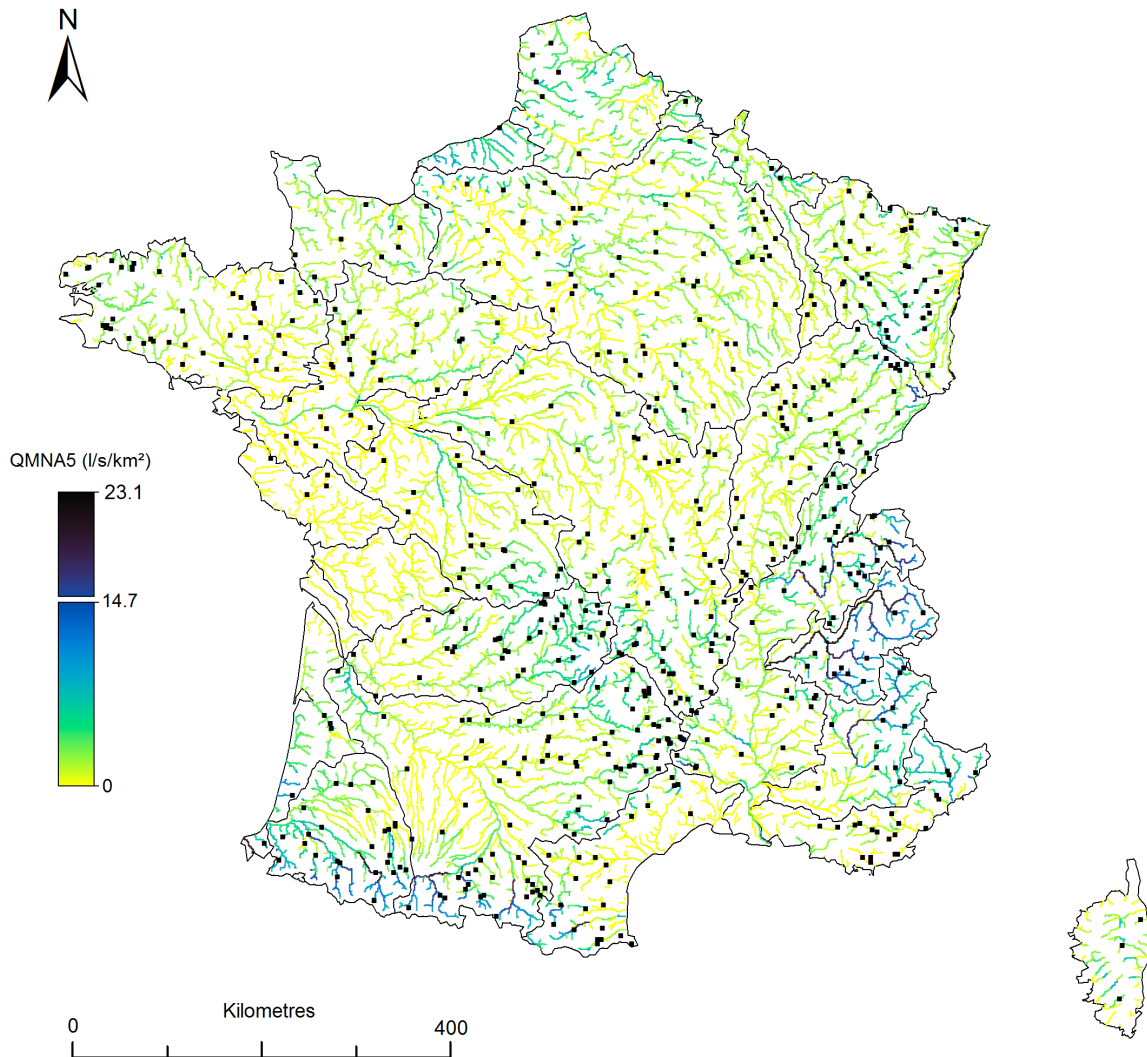


Figure V-22 : Cartographie du QMNA5 spécifique ($l/s/km^2$) estimé par régression multiple (après correction des modèles) sur l'ensemble des points du réseau hydrographique théorique drainant une surface supérieure à $50 km^2$ (la partie supérieure de l'échelle de couleur représente les valeurs hors de la gamme de QMNA5 observée dans l'échantillon de référence)

En revanche l'analyse détaillée de ces cartes permet de déceler de nombreux défauts, liés tout d'abord à la présence de discontinuités parfois brutales entre les estimations fournies sur des points du réseau hydrographique pourtant voisins. Ces discontinuités, qu'elles apparaissent sur un même tronçon ou au niveau d'une confluence, sont dans la grande majorité des cas liées à un saut entre deux régions distinctes (on signalera à ce propos qu'il est particulièrement délicat de déterminer si ces ruptures sont justifiées ou non au niveau des confluences). Encore une fois ce type de difficulté, qui n'apparaît qu'au terme de l'application effective de la procédure d'estimation (*i.e.* au delà de l'étape de validation croisée), n'est que rarement mentionné dans la littérature. Avec le recul, il apparaît pourtant que ces sauts s'avèrent inhérents à toutes les méthodes reposant sur la définition de voisinages dans le cadre d'une approche d'estimation par construction de modèles régressifs régionaux (à l'exception peut-être de regroupement respectant les limites hydrographiques, solution qui n'a pas été testée), en particulier dans

le cas de la méthode de regroupement CART en raison du mode de classification binaire qui ne permet pas d'assurer la continuité entre deux régions. La solution passerait alors par l'assignation d'une probabilité d'appartenance à chaque région identifiée comme cela a été mis en œuvre dans le cas des HER (quelques brefs essais visant à probabiliser l'appartenance aux différentes classes *CART2* se sont jusqu'à présent montrés infructueux). Si ces discontinuités peuvent bien entendu faire l'objet de critiques, notamment dans un cadre opérationnel¹, il est toutefois indispensable de ne pas perdre de vue que chaque estimation est accompagnée d'une incertitude qui, dans la mesure où il y a recouvrement entre les intervalles de confiance, permet d'assurer une certaine forme de continuité le long du réseau hydrographique.

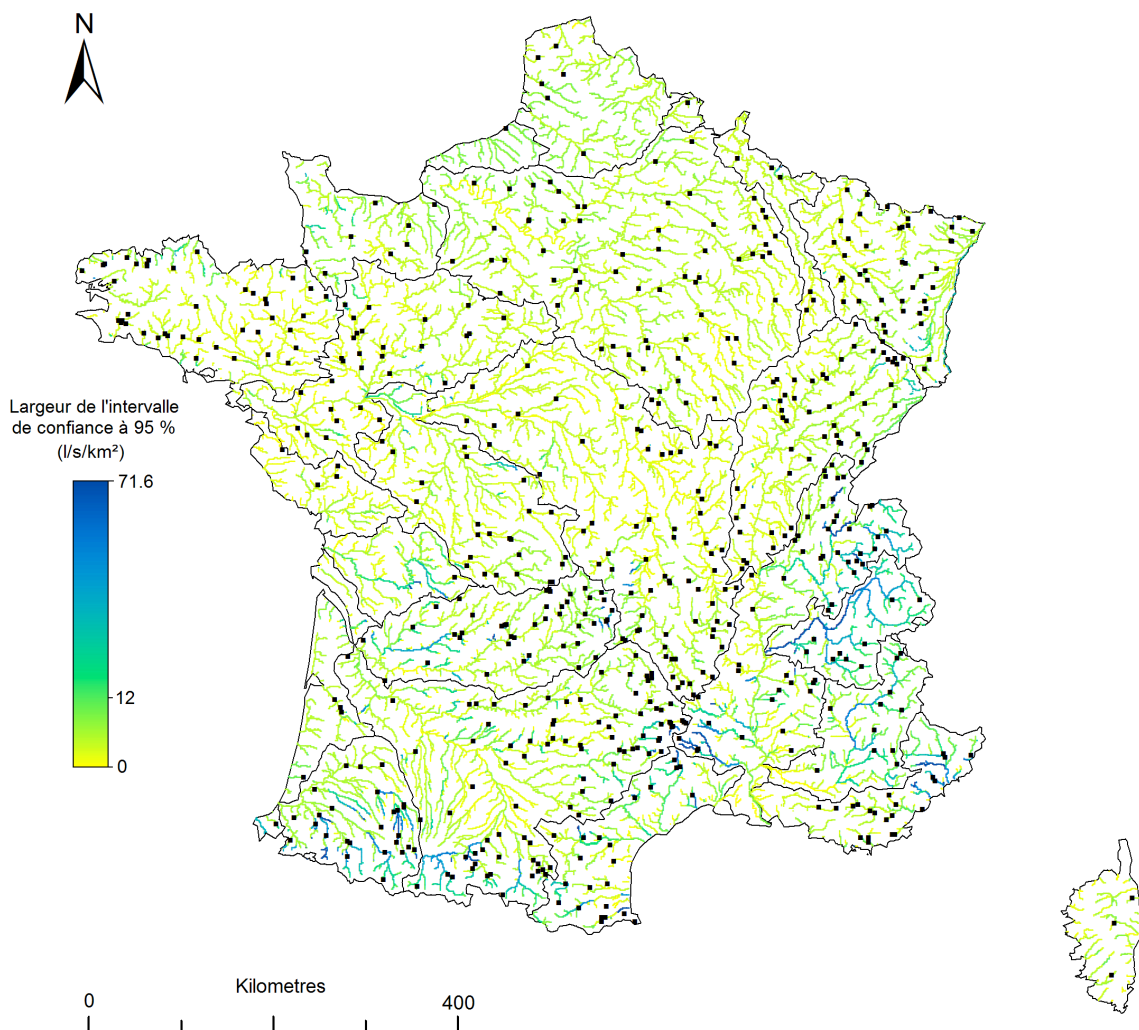


Figure V-23 : Cartographie de la largeur des intervalles de confiance à 95 % ($l/s/km^2$) associés aux valeurs de $QMNA5$ spécifique estimées par régression multiple (après correction des modèles) sur l'ensemble des points du réseau hydrographique théorique drainant une surface supérieure à $50 km^2$

¹ De telles critiques ont été vivement exprimées lors de la restitution des résultats à l'ONEMA. En effet de telles discontinuités apparaissent difficiles à justifier dans un cadre réglementaire (par exemple pour les dossiers d'autorisations de prélèvements pour l'agriculture).

La réponse à apporter quant au réalisme de certaines valeurs nous paraît encore plus délicate. On remarque par exemple que les valeurs données sur les grands cours d'eau alpins tels que l'Isère s'avèrent probablement fortement surestimées (QMNA5 atteignant jusqu'à 23.1 l/s/km²). A l'inverse les estimations fournies sur la partie aval de la Durance sont extrêmement faibles (voire nulles) ce qui semble peu réaliste pour un cours d'eau de cette dimension. Ce type de critique reste malheureusement difficile à réaliser pour l'ensemble des valeurs fournies sans avoir un recul suffisant sur le contexte hydrologique local de chaque cours d'eau. L'examen de la largeur des intervalles de confiance, en permettant de se faire une idée de la fiabilité des estimations fournies, apparaît alors comme un élément indispensable de la critique des résultats. On constate en l'occurrence que les QMNA5 estimés dans les zones correspondants aux bassins à régime nival (dont l'Isère fait partie), se révèlent particulièrement incertains. Néanmoins ces incertitudes restent « raisonnables » lorsqu'elles sont exprimées en relatif par rapport aux valeurs estimées (de l'ordre de +/- 100%). Plus critiquables sont les valeurs d'incertitudes obtenues, relativement aux valeurs estimées, dans la partie centrale de Cévennes, sur le bassin de l'Adour, dans la partie aval du Var et plus secondairement sur le cours principal de la Charente et de l'Isle. Dans ces secteurs les incertitudes sont telles que les valeurs de QMNA5 proposées devraient être considérées comme inexploitable en l'état. Ailleurs les incertitudes se révèlent plus raisonnables avec des largeurs d'intervalle de confiance comprises dans la gamme de valeurs obtenues en validation croisée aux stations de l'échantillon de référence (< 12 l/s/km²). Les estimations associées peuvent alors être considérées comme valides.

V.4 Conclusion du Chapitre

Les travaux exposés dans ce chapitre étaient consacrés à une première mise en application de méthodes permettant l'estimation du QMNA5 spécifique en sites non jaugés à partir de l'échantillon de 632 stations de référence. Parmi ces méthodes, les approches d'interpolation par krigeage, dont les résultats sont rapidement apparus comme décevants, ont été délaissées en faveur des techniques d'estimation par ajustement de modèles régressifs régionaux. Pour assurer l'efficacité de celles-ci un protocole a tout d'abord été conçu pour permettre la sélection du meilleur modèle régressif à partir des descripteurs de bassin disponibles sur le plan national (*i.e.* sélection du jeu de variables explicatives permettant de parvenir aux meilleures performances d'estimation du QMNA5 spécifique). Ensuite l'essentiel de notre réflexion s'est concentré sur les modalités d'identification de voisinages pour regrouper les bassins possédant un comportement hydrologique similaire et permettre d'expliquer la variabilité résiduelle du QMNA5 au travers des modèles régressifs régionaux.

Ainsi lors d'une première étape, il a été envisagé de déterminer le potentiel d'estimation en se plaçant dans le cas de voisinages « idéalement connus », identifiés sur la base de similitudes hydrologiques (soit sur la base de l'appartenance à l'une des quatre classes de régime d'étiage soit sur la base de la proximité dans l'espace hydrologique issu de l'ACP des variables caractéristiques d'étiage, *cf.* Section II.2). Les résultats obtenus à l'issue de la validation croisée, lorsqu'il sont confrontés à ceux fournis par un unique modèle ajusté à l'échelle nationale (*i.e.* sans définition de voisinage), ont montré qu'un gain substantiel était possible en permettant de parvenir à des performances particulièrement encourageantes.

Il était alors question de tenter d'identifier de tels voisinages pour une application en sites non jaugés, c'est-à-dire en l'absence de connaissances sur le fonctionnement hydrologique au site cible. Plusieurs méthodes, s'appuyant sur un ensemble d'informations auxiliaires permettant de décrire les propriétés physiques des bassins (qu'elles soient de nature quantitative ou qualitative, comme l'appartenance à une HER), ont alors été mises en œuvre et confrontées en validation croisée. L'examen des performances d'estimation des modèles régressifs régionaux ajustés sur ces différents voisinages a rapidement permis de faire ressortir que la modalité faisant appel à la technique de classification par arbre de régression intégrant l'information sur le régime hydrologique mensuel (*CART2*) était la plus satisfaisante. Cette technique présente l'avantage d'être une approche automatique et objective, de ne pas contraindre les voisinages sur la base de la proximité géographique et de permettre la prise en compte explicite d'une information à caractère hydrologique dans la procédure de regroupement des bassins. Les résultats obtenus sur ce type de voisinage montrent un gain significatif par rapport au modèle régressif national sans toutefois atteindre les performances obtenues dans le cas de voisinages « idéalement connus » ni celles d'une estimation en sites peu jaugés (*i.e.* lorsqu'une information à caractère hydrologique est disponible au site cible, soit sous la forme de chronique courte soit sous la forme de données de jaugeages). Enfin, une comparaison entre l'approche retenue dans ces travaux et celle consistant à estimer le QMNA5 par l'intermédiaire d'une chronique de débit reconstituée au moyen d'un modèle hydrologique dont les paramètres ont été régionalisés s'est elle aussi révélée particulièrement instructive. Il a ainsi été démontré dans quelle mesure la difficulté à estimer convenablement les paramètres d'un modèle hydrologique, malgré de bonnes performances en calage, présente une forte influence sur la détermination des statistiques hydrologiques extraites des chroniques modélisées et ne peut que difficilement parvenir à des performances d'estimation équivalentes à celles obtenues dans le cas d'une régionalisation directe de la variable d'intérêt.

Pour revenir à nos propres résultats, une réserve importante tient au possible manque de robustesse de certains des modèles ajustés. Celui-ci se manifeste notamment par l'obtention d'intervalles de confiance relativement larges autour de certaines des estimations (principalement pour les bassins à régimes nivaux) mais aussi par des résultats parfois très instables en extrapolation. Ces observations nous ont amenés à modifier certains des modèles régressifs régionaux pour parvenir à des estimations plus réalistes. Suite à ces corrections, la procédure a été appliquée de manière à cartographier le QMNA5, exprimé sous la forme d'un débit spécifique, en tout point du réseau hydrographique reconstitué à l'échelle nationale (en se limitant toutefois aux points du réseau drainant une surface supérieure à 50 km²). La carte ainsi obtenue montre que les estimations fournies s'avèrent relativement cohérentes avec les grandes caractéristiques hydro-climatiques régionales. Dans le détail on note néanmoins l'existence de discontinuités entre les valeurs de QMNA5 estimées pour des points du réseau hydrographique pourtant voisins. Ces ruptures, qui s'avèrent inévitables en raison du mode de définition des voisinages adopté (*i.e.* partitionnement binaire de la procédure *CART*), constituent évidemment l'un des principaux défauts qui restera à résoudre, notamment pour répondre de manière plus appropriée aux attentes opérationnelles. Sur le plan scientifique, nous considérons que la solution se trouve déjà en partie dans les résultats proposés dans la mesure où les estimations sont accompagnées d'une incertitude qui, dans la mesure où elles se recouvrent au moins partiellement, permet d'assurer une certaine forme de continuité le long du

réseau hydrographique. La fiabilité des estimations dans certains secteurs (heureusement assez restreints) s'avère en revanche plus critiquable. En effet la largeur des intervalles de confiance à 95 % dans ces secteurs montre le peu de confiance que l'on doit accorder aux estimations qui y sont proposées. Encore une fois, et malgré les corrections apportées aux modèles pour gagner en stabilité en extrapolation, il s'agit vraisemblablement d'une des conséquences de la faible robustesse de certains des modèles régressifs régionaux, en particulier lorsque ceux-ci sont ajustés sur un trop faible effectif de station de référence. L'une des solutions sera alors de renforcer ces effectifs (*i.e.* consolidation de l'échantillon de référence) avec les estimations préalablement obtenues en sites peu jaugés, sous réserve de tenir compte de leurs incertitudes respectives. Cette ultime étape est traitée dans le chapitre suivant.

Références bibliographiques

- Adamowski K., Bocci C. (2001). Geostatistical regional trend detection in river flow data. *Hydrological Processes*, Vol. 15(18), pp. 3331-3341.
- Andrews D.F. (1972). Plots of high dimensional data. *Biometrics*, Vol. 28(1), pp. 125-136.
- Aschwanden H., Kan C. (1999). Le débit d'étiage Q347 – Etat de la question. Service hydrologique et géologique national, *Communications hydrologique* No. 27, pp. 132.
- Blum M. (2003). La détermination de régions hydrologiques homogènes par l'analyse de corrélation canonique. Cemagref. Rapport de stage, 90 pp.
- Breiman L., Friedman J.H., Olshen R., Stone C.J. (1984). (Eds) *Classification and Regression Trees*. Wadsworth International Group, Belmont, California.
- Burn D.H. (1990). Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. *Water Resources Research*, Vol. 26(10), pp. 2257-2265.
- Carter R.F., Hopkins E.H., Perlman H.A. (1988). Low-flow profiles of the Tennessee river tributaries in Georgia. *USGS Water Resources Investigations*, Report 88-4049, 69 pp.
- Castiglioni S., Castellarin A., Montanari A., Skøien J.O., Laaha G., Blöschl G. (2011). Smooth regional estimation of low-flow indices: physiographical space based interpolation and top-kriging. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15(3), pp. 715-727.
- Chokmani K., Ouarda. T.B.M.J. (2004). Physiographical space-based kriging for regional flood frequency estimation at ungauged sites. *Water Resources Research*, Vol. 40(12), No. W12514.
- Clausen B., Pearson C.P. (1995). Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought. *Journal of Hydrology*, Vol. 173(1-4), pp. 111-130.
- Daviau J.-L., Adamowski K., and Patry G. (2000). Regional flood frequency analysis using GIS, L-moment and geostatistical methods. *Hydrological Processes*, Vol. 14(15), pp. 2731-2753
- Demuth S. (1993). *Untersuchungen zum Niedrigwasser in West-Europa*. Freiburger Schriften zur Hydrologie. Bd. 1, Freiburg, Germany.
- Downer R.N. (1981). Low-flow studies for Vermont - a prognosis for success. *Hydro Power and Its Transmission in the Lake Champlain Basin*. Proceedings of the Eighth Annual Lake Champlain Basin Environmental Conference, pp. 43-51.
- Eaton B., Church M., Ham D. (2002). Scaling and regionalization of flood flows in British Columbia, Canada. *Hydrological Processes*, Vol. 16(16), pp. 3245-3263.
- Engeland K., Hisdal H. (2009). A comparison of low flow estimates in ungauged catchments using regional regression and the HBV-model. *Water Resources Management*, Vol. 23(12), pp. 2567-2586.
- Folton N., Coulier P. (2011). *Cartographie des débits de référence d'étiage sur le territoire national français*. Rapport d'étude, Irstea, 42 pp.

- Gambolati G., Volpi G.A. (1979). Conceptual Deterministic Analysis of the Kriging Technique in Hydrology. *Water Resources research*, Vol. 15(3), pp. 625-629.
- Gordon N.D., McMahon T.A., Finlayson B.L. (1992). *Stream Hydrology (An Introduction for Ecologists)*. Wiley, New York, 526 pp.
- Ghosh B. (1951). Random distances within a rectangle and between two rectangles. *Bulletin of Calcutta Mathematical Society*, Vol. 43(1), pp. 17-24.
- Gottschalk L. (1993a). Interpolation of runoff applying objective methods. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 7(4), pp. 269-281.
- Gottschalk L. (1993b). Correlation and covariance of runoff. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 7(2), pp. 85-101.
- Gottschalk L., Krasovskaia I., Leblois E., Sauquet E. (2006). Mapping mean and variance of runoff in a river basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 10(4), pp. 469-484.
- Gustard A., Bullock A., Dixon J.M. (1992). Low flow estimation in the United Kingdom. Institute of Hydrology, Report No. 108, 88 pp., append.
- Haan C.T. (1977). *Statistical Methods in Hydrology*. Iowa State University Press, Ames, IA.
- Haberlandt U., Klocking B., Krysanova V., Becker, A. (2001). Regionalisation of the base flow index from dynamically simulated flow components – a case study in the Elbe River Basin. *Journal of Hydrology*, Vol. 248(1-4), pp. 35-53.
- Haché M., Ouarda T.B.M.J., Bruneau P., Bobée B. (2002). Estimation régionale par la méthode de l'analyse canonique des corrélations : comparaison des types de variables hydrologiques. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 29(6), pp. 899-910.
- Hardison C.H. (1971). Prediction error of regression estimates of streamflow characteristics at ungauged sites. USGS Professional Paper C750, pp. C228-C236.
- Hayes D.C (1991). Low flow characteristics of streams in Virginia. USGS water supply, Paper 2374.
- Hundecha Y., Ouarda T.B.M.J., Bardossy A. (2008). Regional estimation of parameters of a rainfall-runoff model at ungauged watersheds using the "spatial" structures of the parameters within a canonical physiographic-climatic space. *Water Resources Research*, Vol. 44 (1), No. W01427.
- Isaaks E.H., Srivastava R.M. (1989). *Applied Geostatistics*. Oxford Univ. Press, New York.
- Kohonen T. (1982). Self-organize formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics*, Vol. 43(1), pp. 59-69.
- Kohonen T. (2001). *Self-Organizing Maps*, 3rd Edn., Information Sciences, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 501 pp.
- Kroll C.N., Stedinger J.R. (1998). Regional hydrologic analysis : ordinary and generalized least squares revisited. *Water Resources Research*, Vol. 34(1), pp. 121-128.

- Laaha G., Blöschl G. (2006a). A comparison of low flow regionalisation methods - catchment grouping. *Journal of Hydrology*, Vol. 323(1-4), pp. 193-214.
- Laaha G., Blöschl G. (2006b). Seasonality indices for regionalizing low flows. *Hydrological Processes*, Vol. 20(18), pp. 3851-3878.
- Laaha G., Blöschl G. (2007). A national low flow estimation procedure for Austria. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 52(4), pp. 625-644.
- Ley R., Casper M.C., Hellebrand H., Merz R. (2010). Catchment classification by runoff behaviour with self-organizing maps (SOM). *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15(9), pp. 2947-2962.
- Longobardi A., Villani P. (2008). Baseflow index regionalization analysis in a Mediterranean area and data scarcity context: Role of the catchment permeability index. *Journal of Hydrology*, Vol. 355(1-4), pp. 63-75.
- Mahalanobis P.C. (1936). On the generalised distance in statistics. *Proceedings of the National Institute of Sciences of India*, Vol. 2(1), pp. 49-55.
- Merz R., Blöschl G. (2004). Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, Vol. 287(1-4), pp. 95-123.
- Merz R., Blöschl G. (2005). Flood frequency regionalisation - spatial proximity vs. catchment attributes. *Journal of Hydrology*, Vol. 302(1-4), pp. 283-306.
- Moss M.E., Tasker G.D. (1991). An intercomparison of hydrological network-design technologies. *Journal of Hydrological Sciences*, Vol. 36(3), pp. 209-221.
- Nathan R.J., McMahon T.A. (1990a). Identification of homogeneous regions for the purpose of regionalization. *Journal of Hydrology*, Vol. 121(1-4), pp. 217-238.
- Nathan R.J., McMahon T.A. (1992). Estimating low flow characteristics at ungauged catchments. *Water Resources Management*, Vol. 6(2), pp. 85-100.
- Olden J.D., Kennard M.J., Pusey B.J. (2011). A framework for hydrologic classification with a review of methodologies and applications in ecohydrology. *Ecohydrology*, Vol.5(4), pp. 503-518.
- Riggs H.C. (1972). *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey - Chapter B1 : Low-flow estimation*. USGS publication.
- Sauquet E., Gottschalk L., Leblois E. (2000). Mapping average annual runoff: a hierarchical approach applying a stochastic interpolation scheme. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 45(6), pp. 799-815.
- Sauquet E. (2006). Mapping mean annual river discharges: geostatistical developments for incorporating river network dependencies. *Journal of Hydrology*, Vol. 331(1-2), pp. 300-314.
- Schreiber P., Demuth S. (1997). Regionalisation of low flows in southwest Germany. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 42 (6), pp. 845-858.
- Sivapalan M., Takeuchi K., Franks S.W., Gupta V.K., Karambi H., Lakshmi V., Liang X., McDonnell J.J., Mendiondo E.M., O'Connell P.E., Oki T., Pomeroy J.W., Schertzer D., Uhlenbrook S., Zehe E.

- (2003). IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 48(6), pp. 857-880.
- Skøien J. O., Blöschl G., Western A.W. (2003). Characteristic space scales and timescales in hydrology. *Water Resources Research*, Vol. 39(10), pp. 1304.
- Skøien J.O., Merz R., Blöschl G. (2006). Top-kriging - geostatistics on stream networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 10(2), pp. 277-287.
- Skop E., Loaiciga H.A. (1998). Investigating catchment hydrology and low flow characteristics using GIS. *Nordic Hydrology*, Vol. 29(2), pp. 105-128.
- Smakhtin V.Y. (2001). Low flow hydrology : a review. *Journal of hydrology*, Vol. 240 (3-4), pp. 147-186.
- Stedinger J.R., Thomas W.O. (1985). Low-flow frequency estimation using base-flow measurements. *USGS Scientific Investigations, Report 85-95*.
- Stuckey M.H. (2006). Low-flow, base-flow, and mean-flow regression equations for Pennsylvania streams. *USGS Scientific Investigations, Report 2006-5130*, 84 pp.
- Tallaksen L.M. (1989). Analysis of time variability in recessions. *FRIENDS in Hydrology, IAHS Publication No. 187*, pp. 85-96.
- Tasker G.D. (1980). Hydrologic regression with weighted least squares. *Water Resources Research*, Vol. 16(6), pp. 1107-1113.
- Therneau T.M., Atkinson B. (2010). rpart: Recursive Partitioning, R package. <http://cran.r-project.org/web/packages/rpart/>
- Thomas D.M., Benson M.A. (1970). Generalization of Streamflow characteristics from drainage-basin characteristics. *USGS Water Supply, Paper 1975*.
- Vandewiele G.L., Elias A. (1995). Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalisation. *Journal of Hydrology*, Vol. 170(1-4), pp. 277-291.
- Vogel R.M., Kroll C.N. (1992). Regional geohydrologic–geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics. *Water Resources Research*, Vol. 28(9), pp. 2451-2458.
- Wasson J.G., Chandesris A., Pella H., Souchon Y. (2001). Définition des hydroécorégions françaises. Méthodologie de détermination des conditions de référence au sens de la Directive Cadre pour la gestion des eaux. *Rapport d'étude, Irstea*, 190 pp.
- Wold S., Ruhe A., Wold H., Dunn W.J. (1984). The collinearity problem in linear regression – The partial least squares (PLS) approach to generalized inverses. *Journal on Scientific and Statistical Computing*, Vol. 5(3), pp. 735-743.
- Yevjevich V. (1972). *Probability and Statistics in Hydrology*. Water Resources Publications, Fort Collins, CO, USA, 302 pp.

Chapitre VI.

Estimation en sites non jaugés consolidée

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que l'estimation du QMNA5 spécifique en sites non jaugés au moyen de modèles régressifs régionaux pouvait parfois présenter des insuffisances sur le plan de la fiabilité des valeurs estimées. Ce manque de robustesse, qui se manifeste par des intervalles de confiance particulièrement larges, tient vraisemblablement au faible effectif de stations de référence employées pour ajuster certaines des relations régionales mais aussi à l'extrapolation des modèles à des jeux de variables explicatives hors de la gamme de valeurs employées pour l'ajustement. L'exploitation des estimations préalablement obtenues en sites peu jaugés peut alors constituer une bonne solution pour venir consolider l'échantillon de référence, sous réserve de prendre en compte le degré d'incertitude associé aux observations que l'on souhaite ajouter.

VI.1 Eléments de méthodologie

VI.1.1 Etat de l'art des méthodes permettant l'introduction de données incertaines dans les procédures d'estimation en sites non jaugés

La démarche que nous avons choisie d'adopter dans cette application s'inspire de quelques-uns des rares travaux où il est fait mention de la prise en compte de données incertaines dans une procédure d'estimation de variable hydrologique en sites non jaugés. Dans ces travaux, l'idée originelle était de considérer la durée de chronique disponible comme étant à l'origine de différences dans la fiabilité (*i.e.* évolution de la variance) des statistiques hydrologiques calculées aux sites instrumentés et de tenir compte de ces disparités dans la procédure d'estimation en attribuant aux différentes observations un poids d'autant plus fort que la durée de chronique disponible est importante. Les travaux les plus anciens sur le sujet sont probablement ceux de Tasker (1980) et Stedinger et Tasker (1985) où la durée de

chronique disponible est prise en compte dans l'ajustement de modèles régressifs au travers de l'utilisation d'un critère des moindres carrés pondérés (WLS pour « Weighted Least Squares ») en optimisant :

$$SCR = \sum_{i=1}^n w_i \cdot (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \text{avec} \quad w_i = \frac{1}{\sigma_{y_i}^2} = \frac{1}{c_0 + c_1(1/D_i)} \quad (VI.1)$$

où y_i est la valeur observée, \hat{y}_i est la valeur estimée, w_i est le poids attribué aux $i = 1, \dots, n$ observations, $\sigma_{y_i}^2$ est la variance associée à chaque valeur observée, c_0 et c_1 sont des constantes liées au contexte de l'étude et D_i est la durée de chronique disponible. $c_0 + c_1(1/D_i)$ correspond ici à l'expression de la variance retenue par Stedinger et Tasker (1985), celle-ci étant directement proportionnelle à l'inverse de la durée de chronique disponible. Ces auteurs démontrent alors, au travers d'une série d'expérimentations pour l'estimation de quantiles de débits maximaux annuels à l'aide d'un modèle explicatif simple (*i.e.* ne reposant que sur la surface drainée), l'intérêt à ajouter des observations incertaines issues de chroniques courtes et, dans ce cas, le gain apporté par l'emploi de la procédure WLS par rapport à un ajustement reposant sur le critère des moindres carrés ordinaire.

Une démarche analogue est adoptée par Merz et Blöschl (2005) pour une application dédiée à la régionalisation des paramètres d'une distribution des quantiles de débits maximaux annuels mais en introduisant cette fois l'incertitude associée à chaque observation dans un système de krigeage (méthode dénommée KUD pour « Kriging with Uncertain Data », Meylan (1986)). L'incertitude correspond alors à la variance de détermination des trois premiers moments de la distribution des débits maximaux annuels vue comme une fonction simple de la durée de chronique disponible en chaque site. Encore une fois les résultats de cette étude montrent que la procédure KUD surpasse un krigeage ordinaire mais aussi les approches d'estimation par régression multiple.

Enfin les travaux menés par Chopart et Sauquet (2008) reprennent l'approche KUD pour introduire cette fois une information liée à la valorisation des données de jaugeage dans une procédure d'estimation du QMNA5 sur le secteur Seine-Normandie. L'incertitude associée aux valeurs de QMNA5 estimées à l'aide des données de jaugeage, synthétisées au travers de modèles simples visant à quantifier l'erreur d'estimation en fonction de la distance entre centre de gravité des bassins versants, vient alors se substituer à l'incertitude liée à la longueur de chronique disponible. Les résultats obtenus montrent l'intérêt de la procédure en permettant un gain sensible par rapport à un krigeage classique (*i.e.* sans introduction de données incertaines) et une approche d'estimation par régression multiple.

VI.1.2 Application à l'estimation du QMNA5

Compte tenu des éléments méthodologiques exposés précédemment et dans la mesure où la méthode d'estimation du QMNA5 retenue dans cette application correspond à une approche par régression multiple, l'introduction de nouvelles données incertaines (*i.e.* la consolidation du jeu de stations de référence) sera naturellement réalisée ici au moyen d'une procédure d'ajustement par moindres carrés pondérés.

Les données incertaines en question se limiteront aux estimations fournies pour le jeu de 1224 chroniques courtes à l'aide de la méthode de réajustement climatique (*cf.* chapitre III), permettant déjà, comme on le verra, d'augmenter sensiblement le nombre de points employés pour l'ajustement des modèles régressifs régionaux. L'ajout d'estimations issues de la valorisation de données de jaugeages, bien que susceptible d'apporter un surplus d'information non négligeable, n'a pas été envisagé ici dans la mesure où les jeux de données à notre disposition ne couvrent pas l'ensemble du territoire français (*i.e.* données seulement disponibles sur les secteurs Seine-Normandie et Rhône-Alpes) et nécessiterait par ailleurs une critique approfondie (et laborieuse en l'absence d'information sur les conditions de réalisation des jaugeages) pour écarter les données douteuses ou relatives à des cours d'eau influencés.

Afin de déterminer s'il existe un gain à procéder au réajustement climatique avant l'introduction des données incertaines dans la procédure d'estimation, il sera également envisagé de travailler avec les valeurs de QMNA5 empiriques extraites directement de la période de chronique disponible (*i.e.* valeurs non réajustées).

En terme de méthodologie, il n'a pas été jugé nécessaire de réexaminer l'ensemble des modalités de regroupement de bassin et seule la procédure *CART2* sera donc considérée ici. Ainsi la première étape était d'assigner chaque nouvelle observation à l'une des 20 régions définies au moyen de la procédure *CART2*. La Figure VI-1 illustre les effectifs de stations participant à l'ajustement des modèles régressifs régionaux dans chaque groupe de bassins avant et après consolidation. Si l'on constate bien une augmentation significative et relativement équilibrée des effectifs dans la plupart de ces groupes, certains d'entre eux restent inchangés (*e.g.* régions D et Q). La procédure de consolidation n'aura donc pas d'influence sur les sites appartenant à ces régions.

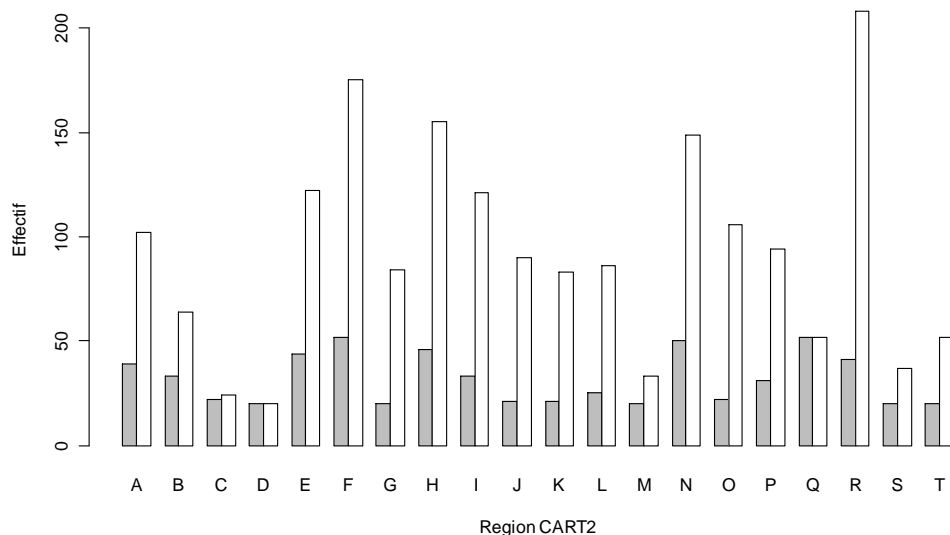


Figure VI-1 : Dénombrement des stations pour chaque région de la classification *CART2* avant (en gris) et après (en blanc) consolidation

Dans les autres cas, il est possible d'envisager plusieurs déclinaisons dont celles visant à déterminer à quel stade de construction des modèles régressifs régionaux interviennent les données incertaines (Figure VI-2). Une première solution consiste ainsi à conserver les modèles initialement sélectionnés avant consolidation et réajuster ceux-ci en introduisant les nouvelles données (*i.e.* on conserve les variables explicatives et seuls les coefficients de la régression changent). Il s'agira alors de vérifier si ces modèles restent aussi performants avec l'ajout de données complémentaires (revenant en quelque sorte à réaliser une validation plus large que la validation croisée). Dans le cas contraire, il sera envisagé d'introduire les données incertaines dès le début de la procédure de sélection des modèles régressifs régionaux en suivant l'intégralité du protocole décrit en section V.1.3. Il est ainsi attendu que l'ajustement de nouvelles relations explicatives, à partir d'un maximum d'information, soit susceptible de permettre l'identification de modèles plus robustes.

Dans les deux cas, les performances seront là aussi quantifiées lors de la dernière étape de validation croisée en ne considérant naturellement que les résultats obtenus pour les sites appartenant à l'échantillon de référence. A ce sujet et pour adopter une démarche aussi rigoureuse que possible, les estimations en sites peu jaugés issues du réajustement climatique se devaient de tenir compte de l'exclusion successive des sites de référence en validation croisée. Autrement dit, il était préalablement nécessaire de fournir une estimation du QMNA5 par réajustement climatique (et l'intervalle de confiance associé) pour l'ensemble des chroniques courtes disponibles en excluant là aussi chacune des stations de l'échantillon de référence.

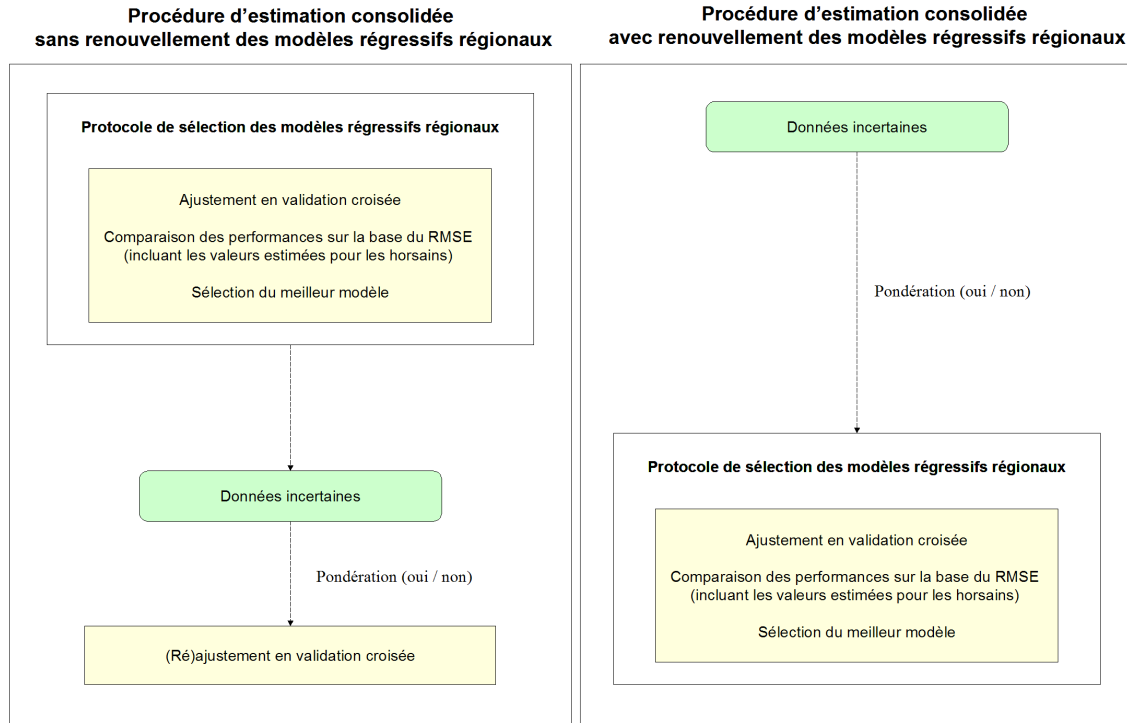


Figure VI-2 : Modalités d'introduction des données incertaines dans le protocole de sélection des modèles régressifs régionaux

Enfin se pose la question du poids à attribuer aux différentes observations lors de l'ajustement des modèles régressifs régionaux. A titre de référence, il sera tout d'abord donné un poids w_i identique à l'ensemble des valeurs de QMNA5 ($w_i = 1$), qu'elles soient issues des chroniques longues de l'échantillon de référence ou des chroniques courtes avec ou sans réajustement (ce qui revient à employer le critère des moindres carrés ordinaire). Ensuite deux possibilités s'offrent à nous en (i) associant à chaque observation un poids w_i relatif à la durée de chronique disponible à l'image des travaux de Tasker (1980) ou en (ii) attribuant un poids w_i à chaque observation en fonction de l'incertitude affectant les différentes valeurs de QMNA5 employées pour l'ajustement des modèles à l'image des travaux de Chopart et Sauquet (2008).

Le premier cas sera appliqué lorsque les données complémentaires prennent la forme de QMNA5 empiriques non réajustés. La difficulté tient alors à l'identification de la forme de la fonction de pondération ou, autrement dit, à la définition de la variance de détermination du quantile empirique en fonction de la taille de l'échantillon de QMNA disponible (*i.e.* de la durée de chronique disponible). L'hypothèse la plus simple consistant à considérer que cette variance évolue linéairement selon l'inverse de la taille de l'échantillon sera adoptée ici. Ainsi, dans la fonction d'optimisation des moindres carrés pondérés où w_i s'exprime comme l'inverse de la variance, les poids attribués aux différentes observations correspondront simplement à la longueur de chronique disponible (y compris pour les valeurs de QMNA5 des sites de référence dotés d'une chronique longue).

Le second type de pondération sera appliqué dans le cas des valeurs de QMNA5 réajustées. Pour ce faire la pondération correspondra à l'inverse de la variance d'estimation obtenue à l'issue de la procédure de réajustement climatique. Pour les QMNA5 des sites de référence dotés d'une chronique longue où l'on ne dispose pas d'une telle information, la variance sera alors considérée comme nulle. Compte tenu de ce dernier point, il était nécessaire d'apporter une modification à la formulation de w_i de manière à borner celui-ci. Notre choix s'est arbitrairement orienté vers une solution permettant d'obtenir un poids w_i variant strictement entre 0 et 1 :

$$w_i = \frac{1}{1 + \sigma_i^2} \quad (VI.2)$$

avec σ_i^2 la variance associée à l'observation i (le poids attribué est alors maximal lorsque $\sigma_i^2 = 0$). Il est intéressant de noter que, dans la mesure où il a été démontré que la variance des estimations par réajustement climatique dépendait peu de la durée de chronique disponible pour le jeu de 1224 chroniques courtes (*cf.* section III.3), les deux modes de pondération évoqués n'apportent pas tout à fait la même information (Figure VI-3, on note seulement une légère corrélation). Le contraste entre les différentes valeurs de w_i , c'est-à-dire le poids relatif donné aux différentes observations (Figure VI-4) apparaît par ailleurs comme beaucoup plus pénalisant lorsque la pondération repose sur la durée des chroniques (ici le poids relatif s'exprime en fonction de la durée de chronique disponible la plus longue (36 années) et ne peut donc dépasser 0.7 pour une chronique de 25 années ; au delà, la gamme de pondération comprise entre 0.7 et 1 est associée aux QMNA5 des sites de référence dotés d'une chronique longue).

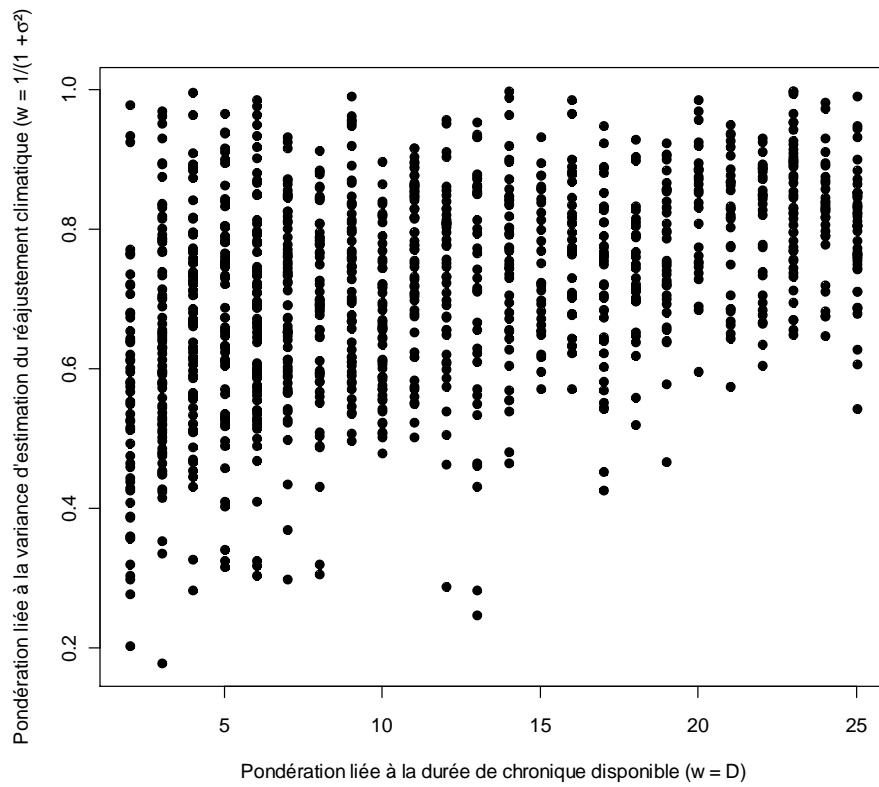


Figure VI-3 : Comparaison des poids attribués aux données incertaines en fonction du mode de pondération retenu

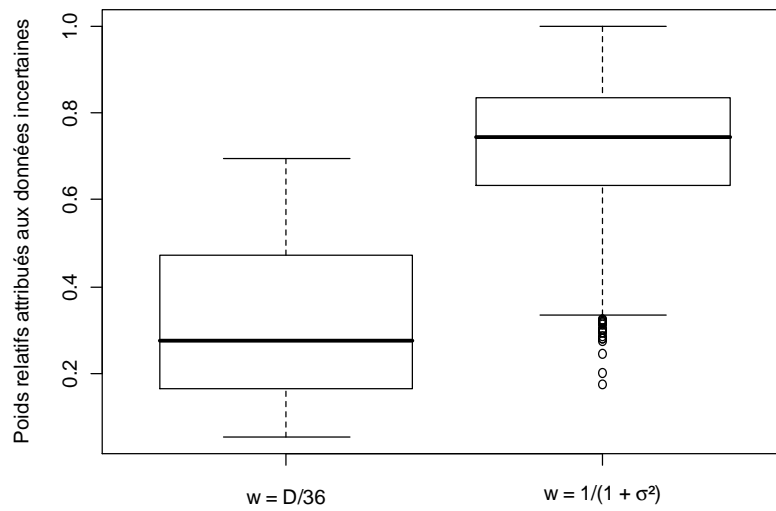


Figure VI-4 : Poids relatifs attribués aux données incertaines selon le mode de pondération retenu (pour la pondération sur la base de la durée des chroniques, le poids relatif s'exprime en fonction de la durée de chronique la plus longue, i.e. 36 années)

VI.2 Résultats de la validation croisée

Nous nous proposons d'examiner ici les résultats de la procédure d'estimation en sites non jaugés consolidée au travers des performances obtenues en validation croisée (sur le jeu de 632 sites de référence) pour l'ensemble des modalités d'application décrites précédemment et résumées dans le Tableau VI-1. Ces performances seront bien entendu comparées à celles de l'estimation non consolidée (modalité *CART2*, cf. chapitre V), prise comme résultat de référence, afin de déterminer le gain apporté par l'introduction de données incertaines.

Nature des données incertaines	Renouvellement des modèles régressifs régionaux	Modalité de pondération
QMNA5 empirique (non réajusté)	Non	Aucune ($w_i = 1$)
		$w_i = D_i$
	Oui	Aucune ($w_i = 1$)
		$w_i = D_i$
QMNA5 réajusté	Non	Aucune ($w_i = 1$)
		$w_i = \frac{1}{1 + \sigma_i^2}$
	Oui	Aucune ($w_i = 1$)
		$w_i = \frac{1}{1 + \sigma_i^2}$

Tableau VI-1 : Récapitulatif des modalités de consolidation des estimations en sites non jaugés

VI.2.1 Résultats de la consolidation sans renouvellement des modèles régressifs régionaux

La Figure VI-5 illustre les performances des différentes modalités de consolidation lorsque les modèles régressifs régionaux initialement sélectionnés avant introduction des données incertaines sont conservés (rappel : on conserve les variables explicatives et seuls les coefficients de la régression changent).

On constate ici que les résultats s'avèrent relativement décevants avec une dégradation assez nette des performances d'estimation que ce soit en termes d'écarts aux observations ou de largeur des intervalles de confiance à 95 %. On note malgré tout que la pondération tenant compte de l'incertitude associée aux données complémentaires (ou de la durée de chronique disponible) permet de limiter cette dégradation ; autrement dit l'introduction d'une pondération semble bien permettre de dissocier la variabilité intrinsèque à l'observation (son incertitude) de celle que l'on souhaite effectivement expliquer sur la base des variations régionales de climat, relief, géologie...

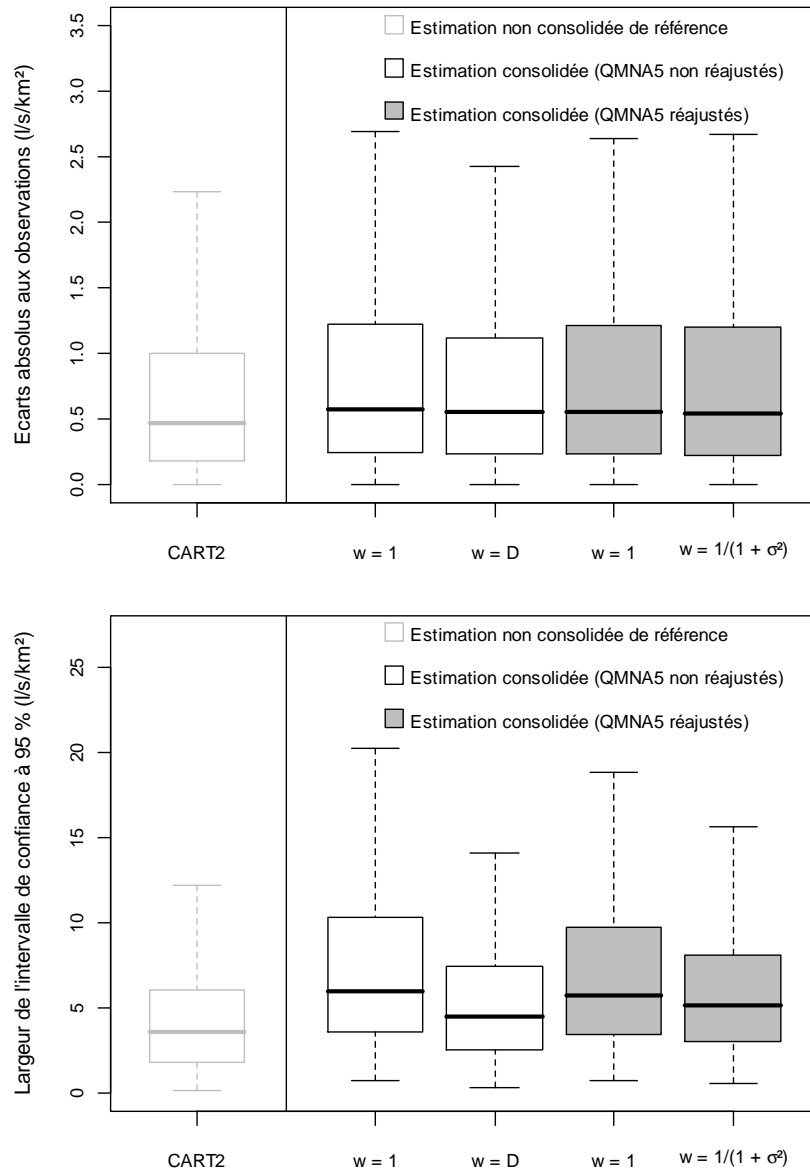


Figure VI-5 : Comparaison des performances d'estimation du QMNA5 selon les modalités de consolidation de la procédure d'estimation (sans renouvellement des modèles régressifs régionaux)

Si l'intérêt de la pondération se trouve confirmé, la consolidation des effectifs régionaux ne suffit pas ici à accroître la robustesse des estimations mais introduit plutôt une part de variabilité supplémentaire que les modèles ne parviennent pas à expliquer en l'état. Autrement dit, il semble que le gain de robustesse attendu avec l'augmentation des effectifs est neutralisé par une plus forte dispersion des observations. Il semble alors légitime de remettre en question ces modèles pour permettre, avec l'ajout de données complémentaires, l'identification de nouvelles relations permettant d'optimiser l'explication de la variabilité régionale du QMNA5 à partir d'un maximum d'information et ainsi espérer gagner en robustesse.

VI.2.2 Résultats de la consolidation avec renouvellement des modèles régressifs régionaux

Les résultats obtenus suite à la procédure d'estimation consolidée avec renouvellement des modèles régressifs régionaux (Figure VI-6) montrent que les performances s'avèrent meilleures que précédemment avec des écarts aux QMNA5 observés pratiquement équivalents (ou légèrement supérieurs) à ceux obtenus avant consolidation mais surtout avec un gain vis-à-vis des largeurs des intervalles de confiance lorsque la procédure tient compte de la pondération associée aux données incertaines (dans le cas contraire, les performances restent médiocres ce qui réaffirme l'importance de la pondération pour limiter l'importance conférée aux observations les plus incertaines). Ce gain tend à confirmer l'intérêt de l'introduction de données incertaines pour l'identification de modèles régressifs régionaux plus robustes. L'amélioration des résultats, limitée à la partie haute de la distribution des largeurs des intervalles de confiance (et compensée par un légère dégradation dans la partie basse), reste cependant moins concluante qu'attendu.

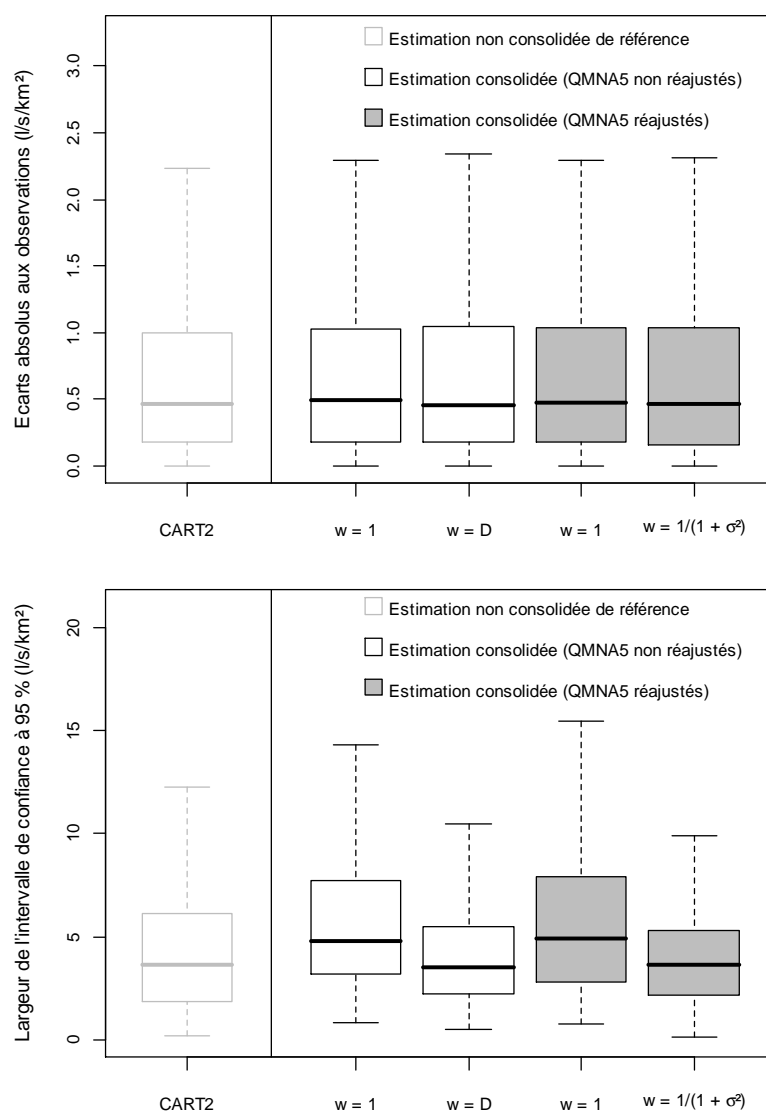


Figure VI-6 : Comparaison des performances d'estimation du QMNA5 selon les modalités de consolidation de la procédure d'estimation (avec renouvellement des modèles régressifs régionaux)

Il est par ailleurs intéressant de noter que le choix de la nature des données introduites pour consolider les effectifs régionaux, que ce soit à l'aide des QMNA5 empiriques directement extraits des chroniques courtes ou des QMNA5 estimés par réajustement climatique, s'avère pratiquement indifférent. L'analyse comparative des modèles ajustés à partir de ces deux types de données montre par ailleurs que, pour une même région, les modèles partagent souvent au moins une à deux variables explicatives en commun et sont même parfois identiques (pour 5 des 20 modèles) ce qui témoigne d'une certaine convergence dans l'explication de la variabilité régionale des QMNA5. Ce résultat n'est pas réellement surprenant dans la mesure où, comme démontré en section III.2.3, le réajustement climatique sur les chroniques les plus longues (chroniques d'une durée supérieure à 16 années qui ont ici le plus de poids) n'a pratiquement aucun effet vis-à-vis de la détermination du QMNA5 en sites peu jaugés. Lorsque l'on examine le détail des performances par classes de régime d'étiage et que l'on compare ces résultats à ceux obtenus avant consolidation (Figure VI-7), on constate que le gain de fiabilité, vu au travers de la réduction de la largeur des intervalles de confiance, est principalement sensible pour la seconde classe de bassins (bassins à régime intermédiaire) mais aussi, plus secondairement, pour la première classe (bassins à forte inertie) tandis que l'on note une dégradation pour les bassins de la troisième classe (bassins présentant les étiages les plus sévères) ou de la quatrième classe (bassins à régime nival) qui présentent toujours les incertitudes les plus fortes et tirent encore une fois les distributions d'erreur vers le haut. Pour cette classe, la dégradation est d'ailleurs nettement plus marquée lorsque les données incertaines n'ont pas fait l'objet d'un réajustement.

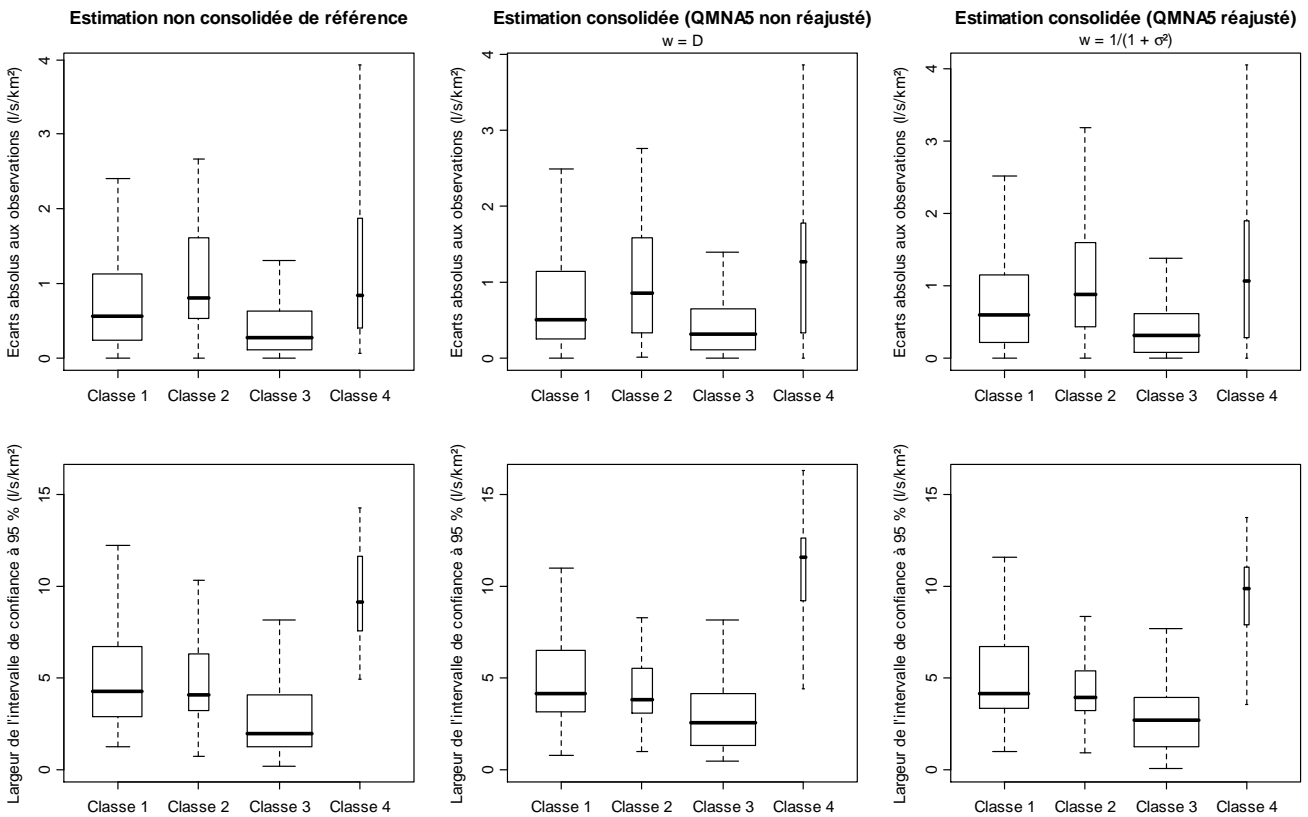


Figure VI-7 : Détail des performances d'estimation du QMNA5 par classes de régime d'étiage avant et après consolidation (la largeur des boxplots est proportionnelle au nombre de sites appartenant à chaque classe)

Cette dernière observation nous amène finalement à considérer la consolidation à partir des QMNA5 réajustés avec une pondération tenant compte de la variance d'estimation comme la solution la plus avantageuse. La vérification de la stabilité des nouveaux modèles ajustés en extrapolation sur le réseau hydrographique sera alors un élément décisif pour confirmer l'intérêt de la démarche mise en œuvre dans cette application.

VI.3 Cartographie finale du QMNA5 spécifique en sites non jaugés

La meilleure stratégie visant l'introduction de données incertaines dans la procédure d'estimation en sites non jaugés ayant été identifiée précédemment au travers de la validation croisée, celle-ci a été appliquée de manière à réactualiser la cartographie du QMNA5 spécifique en tout point du réseau hydrographique théorique drainant une surface supérieure à 50 km² (Figure VI-8). Celle-ci est à nouveau accompagnée de la cartographie de la largeur des intervalles de confiance associés à chaque estimation fournie (Figure VI-9).

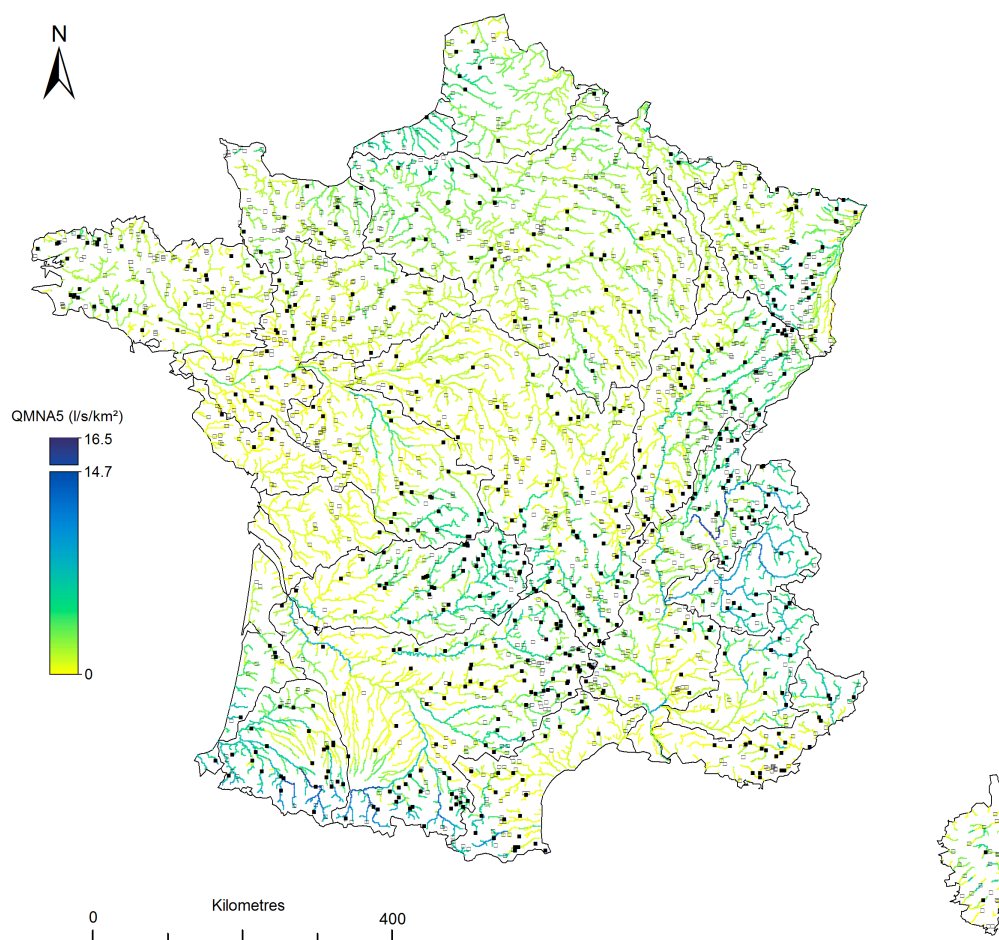


Figure VI-8 : Cartographie du QMNA5 spécifique (l/s/km²) estimé par régression multiple avec introduction de données incertaines sur l'ensemble des points du réseau hydrographique théorique drainant une surface supérieure à 50 km² (la partie supérieure de l'échelle de couleur représente les valeurs hors de la gamme de QMNA5 observée dans l'échantillon de référence)

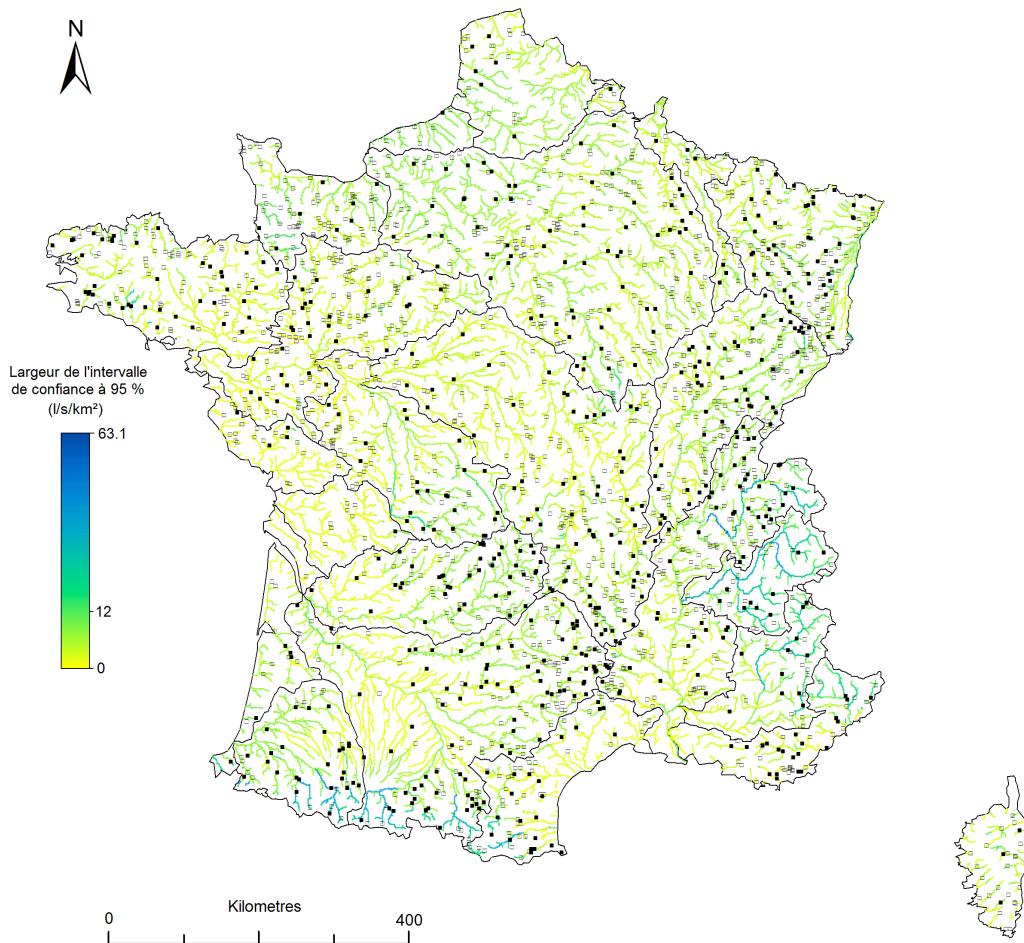


Figure VI-9 : Cartographie de la largeur des intervalles de confiance à 95 % ($l/s/km^2$) associée aux valeurs de $QMNA5$ spécifique estimées par régression multiple avec introduction de données incertaines sur l'ensemble des points du réseau hydrographique théorique drainant une surface supérieure à $50 km^2$

Comme attendu, l'application de la nouvelle procédure d'estimation a cette fois permis de parvenir à des résultats stables en extrapolation sans nécessiter de modification des modèles régressifs régionaux sélectionnés et confirmant ainsi l'intérêt à s'appuyer sur le plus de données possible pour accroître la robustesse des relations ajustées.

Afin de mieux discerner les modifications apportées par rapport à la précédente version (cf. Figure V-22, section V.3), la Figure VI-10 illustre les différences entre valeurs estimées avant et après consolidation. On note ainsi en premier lieu que les valeurs les plus fortes, généralement fournies pour les bassins à régime nival, s'avèrent probablement plus raisonnables (elles ne dépassent plus ici $16.5 l/s/km^2$ au lieu de $23.1 l/s/km^2$ précédemment). Ainsi les estimations obtenues pour le bassin de l'Isère semblent par exemple plus réalistes (autour de $10 l/s/km^2$). Une nette diminution des valeurs estimées est également perceptible sur les bassins du Loir, du Cher et de l'Indre où le $QMNA5$ apparaissait probablement surestimé par rapport au contexte régional (en revanche on ne constate pas de différences sur la partie aval de la Creuse et de la Vienne). A l'opposé, les estimations fournies pour la partie aval de la Durance, qui paraissaient auparavant nettement sous-estimées, se révèlent elles-aussi plus convenables

(de l'ordre de 1.3 l/s/km²). Enfin, on remarque une nette augmentation des QMNA5 estimés dans les bassins de la Seine, de la Saône et sur certains grands cours d'eau du Bassin Aquitain.

Une autre différence remarquable est probablement le « rendu » plus uniforme de la carte représentant les valeurs de QMNA5 estimées comme cela apparaît nettement dans le Bassin Parisien. Ainsi, s'il existe toujours des discontinuités le long du réseau hydrographique, celles-ci se révèlent souvent beaucoup moins brutales. Néanmoins le problème persiste encore et de manière parfois criante comme sur le cours principal de la Creuse, de la Vienne, de la Loire ou encore de la Garonne et du Lot.

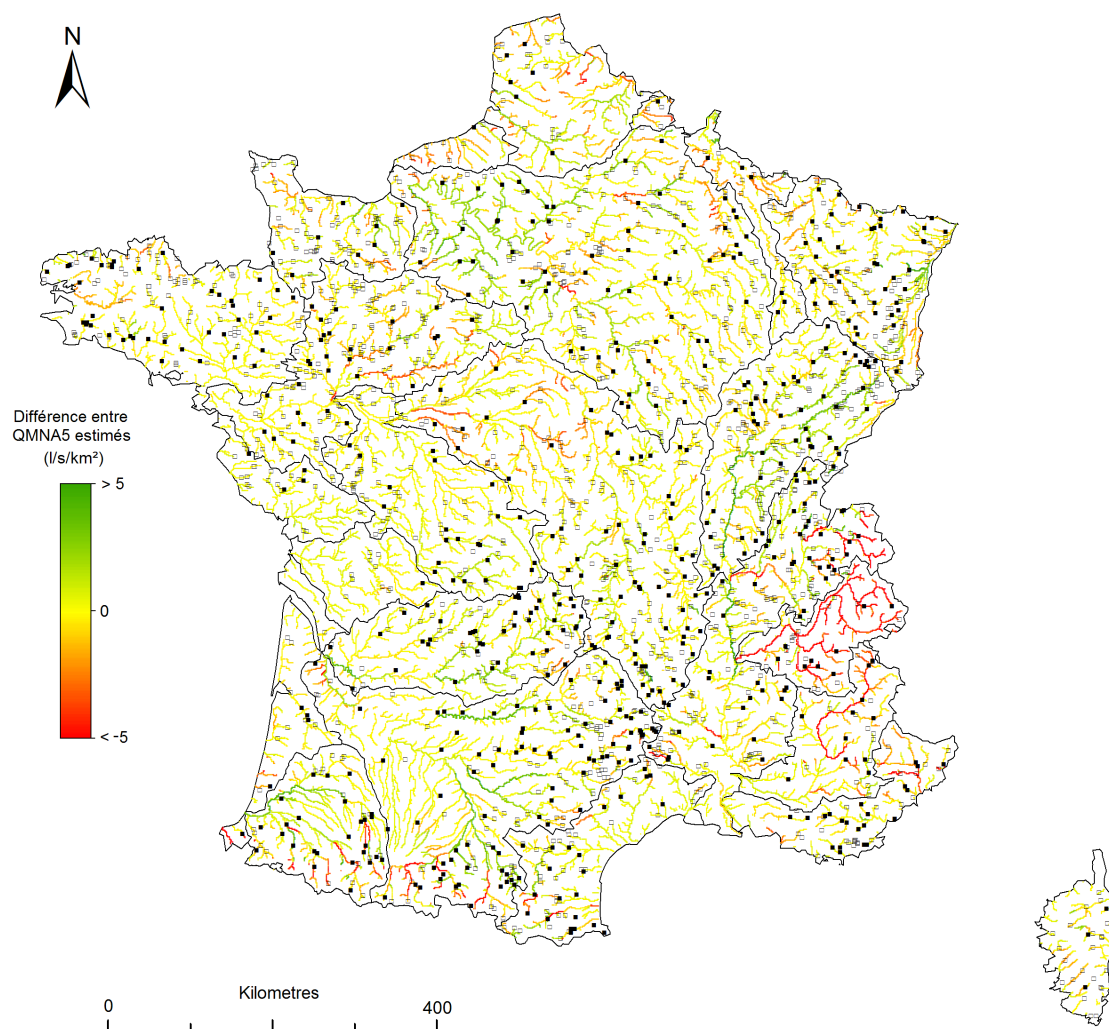


Figure VI-10 : Cartographie de la différence entre QMNA5 estimés avant et après consolidation (négatif lorsque $QMNA5_{consolidé} < QMNA5_{initial}$ et inversement)

Enfin, lorsque l'on examine la largeur des intervalles de confiance à 95 % associés aux estimations, les résultats semblent là aussi plus convenables avec des valeurs plus équilibrées relativement aux valeurs estimées. On note en particulier une réduction sensible de l'incertitude pour les bassins à régime nival et également une amélioration des résultats dans le secteur des Cévennes et du pourtour méditerranéen

ainsi que pour les bassins de la Charente, de l'Isle ou encore de l'Adour où les précédentes estimations apparaissaient comme trop incertaines pour être exploitables. Ailleurs le gain est moins perceptible et lorsque l'on examine le détail des distributions de la largeur des intervalles de confiance avant et après consolidation (Figure VI-11), on constate effectivement que celles-ci sont pratiquement identiques et ne diffèrent que dans leur partie haute (pour 20 % des points du réseau examinés) où l'on note une amélioration tout de même significative vis-à-vis des estimations les plus incertaines.

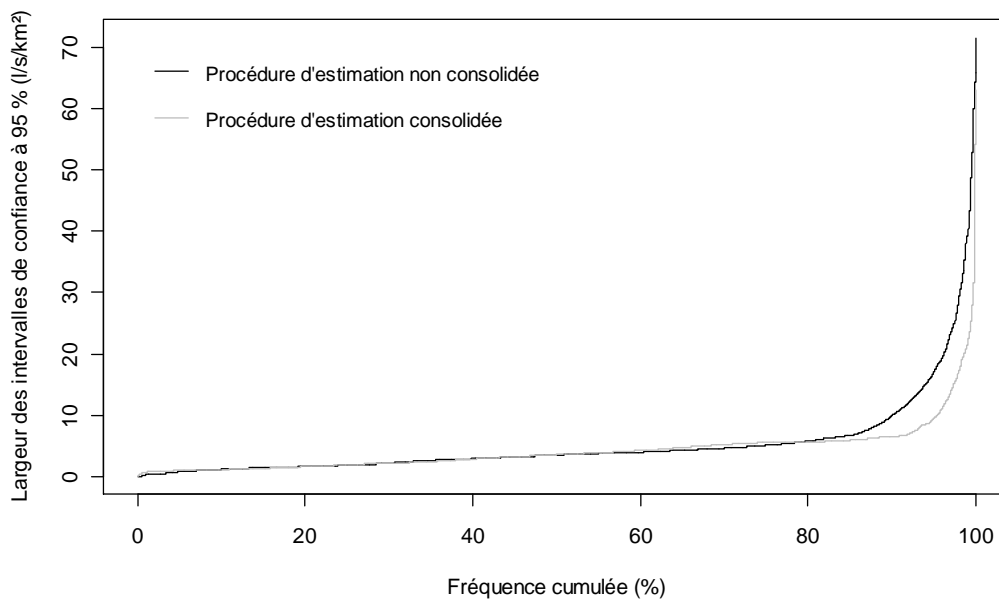


Figure VI-11 : Distribution de la largeur des intervalles de confiance à 95 % ($l/s/km^2$) associés aux valeurs de *QMNA5* spécifique estimées par régression multiple avec et sans introduction de données incertaines sur l'ensemble des points du réseau hydrographique théorique drainant une surface supérieure à $50 km^2$

La nouvelle carte présentée ici peut donc être considérée comme nettement plus satisfaisante en permettant de résorber, au moins partiellement, certains des principaux défauts de la première cartographie proposée au chapitre précédent. Ceci confirme l'intérêt de l'ensemble de la démarche proposée au cours de cette application même si les résultats de validation croisée suite à la consolidation de l'échantillon de référence par l'introduction de données incertaines se sont avérés moins probants qu'attendu.

VI.4 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre que l'on peut considérer comme complémentaire du précédent et qui vient parachever l'ensemble de ces travaux, il a été mis en œuvre une approche relativement peu usitée visant à s'appuyer sur l'introduction de données incertaines pour parvenir à accroître les performances d'estimation en sites non jaugés.

La technique retenue ici consiste à introduire les estimations préalablement obtenues en sites peu jaugés dotés de chroniques courtes dans la procédure d'estimation par ajustement de modèles régressifs

régionaux en tenant compte de leurs incertitudes (exprimée sous la forme d'une variance d'estimation) au travers du critère d'optimisation des moindres carrés pondérés. Les modèles ajustés avant consolidation étant apparus comme peu performants avec l'ajout des nouvelles données (confirmant ainsi leur possible manque de robustesse), il semblait alors pertinent d'identifier de nouvelles relations régionales susceptibles d'expliquer la variabilité du QMNA5 de manière élargie sur la base d'un maximum d'information.

La comparaison des résultats ainsi obtenus en validation croisée sur le jeu de 632 stations de référence avec ceux issus de la procédure non consolidée exposée au chapitre V montre que le gain de performance reste malheureusement assez limité mais apporte tout de même une amélioration vis-à-vis de la fiabilité des estimations les plus incertaines (*i.e.* gain sur la partie supérieure de la distribution de la largeur des intervalles de confiance à 95 %) sans toutefois réduire les écarts aux valeurs de QMNA5 observées. D'après l'analyse des résultats par classes de régime d'étiage le gain constaté concerne par ailleurs principalement les bassins à régime pluvial moyennement ou fortement productifs tandis que les bassins les moins productifs et les bassins à régime nival voient leur estimation se dégrader un peu.

Malgré ces éléments peut-être moins convaincants qu'attendu, la cartographie des QMNA5 spécifiques établie en appliquant la procédure consolidée montre que le gain ne se résume pas aux résultats de la validation croisée mais concerne également la validité des valeurs obtenues en extrapolation le long du réseau hydrographique. Ainsi il apparaît que les nouvelles estimations fournies semblent dans certains cas nettement plus réalistes et s'éloignent moins de la gamme de valeurs observées dans le jeu de données (notamment pour les bassins à régime nival qui présentaient auparavant des valeurs probablement fortement surestimées). D'autre part, si la présence de discontinuités parfois brutales entre les estimations fournies pour des points du réseau hydrographique pourtant voisins n'a pas été résolue ici, celles-ci se trouvent bien souvent atténuées, ce qui confère à la cartographie un rendu plus uniforme et par conséquent plus réaliste. Enfin l'examen de la largeur des intervalles de confiance à 95 % associés aux estimations montre que l'on parvient à réduire de manière significative l'incertitude pour environ 20 % des valeurs de QMNA5 estimées le long du réseau.

Références bibliographiques

- Chopart S., Sauquet E. (2008). Using spot gauging data to interpolate low flow characteristics. *Journal of Water Science*, Vol. 21(3), pp. 267-281.
- Merz R., Blöschl G. (2004). Flood frequency regionalisation - spatial proximity vs. catchment attributes. *Journal of Hydrology*, Vol. 302(1-4), pp. 283-306.
- Meylan P. (1986). Régionalisation de données entachées d'erreurs de mesure par krigeage structural - Application à la pluviométrie. *Hydrologie Continentale*, Vol. 1(1), pp. 25-34.
- Stedinger J.R., Tasker G.D. (1985). Regional hydrologic analysis 1. Ordinary, weighted and generalized least squares compared. *Water Resources Research*, Vol. 21(9), pp. 1421-1432.
- Tasker G.D. (1980). Hydrologic regression with weighted least squares. *Water Resources Research*, Vol. 16(6), pp. 1107-1113.

CONCLUSION GENERALE

Une contribution scientifique en réponse à une problématique opérationnelle

Au cours de ces travaux, nous nous sommes efforcé d'apporter une contribution scientifique et technique aux besoins exprimés vis-à-vis de l'évaluation de la ressource en eau disponible en période d'étiage. Cet état des lieux constitue en effet un pré-requis indispensable à toute action de gestion destinée à concilier et équilibrer les différents usages à l'échelle du bassin versant pour notamment limiter les pressions exercées sur le milieu aquatique. Il est alors essentiel de tenir compte des particularités du milieu en question pour adapter les différents dispositifs de gestion (*e.g.* activation de mesures de restriction temporaires) au contexte hydro-climatique local. A cet égard, l'indicateur statistique retenu par la réglementation française pour caractériser l'état de la ressource en période de basses eaux correspond au débit moyen mensuel minimum annuel de fréquence quinquennale sèche (noté QMNA5) qui constitue donc notre principal objet d'étude.

Dans l'idéal, la détermination d'un tel débit de référence (au même titre que la détermination de toute statistique hydrologique) requiert un suivi des débits en continu sur une période suffisamment longue pour constituer une archive statistiquement exploitable et n'est par conséquent possible qu'au droit d'un nombre limité de stations hydrométriques. Ces dernières ne permettent évidemment pas de couvrir l'ensemble des besoins exprimés sur le territoire d'autant que l'évaluation de la ressource disponible se doit d'être, dans la mesure du possible, représentative d'un régime naturel (non soumis aux perturbations d'origine anthropique) excluant ainsi la possibilité d'exploiter les données disponibles sur les bassins les plus anthropisés.

Pour combler ces lacunes, il est alors nécessaire de faire appel à une estimation aussi fiable que possible de la variable recherchée. En 2008, la France était en retard sur ce point par rapport à certains de ses voisins européens c'est pourquoi l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) a engagé dès 2009 un certain nombre d'actions en chargeant notamment Irstea de réaliser une cartographie nationale du débit de référence d'étiage QMNA5.

Cette problématique, initialement formulée pour répondre aux besoins opérationnels, offre encore à l'heure actuelle de nombreuses perspectives de recherche auxquelles cette thèse, en s'inscrivant dans la continuité de travaux analogues réalisés ces dernières années aussi bien en France qu'à l'étranger (décennie PUB), tente d'apporter une contribution. Au cours de ces travaux nous nous sommes ainsi donné pour objectif d'élaborer et d'optimiser, sur la base des techniques existantes, un cadre méthodologique cohérent adapté à l'estimation du QMNA5 et passant notamment par la valorisation de l'ensemble de l'information à caractère hydrologique disponible localement le long du réseau hydrographique, que ce soit sous la forme de jaugeages épisodiques ou de chroniques courtes. Cet effort d'exhaustivité et de synthèse, s'il n'est pas tout à fait novateur, constitue probablement l'une des principales originalités de ce travail (notamment en ce qui concerne les méthodes relatives à la valorisation des données de jaugeage qui restent à ce jour peu répandues).

Synthèse des méthodes mises en œuvre et principaux résultats

Pour répondre aux objectifs fixés, nous nous sommes tout d'abord attaché, au cours d'une première étape, à sélectionner avec soin les données nécessaires à la réalisation de nos travaux. Il était notamment question de constituer, à partir des données mises à disposition par la Banque HYDRO, un échantillon national de stations hydrométriques de référence qui, étant à la base de l'ensemble de notre stratégie d'estimation, devaient évidemment répondre à certaines exigences telles que la bonne qualité des débits mesurés, l'absence de perturbations significatives des écoulements par les activités humaines et une longueur d'enregistrement suffisante pour permettre la détermination de statistiques hydrologiques fiables. A l'issue d'un travail de critique approfondi, il a finalement été retenu un jeu de 632 stations hydrométriques possédant au moins 26 années de chroniques (sans lacunes) au pas de temps journalier sur la période 1970-2005. Cette condition sur la durée des chroniques, qui découle de tests de sensibilité relatifs à la longueur de chronique nécessaire à la bonne détermination de différentes statistiques hydrologiques, constitue probablement le critère de sélection le plus contraignant et contribue en grande partie à limiter dangereusement la représentativité des stations conservées au sein de l'échantillon de référence. Il apparaît ainsi que celui-ci présente des lacunes, parfois importantes, en termes de répartition spatiale mais surtout vis-à-vis des bassins de petite taille ($S < 20 \text{ km}^2$, par nature peu instrumentés) ou de très grande dimension ($S > 5000 \text{ km}^2$, par nature fortement anthropisés). En revanche, il a été montré que l'on parvient tout de même à préserver une représentativité relativement acceptable vis-à-vis de la diversité des régimes hydrologiques existants sur le plan national.

Compte tenu de ces observations, l'idée de valoriser les données de sites peu jaugeés prend tout son sens en donnant la possibilité de combler certaines des lacunes laissées par le jeu de stations de référence. Ainsi notre critique des données s'est poursuivie de manière à dégager un second jeu de

données constitué de 1257 chroniques de durée inférieure à 26 années qui ont alors été considérées comme des sites peu jaugés dotés de chroniques courtes et exploités en tant que tels par la suite. Le recueil de données de jaugeages n'a en revanche pas pu être poussé aussi loin et se limite à deux jeux de données (non critiqués) mis à notre disposition sur les secteurs Seine-Normandie et Rhône-Alpes. Enfin, parallèlement aux données à caractère hydrologique, il était également question de rassembler un jeu de données auxiliaires permettant de décrire les caractéristiques des bassins versants en termes de climat, de morphologie, de géologie ou encore d'occupation des sols. Ces variables, au nombre de trente-trois, ont été extraites sous la forme de variables de bassin en tout point du réseau hydrographique ; elles constituent la seule information disponible localement en sites non jaugés.

Suite à cette première étape de critique et de sélection des données, nos travaux se sont orientés vers un exercice préliminaire consistant à décrire et caractériser les régimes d'étiage à partir des chroniques de débit disponibles aux 632 stations de l'échantillon de référence. Outre le QMNA5 auquel nous nous intéressons en priorité, il s'agissait ainsi de dégager un jeu de descripteurs relatifs à différents aspects du régime d'étiage (sévérité, durée, débit de base...) pour permettre de mieux discriminer les processus à l'origine des différents comportements hydrologiques existant sur le plan national et, de là, parvenir à une meilleure compréhension de nos futurs résultats en replaçant ceux-ci dans leur contexte hydrologique.

Après l'identification des modalités d'extraction les plus pertinentes, l'analyse des différents indicateurs hydrologiques a permis de formuler un certain nombre d'observations préliminaires sur les caractéristiques respectives des différents bassins. C'est ensuite au travers de techniques d'analyse multivariée telles que l'Analyse en Composante Principale (ACP) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) qu'il a été possible de résumer et synthétiser l'information accumulée pour mieux identifier les similitudes entre bassins. Ainsi il est tout d'abord apparu pertinent d'individualiser, sur la base de la saisonnalité des étiages, une catégorie particulière de bassins se rapportant aux cours d'eau à régime nival pour lesquels les étiages se produisent préférentiellement durant la saison hivernale suite au stockage des précipitations sous forme solide. Ces bassins, assez peu nombreux dans notre échantillon de référence (22 bassins au total sont concernés), se trouvent évidemment localisés dans les principales zones de relief que sont les Alpes et les Pyrénées. Sur le reste du territoire où les régimes pluviaux prédominent, l'ACP a permis de montrer que le processus le plus discriminant se rapportait à l'existence d'un facteur de régulation susceptible de maintenir ou non un débit de base élevé durant les périodes sans précipitation. Ce rôle est généralement assuré par les aquifères et il apparaît alors clairement un lien entre la nature plus ou moins perméable du substratum (*i.e.* sa capacité à accueillir des réserves souterraines) et la sévérité des étiages. Il est également possible de soupçonner un rôle du climat qui, selon le caractère plus ou moins régulier et abondant des précipitations durant la période estivale, conduit à des durées et/ou des intensités d'étiages plus ou moins prononcées. La CAH a finalement permis de discriminer de manière plus qualitative ces différents caractères et, outre la catégorie de bassins à régime nival, a permis de faire ressortir trois autres classes de bassins selon la plus ou moins forte inertie de la réponse hydrologique vis-à-vis des variations climatiques.

Ces étapes préliminaires ayant été menées à bien, nos travaux ont alors pu aborder la problématique de prédétermination du QMNA5 proprement dite en considérant consécutivement la possibilité d'exploiter des chroniques courtes, puis la valorisation des données de jaugeages ponctuels pour finir par les sites dépourvus de tous types d'observations à caractère hydrologique (*i.e.* bassins non jaugés). Dans chacun des cas, la démarche mise en œuvre reposait sur la confrontation de différentes modalités d'estimation au travers d'une procédure systématique de validation croisée consistant à considérer tour à tour chaque site de référence à notre disposition comme un site cible (soit non jaugé, soit peu jaugé) pour y fournir une estimation et comparer celle-ci avec la valeur effectivement observée. Parallèlement, nous nous sommes constamment attachés à fournir une indication sur la fiabilité de chaque valeur estimée au travers d'un intervalle de confiance. Bien qu'apparaissant comme un critère essentiel pour apprécier la validité des résultats obtenus, la détermination d'une incertitude encadrant les valeurs estimées s'avère le plus souvent négligée dans la littérature scientifique relative à la régionalisation de variables hydrologiques ; cette démarche apparaît ainsi comme le second point fort de ces travaux. A partir de ces éléments de diagnostic, les modalités optimales d'estimation du QMNA5 ont été identifiées et finalement appliquées aux données effectivement disponibles pour notamment aboutir à une cartographie nationale du QMNA5 spécifique (exprimé en l/s/km²).

Nous rappelons ici les principales conclusions des différentes étapes examinées à commencer par le cas de sites dotés de chroniques courtes pour lesquels la méthode d'estimation retenue s'appuie sur une procédure de réajustement climatique. Cette méthode consiste à « corriger » la valeur de QMNA5 connue sur le court terme (*i.e.* extraite de la période de chronique disponible au site cible) en tenant compte d'une éventuelle dérive attribuée aux particularités climatiques de la période d'observation (*i.e.* période « plus humide » ou « plus sèche ») par rapport à la valeur attendue sur le long terme. La correction est alors effectuée à l'aide d'un coefficient régional k déduit de l'ajustement d'une relation linéaire entre les QMNA5 de court terme (extraits de la période de chronique concomitante à celle disponible au site cible) et de long terme (obtenus à partir de la totalité de la chronique) d'un ensemble de sites de référence voisins du site cible. A cet égard, la comparaison de plusieurs modalités de sélection des sites de référence autour de chaque site cible a permis de dégager un protocole reposant sur la simple proximité géographique en prenant soin toutefois de déterminer la taille de voisinage optimale par minimisation de la variance régionale du coefficient k . Cette solution s'est notamment avérée plus avantageuse que le recours à la typologie en Hydro-Eco-Régions proposée par Wasson *et al.* (2001) mais a surtout montré un intérêt par rapport à un réajustement opéré en employant indistinctement la totalité des sites de références disponibles (*i.e.* sans se préoccuper de la problématique de sélection de voisinage) ou à l'opposé par rapport à l'emploi d'un seul et unique site de référence (*i.e.* le plus proche du site cible).

Les résultats obtenus selon ce protocole au terme de la validation croisée (*i.e.* simulation de chroniques courtes par ré-échantillonnage dans les chroniques des sites de référence) indiquent assez logiquement une nette amélioration des performances d'estimation avec l'augmentation des longueurs de chronique disponible. Il est néanmoins apparu que la procédure de réajustement ne présentait qu'un intérêt relativement marginal au-delà d'une durée de chronique d'environ 16 années pour laquelle le QMNA5 de court terme se rapproche déjà fortement de la valeur de long terme.

Lorsque la donnée disponible au site cible se réduit à des jaugeages ponctuels, la méthode d'estimation s'oriente cette fois vers l'identification d'une relation simple (de forme log-linéaire) entre les débits jaugés au site cible et ceux observés à la même date au droit d'une station hydrométrique de référence voisine. Il est alors fait l'hypothèse que cette relation constitue une bonne approximation de la relation entre le QMNA5 recherché au site cible et celui connu au site d'appui. Pour assurer l'efficacité de la méthode, il a été proposé un protocole pour l'identification du site de référence le plus approprié s'appuyant sur la présélection d'un ensemble de stations hydrométriques géographiquement voisines parmi lesquelles est finalement retenu le site de référence dont les observations de débits sont les plus corrélées à celles issues des mesures de jaugeages réalisées au site cible. L'intérêt est alors de disposer d'un indicateur de « proximité » directement issu de l'information hydrologique disponible au site cible.

L'application de ce protocole d'estimation en validation croisée s'est ensuite consacrée à l'exploration de différentes stratégies de jaugeage au travers d'un jeu de simulations faisant intervenir plusieurs combinaisons de fréquences annuelles de jaugeage (F) et durées de suivi (D) pour un nombre de jaugeages résultant $N = D \cdot F$. Il s'agissait ainsi de préciser les modalités optimales de mise en œuvre d'une campagne de jaugeage dédiée à l'estimation du QMNA5. Pour ce faire, les résultats obtenus à l'issue de la validation croisée en termes de biais et d'écart type d'estimation ont été synthétisés à l'aide de modèles analytiques simples de manière à permettre d'associer à chaque valeur de QMNA5 estimée un intervalle de confiance de niveau de significativité voulu en fonction (i) de la stratégie de jaugeage adoptée au site cible (y compris pour le cas de stratégies non simulées lors de la validation croisée) et (ii) de la « proximité » du site de référence employé pour réaliser l'estimation. Il est ainsi tout d'abord apparu que, outre l'importance de disposer d'un site d'appui présentant une dynamique hydrologique suffisamment voisine de celle du site cible (*i.e.* plus la corrélation est élevée plus les estimations sont fiables), le gain de performance apporté par l'augmentation du nombre de jaugeages était sensible jusqu'à 20 à 25 mesures environ puis qu'il s'atténuait assez rapidement au-delà. Parallèlement, il a été démontré que la réalisation de plusieurs jaugeages au cours d'une même année conduisait, pour un nombre de jaugeages équivalent, à un gain de performance moins rapide en raison semble-t-il de la dépendance intra-annuelle des débits jaugés. Néanmoins les résultats indiquent qu'il est tout de même possible d'écourter un peu la durée de suivi d'un site en augmentant la fréquence annuelle de jaugeage sans nuire aux résultats (le meilleur compromis semble alors être la réalisation de trois jaugeages chaque année).

Enfin, nos travaux se sont achevés sur une large application consacrée à l'estimation du QMNA5 en bassins non jaugés qui représentent évidemment le cas le plus fréquemment rencontré le long du réseau hydrographique. Pour ce faire la démarche retenue se décompose en deux étapes consécutives mais complémentaires, la première consistant à fournir une première estimation à partir du seul jeu de stations de référence, la seconde visant à améliorer ces estimations par l'introduction de données incertaines.

Parmi les méthodes d'estimation envisagées, les approches d'interpolation par krigeage, dont les résultats sont rapidement apparus comme décevants, ont été délaissées en faveur des techniques d'estimation par ajustement de modèles régressifs régionaux. Pour assurer l'efficacité de celles-ci, un protocole a tout d'abord été conçu pour permettre la sélection du meilleur modèle régressif à partir des

descripteurs de bassin disponibles sur le plan national (*i.e.* sélection du jeu de variables explicatives permettant de parvenir aux meilleures performances d'estimation du QMNA5 spécifique). Ensuite l'essentiel de notre réflexion s'est concentré sur les modalités d'identification de voisinages pour regrouper les bassins possédant un comportement hydrologique similaire et permettre d'expliquer la variabilité résiduelle du QMNA5 au travers des modèles régressifs régionaux.

Après avoir démontré le potentiel de la méthode dans le cas de voisinage « idéalement connus » (*i.e.* définis sur la base de similitudes hydrologiques), plusieurs techniques de regroupement des bassins ont été mises en œuvre et confrontées en validation croisée. Parmi ces méthodes (regroupements par Hydro-Eco-Regions, voisinages glissants dans l'espace géographique ou dans un espace des descripteurs de bassin), la technique de classification par arbre de régression (CART), dont le principal avantage est probablement la prise en compte explicite d'une information à caractère hydrologique dans la procédure de regroupement des bassins, s'est avérée la plus performante. La démarche s'est également révélée plus avantageuse qu'une approche consistant à déterminer le QMNA5 à partir d'une chronique de débit reconstituée suite à la régionalisation des paramètres d'un modèle hydrologique (approche mise en œuvre par Folton *et al.* (2011)). Il est toutefois apparu que certains modèles régressifs régionaux pouvaient parfois présenter des insuffisances sur le plan de la fiabilité des valeurs estimées. Ce manque de robustesse, qui se manifeste par des intervalles de confiance particulièrement larges, tient vraisemblablement au faible effectif de stations de référence employé pour ajuster certaines des relations régionales. Evidemment, le problème se répercute au delà de la validation croisée lors de l'application de la méthode aux points du réseau hydrographique effectivement non jaugés (notamment lorsque les modèles sont extrapolés à des jeux de variables explicatives éloignées de la gamme de valeurs employées lors de l'ajustement). La carte des QMNA5 qui en résulte est ainsi susceptible de présenter des valeurs parfois peu réalistes ou trop peu fiables pour être exploitées. Un second défaut majeur est la présence de discontinuités parfois brutales entre les estimations fournies pour des points du réseau pourtant voisins. Ces discontinuités, qu'elles apparaissent sur un même tronçon ou au niveau d'une confluence, s'avèrent inhérentes à la méthode de regroupement CART qui ne permet pas d'assurer la continuité entre deux régions. Ce problème, qui reste non résolu à ce jour, illustre l'importance d'accompagner les estimations d'une incertitude qui doit être vue comme un moyen indirect d'assurer le recouvrement, au moins partiel, des valeurs estimées le long du réseau hydrographique.

Afin d'améliorer nos résultats et de remédier à certains des défauts évoqués précédemment, nous avons choisi de faire appel à une démarche assez peu usitée visant à consolider l'échantillon initial de stations de référence à l'aide de données incertaines. La technique retenue consistait alors à introduire les estimations préalablement obtenues par réajustement climatique aux sites peu jaugés dotés de chroniques courtes en tenant compte de leurs incertitudes dans la procédure d'ajustement des modèles régressifs régionaux au travers du critère d'optimisation des moindres carrés pondérés. Plutôt que de conserver les modèles sélectionnés avant consolidation, il est apparu préférable d'identifier de nouvelles relations régionales susceptibles d'expliquer la variabilité du QMNA5 de manière élargie, sur la base d'un maximum d'information. Malgré des résultats que l'on peut qualifier de mitigés en validation croisée avec un gain de performance ne se limitant qu'à la partie haute de la distribution de la largeur des intervalles

de confiance, il est tout de même apparu que la cartographie des QMNA5 spécifiques établie en appliquant la procédure d'estimation consolidée (CART2+) se révélait nettement plus satisfaisante, notamment en permettant d'atténuer les discontinuités et en fournissant des valeurs plus réalistes pour certains cours d'eau. Il peut être ainsi considéré que l'introduction de données incertaines dans une procédure d'estimation en sites non jaugés se révèle avantageuse.

Au delà de chaque approche d'estimation prise individuellement, l'un des résultats présentant sans doute le plus d'intérêt sur le plan général passe par la comparaison des performances d'estimation selon la quantité d'information disponible au site cible (dont nous avons jugé utile de donner à nouveau une illustration ici, Figure VII-1).

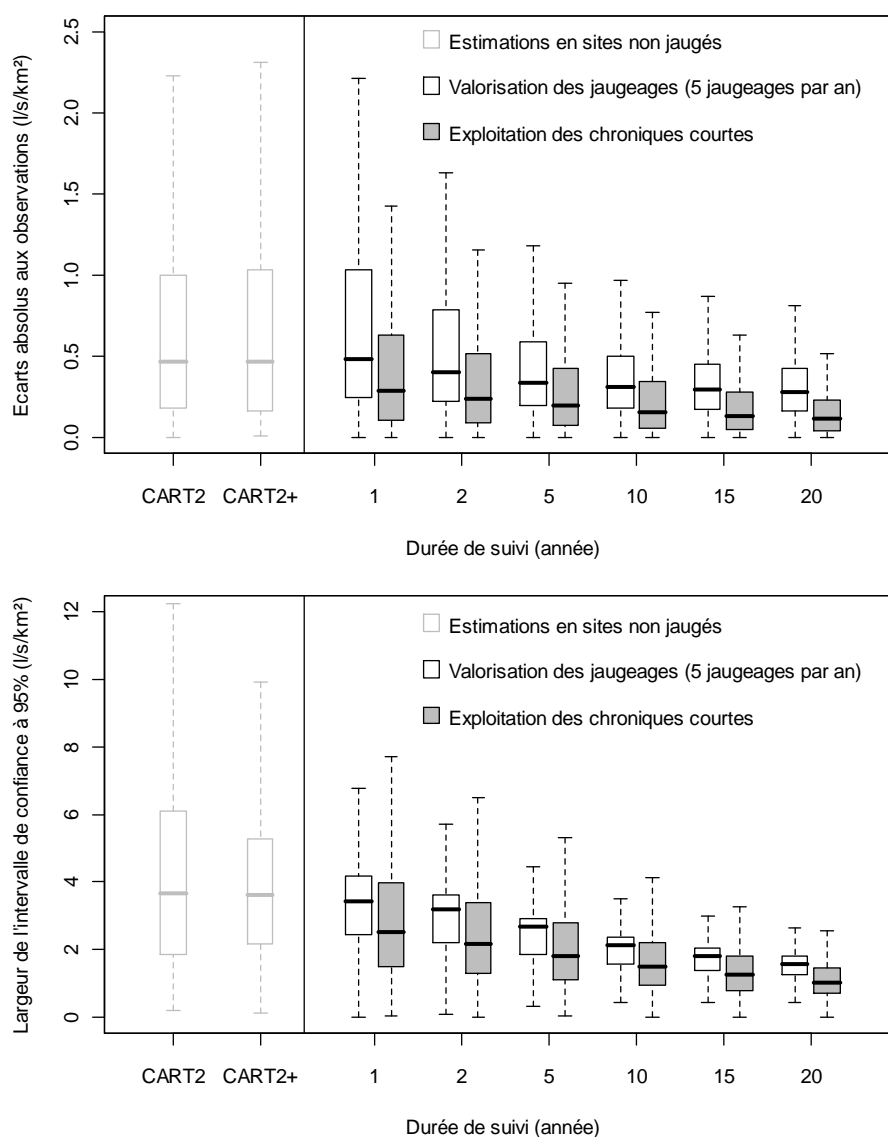


Figure VII-1 : Synthèse des performances d'estimation du QMNA5 spécifique obtenues en validation croisée selon la quantité et la nature de la donnée disponible au site cible

Cette comparaison permet sans surprise de montrer, en accord avec l'ensemble des travaux analogues relevés dans la littérature, que la valorisation au moyen de techniques appropriées d'une information hydrologique locale, même très fragmentaire, est susceptible d'accroître de manière significative la fiabilité des estimations obtenues par rapport à une estimation en sites non jaugés. Bien entendu le gain de performance est d'autant plus intéressant que la quantité de données disponible est importante. Ainsi les résultats obtenus à durée de suivi équivalente montrent que l'exploitation de chroniques courtes apparaît logiquement comme plus avantageuse que la valorisation de données de jaugeages. Néanmoins, les bénéfices offerts par le recours à ces dernières, tant en termes de coût que vis-à-vis des possibilités de suivi de sites difficiles à équiper d'une station hydrométrique permanente, en font une source d'information particulièrement précieuse qu'il sera souhaitable de voir se généraliser à l'avenir (ce qui est d'ailleurs déjà le cas dans certains secteurs).

Pour finir, on rappellera que l'une des principales limites de ces travaux reste probablement la difficulté à traiter correctement le cas de bassins atypiques (*i.e.* présentant une forte singularité locale). En effet la démarche de régionalisation, dont l'efficacité repose en grande partie sur l'existence (et la sélection) de sites d'appui appropriés, ne peut que difficilement s'affranchir des limites de représentativité imposées par le jeu de données disponibles. Il est notamment apparu à plusieurs reprises que les estimations fournies pour des bassins en milieu karstique s'écartaient nettement des valeurs observées. Il semble en être de même pour les bassins à régime nival, assez peu représentés dans notre échantillon de référence et qui participent en grande partie à dégrader les performances d'ensemble des différentes approches d'estimation. En conséquence il convient de mettre en garde vis-à-vis de l'exploitation des estimations fournies qui se doivent d'être soumises à la critique et ne peuvent se substituer à une connaissance approfondie du contexte hydro-climatique local.

Perspectives

Aux précautions d'usage évoquées ci-dessus s'ajoute évidemment un certain nombre de perspectives de travail. Celles-ci concernent en premier lieu les améliorations pouvant être apportées à la dernière phase de nos travaux en commençant peut-être par l'identification et l'extraction de descripteurs de bassins susceptibles de permettre une meilleure explication de la variabilité du QMNA5. L'amélioration attendue pourra alors jouer à deux niveaux en permettant (i) une meilleure discrimination des bassins lors de l'application des méthodes de regroupement (notamment via la construction d'un espace permettant de mieux caractériser la « proximité » entre bassin) et/ou (ii) une plus grande efficacité des modèles régressifs régionaux. Pour ce faire, la recherche de nouvelles variables devra en priorité s'orienter vers des descripteurs relatifs aux propriétés géologiques et hydrogéologique des bassins.

Une seconde tâche concerne la résolution des problèmes de discontinuité qui résultent du mode de regroupement des bassins par arbre de régression que nous avons retenu au cours de ces travaux. S'il peut être envisagé d'intervenir *a posteriori* en effectuant par exemple un lissage des valeurs estimées le long du réseau hydrographique, la solution la plus judicieuse consisterait plutôt à revoir l'algorithme de classification employé de manière à assurer la continuité entre les classes, par exemple au travers d'une probabilité d'appartenance. En détournant un peu le problème, cet aspect a été abordé au cours de nos

travaux en tentant, à l'aide de l'algorithme classique, d'associer à chaque bassin une probabilité d'appartenance à l'une des quatre classes de régime d'étiage. Il est cependant apparu que la combinaison pondérée des modèles régressifs ajustés pour ces quatre classes menait à des résultats peu satisfaisants, indiquant au passage que les modèles de chacune de ces classes, s'ils s'avèrent performants, sont également assez restrictifs (*i.e.* ne peuvent être utilisés avec succès pour les individus d'une classe différente). Une solution alternative pourrait consister à attribuer, à chaque niveau de l'arbre de décision, un poids à chaque individu classé en quantifiant son degré d'éloignement par rapport au seuil de décision (autrement dit en introduisant une certaine tolérance vis-à-vis de ce seuil), cependant les modalités d'application d'une telle procédure restent à définir.

Concernant l'ajout de données incertaines dans la procédure d'estimation en sites non jaugés par régression multiple, un surplus d'information non négligeable pourrait être évidemment introduit au moyen des estimations fournies à partir de données de jaugeages, sous réserve de disposer d'un jeu de données complet et critiqué. Le protocole d'estimation développé pour les bassins concernés permet en effet de fournir une approximation de l'incertitude pour chaque estimation qui pourra alors être introduite, au même titre que dans le cas des incertitudes issues de l'estimation du QMNA5 à partir des chroniques courtes, au travers du critère d'optimisation des moindres carrés pondérés.

Enfin, compte tenu des résultats encourageants obtenus, on pourra légitimement envisager d'élargir l'ensemble de la démarche initiée dans ces travaux à d'autres catégories de descripteurs du régime d'étiage. En effet, les aspects relatifs à la durée, à la saisonnalité ou la répétition d'épisodes sévères au cours d'une même saison (ou sur plusieurs années consécutives), bien que ne faisant pas partie des critères de gestion selon la réglementation en vigueur, s'avèrent fondamentaux vis-à-vis de leurs impacts sur les écosystèmes aquatiques. Pour aller dans ce sens, une avancée décisive passera probablement par l'extension et l'adaptation des techniques développées aux modèles Débit-Durée-Fréquence (approche dite QdF, initiée par Prudhomme (1995) pour les crues et adaptée au étiage par Galéa *et al.* (1999, 2000) pour les VCNd(I)) qui permettent de synthétiser une grande quantité d'information à l'aide d'un nombre limité de paramètres. Il s'agirait alors de se placer dans une situation intermédiaire entre la régionalisation d'un unique descripteur hydrologique, comme examinée au cours de ces travaux, et la régionalisation des paramètres d'un modèle hydrologique qui, si elle permet de reconstituer une chronique de débit dans son intégralité, ne garantit pas l'obtention de performance aussi satisfaisantes.

L'exploitation des modèles QdF dans un cadre de régionalisation pourra s'inspirer de l'approche « index flood method » qui considère que les distributions pour différents sites d'une même « région homogène » sont similaires à un facteur d'échelle près, représenté par un indice à valeur locale (usuellement la moyenne de l'échantillon). Les données de chaque site, lorsqu'elles sont normalisées, peuvent alors participer à la détermination et l'ajustement d'un unique modèle de distribution adimensionnel qualifié de régional. Galéa *et al.* (1999, 2000) ont montré qu'une telle approche était applicable au cas des modèles QdF étiage (dénommé alors modèles QdF étiage régionaux) en faisant là encore appel à un facteur d'échelle local mais aussi à un paramètre de durée caractéristique. La régionalisation du modèle QdF porte alors sur l'estimation des deux paramètres locaux, qui couplés au

modèle régional adimensionnel, permet de reconstituer l'intégralité des distributions de la variable étudiée aux sites cibles. L'efficacité d'une telle approche repose cependant fortement sur l'hypothèse d'une homogénéité régionale pouvant être vérifiée à l'aide de tests sur les L-moments (Hosking et Wallis (1997)). Quelques essais à ce sujet ont montré que ce point pouvait constituer un obstacle particulièrement délicat à traiter. Enfin, dans le cas de sites peu jaugés, une approche alternative (et non explorée à ce jour pour les modèles QdF) pourrait consister à traiter le problème dans un cadre bayésien en suivant l'exemple des travaux initiés par Ribatet *et al.* (2007) pour les distributions de débits de crue. Il s'agit alors de combiner l'information régionale (distribution des paramètres locaux en guise de modèle *a priori*) et l'information locale éventuellement disponible (*i.e.* chronique courte voire données de jaugeages) par résolution du théorème de Bayes. La pertinence de l'*a priori* se rapporte alors directement à l'hypothèse d'homogénéité régionale qui, si elle s'avère importante, n'est plus une condition élémentaire.

Références bibliographiques

- Folton N., Coulier P. (2011). Cartographie des débits de référence d'étiage sur le territoire national français. Rapport d'étude, Irstea, 42 pp.
- Galéa G., Mercier G.X., Adler M.J (1999). Modèles débit-durée-fréquence d'étiage, concept et usage pour une approche régionale des régimes de basses eaux des bassins hydrographiques de la Loire (France) et du Crisu-Alb (Roumanie). *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 12(1), pp. 93-122.
- Galéa G., Javelle P., Chaput N. (2000). Un modèle débit-durée-fréquence pour caractériser le régime d'étiage d'un bassin versant. *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 13(4), pp. 421-440.
- Hosking J.R.M., Wallis J.R. (1997). *Regional frequency analysis: An approach based on L-moments*. Cambridge University Press, United Kingdom, 224 pp.
- Prudhomme C. (1995). Modèles synthétiques des connaissances en hydrologie - Application à la régionalisation des crues en Europe Alpine et Méditerranéenne. Ph.D Thesis, Université de Montpellier II, Cemagref, Division Hydrologie-Hydraulique, 422 pp.
- Ribatet M., Sauquet E., Gresillon J-M., Ouarda T.B.M.J. (2007). A regional Bayesian POT model for flood frequency analysis. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 21(4), pp. 327-339.
- Wasson J.G., Chandesris A., Pella H., Souchon Y. (2001). Définition des hydroécorégions françaises. Méthodologie de détermination des conditions de référence au sens de la Directive Cadre pour la gestion des eaux. Rapport d'étude, Irstea, 190 pp.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adamowski K., Bocci C. (2001). Geostatistical regional trend detection in river flow data. *Hydrological Processes*, Vol. 15(18), pp. 3331-3341.
- Andrews D.F. (1972). Plots of high dimensional data. *Biometrics*, Vol. 28(1), pp. 125-136.
- Armbruster J.T. (1976). An infiltration index useful in estimating low-flow characteristics of drainage basins. *USGS Journal Research*, Vol. 4(5), pp. 533-538.
- Aschwanden H., Kan C. (1999). Le débit d'étiage Q347 – Etat de la question. Service hydrologique et géologique national, *Communications hydrologique* No. 27, 132 pp.
- Aucott W.R., Meadows R.S., Patterson G.G. (1987). Regional groundwater discharge to large streams in the upper coastal plain of south Carolina and parts of north Carolina and Georgia. *USGS Water Resources Investigations. Report 86-4332*, 28 pp.
- Bakke P.D., Thomas R., Parrett C. (1999). Estimation of long-term discharge statistics by regional adjustment. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35(4), pp. 911-921.
- Beran M.A., Gustard A. (1977). A study into the low-flow characteristics of British rivers. *Journal of Hydrology*, Vol. 35(1-2), pp. 147-157.
- Bingham R.H. (1986). Regionalization of winter low-flow characteristics of Tennessee streams. *USGS Water-Resources Investigations. Report 86-4007*, 88 pp.
- Blum M. (2003). La détermination de régions hydrologiques homogènes par l'analyse de corrélation canonique. Cemagref. *Rapport de stage*, 90 pp.
- Breiman L., Friedman J.H., Olshen R., Stone C.J. (1984). (Eds) *Classification and Regression Trees*. Wadsworth International Group, Belmont, California.
- Bulu A. (1997). Statistical analysis of low flows with zero discharges. *FRIEND: Flow Regimes from International Experimental and Network Data, Third Report*, pp. 167-170.
- Burn D.H. (1990). Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. *Water Resources Research*, Vol. 26(10), pp. 2257-2265.
- Burn D.H. (1997). Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *Journal of Hydrology*, Vol. 202(1-4), pp. 212-230.
- Carter R.F., Hopkins E.H., Perlman H.A. (1988). Low-flow profiles of the Tennessee river tributaries in Georgia. *USGS Water Resources Investigations, Report 88-4049*, 69 pp.
- Castiglioni S., Castellarin A., Montanari A., Skoien J.O., Laaha G., Blöschl G. (2011). Smooth regional estimation of low-flow indices: geographical space based interpolation and top-kriging. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15(3), pp. 715-727.
- Catalogne C., Sauquet E. (2009). Interpolation des courbes de débits classés. *Rapport d'étude*, Cemagref, 97 pp.

- Chalise S.R., Kansakar S.R., Rees G., Coroker K., Zaidman M. (2003). Management of water resources and low flow estimation for the Himalayan basins of Nepal. *Journal of Hydrology*, Vol. 282(1-4), pp. 25-35.
- Chen Y. D. (2006). Regional analysis of low flow using L-moments for Dongjiang Basin, South China. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 51(6), pp. 1051–1064.
- Chokmani K., Ouarda. T.B.M.J. (2004). Physiographical space-based kriging for regional flood frequency estimation at ungauged sites. *Water Resources Research*, Vol. 40(12), No. W12514.
- Chopart S. et Sauquet E. (2008). Using spot gauging data to interpolate low flow characteristics. *Journal of Water Science*, Vol. 21(3), pp. 267-281.
- Cipriani T., Toilliez T., Sauquet E., (2012). Estimation régionale des débits décennaux et durées caractéristiques de crue en France. *La Houille Blanche*, 4/5, sous presse.
- Clausen B., Pearson C.P. (1995). Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought. *Journal of Hydrology*, Vol. 173(1-4), pp. 111-130.
- Dacharry M. (1996). Dictionnaire français d'hydrologie (<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/indexdic.htm>)
- Daviau J.L., Adamowski K., Patry G.G. (2000). Regional flood frequency analysis using GIS, L-moment and geostatistical methods. *Hydrological Processes*, Vol. 14(15), pp. 2731-2753
- Demuth S. (1993). Untersuchungen zum Niedrigwasser in West-Europa. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*. Bd. 1, Freiburg, Germany.
- Dickinson W.T., Holland M.E., Smith G.L. (1967). An experimental rainfall-runoff facility. *Hydrol. Pap.*, Vol. 25, 81 pp., Colo. State Univ., Fort Collins.
- Dingman S., Putscher J. (1991). Applicability of concurrent baseflow measurements for estimation of low-flow statistics in New Hampshire and Vermont. *Water Resources Research Center*, University of New Hampshire, Durham, New Hampshire.
- Dingman S.L., Lawlor S.C. (1995). Estimating low-flow quantiles from drainage-basin characteristics in New Hampshire and Vermont. *Water Resources Bulletin*, Vol. 31(2), pp. 243-256.
- DIREN Rhône Alpes (2003). Les débits d'étiage en Rhône-Alpes. *Rapport d'étude*, 14 pp.
- Downer R.N. (1981). Low-flow studies for Vermont - a prognosis for success. *Hydro Power and Its Transmission in the Lake Champlain Basin*. *Proceedings of the Eighth Annual Lake Champlain Basin Environmental Conference*, pp. 43-51.
- Dyck S. (1976). *Applied Hydrology*, part I. Calculation and regulation of the discharge of streams. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Eaton B., Church M., Ham D. (2002). Scaling and regionalization of flood flows in British Columbia, Canada. *Hydrological Processes*, Vol. 16(16), pp. 3245-3263.

- Eng K., Milly P.D.C (2007). Relating low-flow characteristics to the base flow recession time constant at partial record stream gauges. *Water Resources Research*, Vol. 43(1), W01201.
- Engeland K., Hisdal H. (2009). A comparison of low flow estimates in ungauged catchments using regional regression and the HBV-model. *Water Resources Management*, Vol. 23(12), pp. 2567-2586.
- Eratakulan S.J. (1970). Probability distribution of annual droughts. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 96(IR4), pp. 461-474.
- Fiering M.B. (1963). Use of correlation to improve estimates of the mean and variance. USGS, Prof. Pap. 434-C, pp. 20-32.
- Fleig A.K., Tallaksen L.M., Hisdal H., Demuth S. (2005). A global evaluation of Streamflow drought characteristics. University of Oslo (Norvège).
- Folton N., Coulier P. (2011). Cartographie des débits de référence d'étiage sur le territoire national français. Rapport d'étude, Irstea, 42 pp.
- Galéa G., Mercier G.X., Adler M.J (1999). Modèles débit-durée-fréquence d'étiage, concept et usage pour une approche régionale des régimes de basses eaux des bassins hydrographiques de la Loire (France) et du Crisu-Alb (Roumanie). *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 12(1), pp. 93-122.
- Galéa G., Javelle P., Chaput N. (2000). Un modèle débit-durée-fréquence pour caractériser le régime d'étiage d'un bassin versant. *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 13(4), pp. 421-440.
- Galéa G., Canali, S. (2005). Régionalisation des modules annuels et des régimes d'étiage du bassin hydrographique de la Moselle française : lien entre modèles régionaux. *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 18(3), pp. 331-352.
- Gambolati G., Volpi G.A. (1979). Conceptual Deterministic Analysis of the Kriging Technique in Hydrology. *Water Resources research*, Vol. 15(3), pp. 625-629.
- Gerasimenko (1972). Effects of lakes on minimum streamflow in West Siberia. *Trudy GGI (Trans. State Hydrol. Inst., Leningrad, URSS)*, Vol. 188, pp. 305-311.
- Ghosh B. (1951). Random distances within a rectangle and between two rectangles. *Bulletin of Calcutta Mathematical Society*, Vol. 43(1), pp. 17-24.
- Giuntoli I., Renard B. (2010). Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages. Rapport d'étude, Cemagref-ONEMA.
- Gordon N.D., McMahon T.A., Finlayson B.L. (1992). *Stream Hydrology (An Introduction for Ecologists)*. Wiley, New York, 526 pp.
- Gottschalk L. (1993a). Interpolation of runoff applying objective methods. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 7(4), pp. 269-281.
- Gottschalk L. (1993b). Correlation and covariance of runoff. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 7(2), pp. 85-101.

- Gottschalk L., Tallaksen L.M., Perzyna G. (1997). Derivation of low flow distribution functions using recession curves. *Journal of Hydrology*, Vol. 194(1-4), pp. 239-262.
- Gottschalk L., Krasovskaia I., Leblois E., Sauquet E. (2006). Mapping mean and variance of runoff in a river basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 10(4), pp. 469-484.
- Griffiths G.A., Clausen B. (1997). Streamflow recession in basins with multiple water storages. *Journal of Hydrology*, Vol. 190(1-2), pp. 60-74.
- Gustard A., Roald L.A., Demuth S., Lumadjeng H.S., Gross R. (1989). *Flow Regimes from Experimental and Network Data (FRIEND)*, Vol. 1, Hydrological Studies, Institute of Hydrology, Wallingford, UK
- Gustard A., Bullock A., Dixon J.M. (1992). Low flow estimation in the United Kingdom. Institute of Hydrology, Report No. 108, 88 pp., append.
- Gustard A., Young A.R., Rees G., Holmes M.G.R. (2004). Operational hydrology. In: *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater* (ed. by L. M. Tallaksen & H. A. J. van Lanen), *Developments in Water Science* 48, Elsevier, The Netherlands. pp. 455-484.
- Haan C.T. (1977). *Statistical Methods in Hydrology*. Iowa State University Press, Ames, IA.
- Haberlandt U., Klocking B., Krysanova V., Becker, A. (2001). Regionalisation of the base flow index from dynamically simulated flow components – a case study in the Elbe River Basin. *Journal of Hydrology*, Vol. 248(1-4), pp. 35-53.
- Haché M., Ouarda T.B.M.J, Bruneau P., Bobée B. (2002). Estimation régionale par la méthode de l'analyse canonique des corrélations : comparaison des types de variables hydrologiques. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 29(6), pp. 899-910.
- Hall A.J. (1971). Baseflow recessions and baseflow hydrograph separation problem. In : *Hydrology Symposium*, pp. 159-170, Institution of Engineers, Australia, Canberra.
- Hall F.R. (1968). Base flow recessions - a review. *Water Resources Research*, Vol. 4(5), pp. 973-983.
- Hamed K., Rao A.R. (1998). A Modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated Data. *Journal of Hydrology*, Vol. 204(1-4), pp. 182-196.
- Hardison C.H. (1971). Prediction error of regression estimates of streamflow characteristics at ungauged sites. USGS Professional Paper C750, pp. C228-C236.
- Hayes D.C (1991). Low flow characteristics of streams in Virginia. USGS water supply, Paper 2374.
- Hirsch R.M. (1982), A comparison of four streamflow record extension techniques. *Water Resources Research*, Vol. 18(4), pp. 1081-1088.
- Holmes M.G.R., Young A.R., Gustard A., Grew R. (2002). A Region of Influence approach to predicting Flow Duration Curves within ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 6(4), pp. 721-731.

- Hosking J.R.M., Wallis J.R. (1997). *Regional frequency analysis: An approach based on L-moments*. Cambridge University Press, United Kingdom, 224 pp.
- Hughes D.A., Smakhtin V. (1996). Daily flow time series patching or extension : a spatial interpolation approach based on flow duration curves. *Hydrological Sciences*, Vol. 41(6), pp. 851-871.
- Hundecha Y., Ouarda T.B.M.J, Bardossy A. (2008). Regional estimation of parameters of a rainfall-runoff model at ungauged watersheds using the "spatial" structures of the parameters within a canonical physiographic-climatic space. *Water Resources Research*, Vol. 44 (1), No. W01427.
- Institute of Hydrology (1980). *Low-flow studies*. Report No. 1, Wallingford, Oxon, U.K.
- Isaaks E.H., Srivastava R.M. (1989). *Applied Geostatistics*. Oxford Univ. Press, New York.
- Kaabi A. (1994). *Régionalisation des étiages dans le nord-ouest de l'Algérie*. Ph.D Thesis - Université Joseph Fourier à Grenoble. GIS Hydrologie AMHY-France, Cemagref (Groupement de Lyon), ANRH (Alger).
- Kjeldsen T.R, Lundorf A., Rosbjerg D. (2000). Use of a two component exponential distribution in partial duration modelling hydrological droughts in Zimbabwean rivers. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 45(2), pp. 285-298.
- Klaassen B., Pilgrim D.H. (1975). Hydrograph recession constants for New South Wales streams. *Inst. Engng. Civil Engng. Trans. CE17*, pp. 43-49.
- Kohonen T. (1982). Self-organize formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics*, Vol. 43(1), pp. 59-69.
- Kohonen T. (2001). *Self-Organizing Maps*, 3rd Edn., Information Sciences, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 501 pp.
- Kroll C.N., Stedinger J.R. (1998). Regional hydrologic analysis : ordinary and generalized least squares revisited. *Water Resources Research*, Vol. 34(1), pp. 121-128.
- Laaha G. (2002). Modelling summer and winter droughts as a basis for estimating river low flows. In : *FRIEND 2002 - Regional Hydrology : Bridging the Gap between Research and Practice*. Proceedings of the Fourth International Conference held in Cape Town, South Africa, March 2002. IAHS Publ. 274, pp. 289-295.
- Laaha G., Blöschl, G. (2005). Low flow estimates from short stream flow records - a comparison of methods. *Journal of Hydrology*, Vol. 306(1-4), pp. 264-286.
- Laaha G., Blöschl G. (2006a). A comparison of low flow regionalisation methods - catchment grouping. *Journal of Hydrology*, Vol. 323(1-4), pp. 193-214.
- Laaha G., Blöschl G. (2006b). Seasonality indices for regionalizing low flows. *Hydrological Processes*, Vol. 20(18), pp. 3851-3878.
- Laaha G., Blöschl G. (2007). A national low flow estimation procedure for Austria. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 52(4), pp. 625-644.

- Lang Delus C. (2011). Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. *Cybergeo : European Journal of Geography [En ligne], Environnement, Nature, Paysage*, article 571.
- Langbein W.B. (1938). Some channel storage studies and their application to the determination of infiltration. *Eos Trans. AGU*, Vol. 19, pp. 435-447.
- Leblois E. (2012). Le bassin versant, système spatialement structuré et soumis au climat. Mémoire d'HDR, Université de Grenoble.
- Ley R., Casper M.C., Hellebrand H., Merz R. (2010). Catchment classification by runoff behaviour with self-organizing maps (SOM). *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15(9), pp. 2947-2962.
- Longobardi A., Villani P. (2008). Baseflow index regionalization analysis in a Mediterranean area and data scarcity context: Role of the catchment permeability index. *Journal of Hydrology*, Vol. 355(1-4), pp. 63-75.
- Lvovich M.I. (1972). Hydrologic budget of continents and estimate of the balance of global fresh water resources. *Sov. Hydrol.*, Vol. 4.
- Lyne V., Hollick M. (1979). Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. I.E. Aust. Natl. Conf. Publ. 79/10, pp. 89-93, Inst. of Eng., Aust., Canberra.
- Madsen H., Rosberg D. (1997a). The partial duration series method in regional index-flood modelling. *Water Resources Research*, Vol. 33(4), pp. 737-746.
- Mahalanobis P.C. (1936). On the generalised distance in statistics. *Proceedings of the National Institute of Sciences of India*, Vol. 2(1), pp. 49-55.
- Mardia K. (1972). *Statistics of Directional Data : Probability and Mathematical Statistics*. Academic Press: London.
- Matalas N.C. (1963). Probability distribution of low flows. USGS Prof. Pap. 434-A, Washington, D.C.
- Matalas N.C., Jacobs B. (1964). A correlation procedure for augmenting hydrologic data. USGS, Prof. Pap. 434-E, pp. E1 E7.
- Mathier L., Perreault L., Bobée B. (1992). The uses of geometric and gamma related distributions for frequency analysis of water deficit. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 6(4), pp. 239-254.
- McMahon T.A., Mein R.G. (1986). *River and reservoir yield*. Water Resource Publication, CO, 368 pp.
- Meigh J., Tate E., McCartney M. (2002). Methods for identifying and monitoring river flow drought in southern Africa. In : *FRIEND 2002 – Regional Hydrology : Bridging the Gap between Research and Practice*. Proceedings of the Fourth International Conference held in Cape Town, South Africa, March 2002. IAHS Publ. 274, pp. 289-295.
- Merz R. et Blöschl G. (2004). Flood frequency regionalisation - spatial proximity vs. catchment attributes. *Journal of Hydrology*, Vol. 302(1-4), pp. 283-306.
- Merz R., Blöschl G. (2004). Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, Vol. 287(1-4), pp. 95-123.

- Merz R., Blöschl G. (2005). Flood frequency regionalisation - spatial proximity vs. catchment attributes. *Journal of Hydrology*, Vol. 302(1-4), pp. 283–306.
- Meylan P. (1986). Régionalisation de données entachées d'erreurs de mesure par krigeage structural - Application à la pluviométrie. *Hydrologie Continentale*, Vol. 1(1), pp. 25-34.
- Midgley D.C., Pitman W.V., Middleton B.J. (1994). Surface water resources of South Africa 1990. Water Research Commission, Report No 298/5.1/94, Pretoria, South Africa.
- Modarres R. (2008). Regional frequency distribution type of low flow in north of Iran by L-moments. *Water Resources Management*, Vol. 22(7), pp.823-841.
- Moss M.E., Tasker G.D. (1991). An intercomparison of hydrological network-design technologies. *Journal of Hydrological Sciences*, Vol. 36(3), pp. 209-221.
- Musiak K., Takahasi Y., Ando Y. (1984). Statistical analysis on effects of basin geology on river flow regime in mountainous areas of Japan. Proc. Fourth Cong. Asian & Pacific Reg. Div. Int. Assoc. Hydraul. Res., Bangkok, APD-IAHR/Asian Institute Technology, Vol. 2, pp. 1141-1150.
- Nathan R.J., McMahon T.A. (1990a). Identification of homogeneous regions for the purpose of regionalization. *Journal of Hydrology*, Vol. 121(1-4), pp. 217-238.
- Nathan R.J., McMahon T.A., (1990b). Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses. *Water Resources Research*, Vol. 26(7), pp. 1465-1473.
- Nathan R.J., McMahon T.A. (1990c). Practical aspects of low-flow frequency analysis. *Water Resources Research*, Vol. 26(9), pp. 2135-2141.
- Nathan R.J., McMahon T.A (1992). Estimating Low Flow Characteristics at Ungauged Catchments. *Water Resources Management*, Vol. 6(2), pp. 85-100.
- Nicolle P., Andreassian V., Sauquet E. (2012). Blending neighbor-based and climate-based information to obtain robust low-flow estimates from short time series. *Soumis à Water Resources Research*.
- 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.*, vol. X, No. 4, pp. 349-368.
- Olden J.D., Kennard M.J., Pusey B.J. (2011). A framework for hydrologic classification with a review of methodologies and applications in ecohydrology. *Ecohydrology*, Vol.5(4), pp. 503-518.
- Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andreassian V., Anctil F., Loumagen C. (2005). Which potential evapotranspiration input for lumped rainfall-runoff model ? Part 2 : Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, Vol. 303(1-4), pp. 290-306.
- Pearce A.J. (1990). Streamflow generation process, an austral view. *Water resources research*, Vol. 26(12), pp. 3037-3047.
- Pettitt A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, Vol. 28(2), pp. 126-135.

- Pfaundler M., Dübendorfer C., Zysset A. (2011). Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau. Hydrologie – régime d'écoulement niveau R (région). Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n° 1107, 113 pp.
- Piggott A.R., Moin S., Southam C. (2005). A revised approach to the UKIH method for the calculation of baseflow. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 50(5), pp. 1-920.
- Plasse J., Sauquet E. (2009). Interpolation des débits de référence d'étiage. Rapport d'étude, Cemagref, 166 pp.
- Potter K.W. (2001). A simple method for estimating baseflow at ungauged stations. *Journal of American Water Resources Association*, Vol. 37(1), pp. 177-184.
- Prudhomme C. (1995). Modèles synthétiques des connaissances en hydrologie - Application à la régionalisation des crues en Europe Alpine et Méditerranéenne. Ph.D Thesis, Université de Montpellier II, Cemagref, Division Hydrologie-Hydraulique, 422 pp.
- Pyrce R. (2004). Hydrological Low Flow Indices and their Use. Watershed Science Centre, Report No. 04-2004, 37 pp.
- Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S. (2008). Analysis of near surface atmospheric variables : Validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of applied meteorology and climatology*, Vol. 47(1), pp. 92-107.
- Reilly C.F., Kroll C.N. (2003). Estimation of low streamflow statistics using baseflow correlation. *Water Resources Research*, Vol. 39(9), n°1236.
- Ribatet M., Sauquet E., Gresillon J-M., Ouarda T.B.M.J. (2007). A regional Bayesian POT model for flood frequency analysis. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 21(4), pp. 327-339.
- Riggs H.C. (1972). Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey - Chapter B1 : Low-flow estimation. USGS publication.
- Rivera-Ramírez H.D., Warner G.S., Scatena F.N. (2002). Prediction of master recession curves and baseflow recessions in the Luquillo mountains of Puerto Rico. *Journal of American water resources association*, Vol. 38(3), pp. 793-704.
- Robson A., Reed D.W. (1999). Statistical Procedures for Flow Frequency Estimation. *Flood Estimation Handbook Vol.3*. NERC, Wallingford, U.K.
- Roche M. (1963). (Eds) *Hydrologie de surface*. Gauthier-Villars, 429 pp.
- Roche M. (1986). *Dictionnaire français d'hydrologie de surface avec équivalents en anglais, espagnol, allemand*. Masson Editeur, 288 pp.
- Rogers J.D., Armbruster J.T. (1990). Low flows and hydrologic droughts. *Surface Water Hydrology*, Geological Society of America, Boulder, CO, pp. 121-130.

- Sakovich V.M. (1990). The representation of minimum runoff series in Karelia and North-Western region. *Trans. Hydrolmeteorol. Center URSS* 308, pp. 129-136.
- Sauquet E., Gottschalk L., Leblois E. (2000). Mapping average annual runoff: a hierarchical approach applying a stochastic interpolation scheme. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 45(6), pp. 799-815.
- Sauquet E. (2006). Mapping mean annual river discharges: geostatistical developments for incorporating river network dependencies. *Journal of Hydrology*, Vol. 331(1-2), pp. 300-314.
- Sauquet E., Gottschalk L., Krasovskaia I. (2008). Estimating mean monthly runoff at ungauged locations : an application to France. *Hydrology Research*, Vol. 39(5-6), pp. 403-423.
- Sauquet E., Catalogne C. (2011). Comparison of catchment grouping methods for flow duration curve estimation at ungauged sites in France. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, pp. 2421-2435.
- Schreiber P., Demuth S. (1997). Regionalisation of low flows in southwest Germany. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 42(6), pp. 845-858.
- Shi P., Chen X., Qu S., Zhang Z., Ma J. (2010). Regional Frequency Analysis of Low Flow Based on L-Moments: Case Study in Karst Area, Southwest China. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 15(5), pp. 370-377
- Sivapalan M., Takeuchi K., Franks S.W., Gupta V.K., Karambi H., Lakshmi V., Liang X., McDonnell J.J., Mendiondo E.M., O'Connell P.E., Oki T., Pomeroy J.W., Schertzer D., Uhlenbrook S., Zehe E. (2003). IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 48(6), pp. 857-880.
- Skøien J. O., Blöschl G., Western A.W. (2003). Characteristic space scales and timescales in hydrology. *Water Resources Research*, Vol. 39(10), pp. 1304.
- Skøien J.O., Merz R., Blöschl G. (2006). Top-kriging - geostatistics on stream networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 10(2), pp. 277-287.
- Skop E., Loaiciga H.A. (1998). Investigating catchment hydrology and low flow characteristics using GIS. *Nordic Hydrology*, Vol. 29(2), pp. 105-128.
- Smakhtin V.Y., Watkins D.A. (1997). Low-flow estimation in South Africa. *Water Research Commission Report No. 494/1/97*, Pretoria, South Africa.
- Smakhtin V.Y. (2001). Low flow hydrology : a review. *Journal of hydrology*, Vol. 240(3-4), pp.147-186.
- Smith R.W. (1981). Rock type and minimum 7-day/10-year flow in Virginia streams. *Virginia Water Resource Research Center, Virginia Polytechny Institute and State University, Blacksburg, Bulletin*, Vol. 116, 43 pp.
- Snyder F.F. (1939). A concept of runoff-phenomena. *Eos Trans. AGU*, Vol. 20, pp. 725-738.
- Stedinger J.R., Thomas W.O. (1985). Low-flow frequency estimation using base-flow measurements. *USGS Scientific Investigations, Report 85-95*.

- Stedinger J.R., Tasker G.D. (1985). Regional hydrologic analysis 1. Ordinary, weighted and generalized least squares compared. *Water Resources Research*, Vol. 21(9), pp. 1421-1432.
- Stedinger J.R., Vogel R.M., Foufoula-Georgiou E. (1993). Frequency analysis of extreme events. In : Maidment, D.R. (Ed.), *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, New York (chap. 18).
- Stuckey M.H. (2006). Low-flow, base-flow, and mean-flow regression equations for Pennsylvania streams. *USGS Scientific Investigations, Report 2006-5130*, 84 pp.
- Tallaksen L.M. (1989). Analysis of time variability in recessions. *FRIENDS in Hydrology*, IAHS Publication No. 187, pp. 85-96.
- Tallaksen L.M. (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, Vol. 165(1-4), pp. 349-370.
- Tallaksen L.M., Hisdal, H. (1997). Regional analysis of extreme streamflow drought duration and deficit volume. *FRIEND – Regional Hydrology : Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management*, IAHS Publication No. 246, pp. 141–150.
- Tallaksen L.M., Madsen H., Clausen B. (1997). On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 42(1), pp. 15-33.
- Tallaksen L.M., Van Lanen H.A.J. (2004). (Eds) *Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. *Developments in Water Sciences 48*. Elsevier B.V., the Netherlands, 580 pp.
- Tasker G.D. (1980). Hydrologic regression with weighted least squares. *Water Resources Research*, Vol. 16(6), pp. 1107-1113.
- Tate E.L., Meigh J., Prudhomme C., McCartney M. (2000). Drought assessment in Southern Africa using river flow data. Rep. No. DFID 00/4, Institute of Hydrology, Wallingford, and Department for International Development (DFID), U.K.
- Therneau T.M., Atkinson B. (2010). Rpart : Recursive Partitioning, R package. <http://cran.r-project.org/web/packages/rpart/>
- Thomas D.M., Benson M.A. (1970). Generalization of Streamflow characteristics from drainage-basin characteristics. *USGS Water Supply, Paper 1975*.
- Toebe C., Strang D.D. (1964). On recession curves. 1. Recession equations. *J. Hydrol. NZ*, Vol. 3(2), pp. 2-15.
- Turc L., (1954). Water balance of soil: relation between precipitation, evapotranspiration and runoff. *Ann. Agron*, Vol. 5, pp. 491–595
- Vandewiele G.L., Elias A. (1995). Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalisation. *Journal of Hydrology*, Vol. 170(1-4), pp. 277-291.
- Vogel R.M., Stedinger J.R. (1985). Minimum variance streamflow record augmentation procedures. *Water Resources Research*, Vol. 21(5), pp. 715-723.

- Vogel R.M., Stedinger J.R. (1987). Generalized storage-reliability-yield relationships. *Journal of Hydrology*, Vol. 89(3-4), pp. 303-327.
- Vogel R.M., Kroll C.N. (1991). The value of streamflow record augmentation procedures in low-flow and flood-flow frequency analysis. *Journal of Hydrology*, Vol. 125(3-4), pp. 259-276.
- Vogel R.M., Kroll C.N. (1992). Regional geohydrologic-geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics. *Water Resources Research*, Vol. 28(9), pp. 2451-2458.
- Vogel R.M., Fennessey N.M. (1995). Flow duration curves – 2 : New interpretation and confidence intervals. *Journal of water resources planning and management*, Vol. 120(4), pp.485-504.
- Vogel R.M., Kroll C.N. (1996). Estimation of baseflow recession constants. *Water Resources Management*, Vol. 10(4), pp. 303-320.
- Wasson J.G., Chandesris A., Pella H., Souchon Y. (2001). Définition des hydroécotones françaises. Méthodologie de détermination des conditions de référence au sens de la Directive Cadre pour la gestion des eaux. Rapport d'étude, Irstea, 190 pp.
- Weisman R.N. (1978). Characterizing low flows using threshold levels. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, Vol. 104(2), pp. 231-235.
- Werner P.W., Sundquist K.J. (1951). On the groundwater recession curve for large watersheds. *IAHS Publication*, Vol. 33, pp. 202-212.
- WMO (2008). Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report n°50. 136 p.
- Wold S., Ruhe A., Wold H., Dunn W.J. (1984). The collinearity problem in linear regression – The partial least squares (PLS) approach to generalized inverses. *Journal on Scientific and Statistical Computing*, Vol. 5(3), pp. 735-743.
- Yevjevich V. (1967). An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Hydrologic Paper No. 23*, Colorado State University, Fort Collins.
- Yevjevich V. (1972). *Probability and Statistics in Hydrology*. Water Resources Publications, Fort Collins, CO, USA, 302 pp.
- Young A.R., Round C.E., Gustard A. (2000). Spatial and temporal variations in the occurrence of low flow events in the UK. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 4, pp. 35-45.
- Zelenhasic E., Salvai A. (1987). A method of streamflow drought analysis. *Water Resources Research*, Vol. 23(1), pp. 156-168.
- Zhang Z., Kroll C. (2007). The baseflow correlation method with multiple gauged sites. *Journal of Hydrology*, Vol. 347(3-4), pp. 371-380.
- Zucchini W., Adamson P.T. (1984). Assessing risk of deficiencies in streamflow. *Water Res. Comm. Rep.*, Vol. 91(2), Univ. of Stellenbosch, Stellenbosch, S.A.

ANNEXES

Annexe I - Glossaire des sigles et abréviations

Sigles

AISH	Association Internationale des Sciences Hydrologiques
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CARTHAGE	CARtographie Thématique des Agences de l'Eau
CEGUM	Centre d'études Géographiques de l'Université Paul Verlaine de Metz
CEH	Centre for Ecology and Hydrology
CNR	Compagnie Nationale du Rhône
DREAL	Direction Regionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
EDF	Electricité De France
FRIEND	Flow Regime from International Experiment and Network Data
LTHE	Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement
ONEMA	Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
ONU	Organisation des Nations Unies
SCHAPI	Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévention des Inondations
SPC	Service de Prévision des Crues
UNESCO	Organisation des Nation Unies pour l'Education, la Science et la Culture
UPMC	Université Pierre et Marie Curie
UR HBAN	Unité de Recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés
UR HHLY	Unité de Recherche Hydrologie Hydraulique
UR OHAX	Unité de Recherche Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie
USGS	United States Geological Survey
WMO	World Meteorological Organization

Abréviation pour les principales variables hydrologiques

BFI	Base Flow Index (Indice de débit de base)
CDC	Courbe de débits classés
defXA	Déficit de volume écoulé maximal annuel
dXA	Durée d'étiage maximale annuelle
Ic	Indice de courbure de la courbe de débits classés
MRC	Master Recession Curve (Courbe de récession maîtresse)
QA	Module interannuel
Q _f	Débit de fréquence au dépassement <i>f</i>
QMNA5	Débit moyen mensuel minimum annuel de fréquence quinquennale sèche (T = 5)
SI	Seasonality Index (Indice de saisonnalité)
SR	Seasonality Ratio (« Ratio de saisonnalité »)
VCN(<i>d</i>)T	Débit minimum sur <i>d</i> jours consécutifs de période de retour T

Autres abréviations

ACC	Analyse Canonique des Corrélations
ACP	Analyse en Composantes Principales
AEP	Approvisionnement en Eau Potable
CAH	Classification Ascendante Hiérarchique
CART	Classification par Arbre de Régression
CLC	Corine Land Cover
CV	Coefficient de Variation
DCE	Directive Cadre Européenne
DCR	Débit de Crise Renforcé
DOE	Débit Objectif d'étiage
HER	Hydro-Eco-Région
KUD	Kriging with Uncertain Data (Krigage avec données incertaines)
LEMA	Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques
MNT	Modèle Numérique de Terrain
PLS	Partial Least Squares (Moindres carrés partiels)
PUB	Prediction in Ungauged Catchments
RMSE	Root Mean Square Error (Racine carré des erreurs quadratiques moyenne)
SAGE	Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDAGE	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
WLS	Weighted Least Squares (Moindres carrés pondérés)

Annexe II - Liste des stations de l'échantillon de référence

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)	QMNA5 (m ³ /s)
A1050310	L'III à Altkirch	968318	2303539	233	0.5239
A1080330	L'III à Didenheim	972666	2313814	656	0.9567
A2042010	La Fecht à Wintzenheim [La Forge]	964699	2351826	211	0.746
A2073010	Le Strengbach à Ribeauvillé	968871	2367308	32	0.0718
A2122010	La Weiss à Kaysersberg [Fréland-Gare]	962817	2362093	117	0.5897
A2332110	La Lièpvrette à Lièpvre	967752	2375048	108	0.2526
A2512010	L'Andlau à Andlau	976475	2388518	42	0.1864
A2702010	La Bruche à Saulxures	956611	2389290	39	0.1892
A2732010	La Bruche à Russ [Wisches]	964781	2401012	228	1.2507
A2842010	La Mossig à Soultz-les-Bains	980097	2409591	163	0.4404
A3151010	La Moder à Schweighouse-sur-Moder [amont]	995918	2438896	282	0.9628
A3301010	La Moder à Schweighouse-sur-Moder [aval]	996842	2438573	622	2.4764
A3712010	La Sauer à Goersdorf [Liebfrauenthal]	996913	2453791	192	1.0518
A3832010	Le Seltzbach à Niederroedern	1018642	2449140	202	0.1933
A3902010	La Lauter à Wissembourg [Weiler]	1006888	2463895	278	1.5321
A4050620	La Moselle à Rupt-sur-Moselle	925001	2332341	153	0.6511
A4142010	La Moselotte à Vagney [Zainvillers]	926469	2342030	187	1.0914
A4173010	La Cleurie à Cleurie	924415	2348280	68	0.4978
A4362030	La Vologne à Cheniménil [2]	917522	2356829	355	1.7675
A4632010	L'Avière à Frizon [Basse Frizon]	898997	2373593	106	0.2759
A5261010	Le Madon à Mirecourt	881861	2373834	382	0.7444
A5422010	Le Brenon à Autrey	880870	2399220	139	0.0335
A5431010	Le Madon à Pulligny	880252	2400790	940	1.2722
A6001010	La Meurthe à Fraize	946780	2364245	69	0.5517
A6051020	La Meurthe à Saint-Dié	942720	2375131	374	1.4688
A6571110	La Vezouze à Lunéville	906121	2407670	559	1.0478
A6621210	La Mortagne à Sainte-Hélène [Autrey]	922640	2375177	100	0.4768
A6731220	La Mortagne à Gerbéviller	909528	2395840	493	1.177
A6761010	La Meurthe à Damelevières	898715	2403747	2280	7.0479
A6953010	L'Amézule à Lay-Saint-Christophe	884019	2423461	85	0.0324
A7122010	L'Esch à Jezainville	871996	2436180	231	0.0762
A7642010	La Petite Seille à Château-Salins	906248	2432493	143	0.2703
A7821010	La Seille à Nomeny	885402	2439282	925	1.1081
A7881010	La Seille à Metz	881329	2462728	1280	1.176
A8732010	La Canner à Koeningmacker	885829	2495470	110	0.1771
A9001050	La Sarre Blanche à Laneuveville-lès-Lorquin	944169	2416449	64	0.4239
A9013050	La Sarre Rouge à Vasperviller	948357	2415084	90	0.5935
A9091050	La Sarre à Keskastel	944301	2451589	878	1.5764
A9132050	L'Albe à Sarralbe [Rech]	942216	2452909	407	0.3079
A9221010	La Sarre à Sarreinsming	948468	2464885	1760	2.7166
A9352050	L'Eichel à Oermingen	950770	2455401	280	0.4422
A9402110	L'Horn à Bousseviller	974826	2471043	95	0.3928

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)	QMNA5 (m ³ /s)
A9532010	La Rosselle à Forbach [Petite-Rosselle]	929732	2474991	190	1.2077
A9862010	La Nied Allemande à Varize	899913	2468395	364	0.3578
A9942010	La Nied à Bouzonville	905763	2486357	1160	1.4208
B0220010	La Meuse à Goncourt	843440	2365292	364	0.0682
B1092010	Le Mouzon à Circourt-sur-Mouzon [Villars]	850140	2374188	405	0.0954
B1150010	La Meuse à Domrémy-la-Pucelle	847085	2387597	1031	0.7033
B4601010	La Chiers à Chauvency-le-Château	815688	2506183	1700	5.7066
B4631010	La Chiers à Carignan	804088	2518371	1967	7.3823
B5322010	La Vence à la Francheville	771604	2528263	124	0.48
D0206010	La Solre à Ferrière-la-Grande	718596	2586300	119	0.3164
E3511210	La Lys à Ligny	588444	2614256	84	0.4797
E4306010	La Hem à Tournehem-sur-la-Hem [Guémy]	578397	2645262	105	0.3049
E5300210	La Liane à Wirwignes	559694	2632000	100	0.2801
E5400310	La Canche à Brimeux	563994	2606020	894	7.1735
E5505720	L'Authie à Dompierre-sur-Authie	570102	2590007	784	4.4302
E6406010	L'Avre à Moreuil	610785	2530324	642	1.0706
G1003010	L'Yères à Touffreville-sur-Eu	528391	2556416	267	1.3485
H0100010	La Seine à Nod-sur-Seine	767439	2309604	371	0.4042
H0100020	La Seine à Plaines-Saint-Lange	760029	2335130	704	1.9605
H0321030	L'Ource à Autricourt	770035	2335726	548	0.4226
H0503010	L'Hozain à Buchères [Courgerennes]	731705	2362260	249	0.0418
H1503910	L'Herbissonne à Allibaudières	730434	2399428	87	0
H1513210	La Barbuise à Pouan-les-Vallées	727531	2394580	187	0.0255
H1603010	La Superbe à Saint-Saturnin	715670	2402866	320	0.0937
H1713010	L'Ardusson à Saint-Aubin	690514	2386813	159	0.0451
H1932020	La Voulzie à Jutigny	666434	2388053	280	0.9578
H2062010	Le Beuvron à Ouagne [Champmoreau]	687315	2268925	264	0.2375
H2073110	Le Sauzay à Corvol-l'Orgueilleux	680799	2270671	81	0.2801
H2083110	La Druyes à Surgy	688303	2279517	194	0.2771
H2142010	La Cure à Domecy-sur-Cure [Crescent Bois de Cure]	718657	2266517	403	1.2551
H2182010	La Cure à Arcy-sur-Cure	706910	2289962	1180	3.208
H2322010	Le Serein à Bierre-lès-Semur	747475	2270520	268	0.0339
H2342020	Le Serein à Chablis [Pont de la déviation]	708712	2314709	1119	0.1854
H2473010	L'Armanche à Chessy-les-Prés	716285	2335500	480	0.3219
H2501020	L'Yonne à Joigny [passerelle]	676875	2331450	8880	17.5265
H2513110	Le Tholon à Champvallon	676120	2327100	131	0.2722
H3102010	L'Ouanne à Toucy	671698	2304138	153	0.0475
H3122010	L'Ouanne à Charny	656461	2320908	562	0.6293
H3122020	L'Ouanne à Gy-les-Nonains	638081	2327779	883	0.8747
H3203310	Le Puisieux à Saint-Hilaire-sur-Puisieux	627234	2324836	94	0
H4022020	L'Essonne à Guigneville-sur-Essonne [La Mothe]	600794	2385005	875	2.0205
H4033010	La Juine à Méréville	582571	2370448	199	0.6298
H4042010	L'Essonne à Ballancourt-sur-Essonne	602712	2393314	1870	5.0789
H4223110	La Remarde à Saint-Cyr-sous-Dourdan	577600	2396770	147	0.2442
H4252010	L'Orge à Morsang-sur-Orge	600344	2407668	922	1.6028
H4322030	L'Yerres à Courtomer [Paradis]	641607	2405678	429	0.0291

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km²)	QMNA5 (m³/s)
H5062010	Le Rognon à Doulaincourt-Saucourt	809691	2375429	614	0.7433
H5102030	La Saulx à Mognéville	795731	2424071	477	1.1564
H5122350	L'Ornain à Val-d'Ornain [Varney]	802967	2427278	840	0.6581
H5142610	La Chée à Villotte-devant-Louppy [Villote devant Louppy]	799358	2435175	113	0.0791
H5142620	La Chée à Bettancourt-la-Longue	787212	2427590	215	0.1081
H5173110	Le Bruxenelle à Brusson	773670	2419143	136	0.1015
H5213310	La Soude à Soudron	737010	2428345	105	0.0309
H5302010	Le Surmelin à Saint-Eugène	687445	2448088	454	0.8324
H5412010	Le Petit Morin à Montmirail	688048	2430097	354	0.5167
H5732010	Le Grand Morin à Pommeuse	649750	2424590	770	2.2493
H6023210	L'Ante à Châttrices	788960	2453590	113	0.0581
H6102010	L'Aire à Beausite [Amblaincourt]	810375	2444500	282	0.2342
H6113010	La Cousances à Aubréville	800649	2464384	166	0.099
H6122010	L'Aire à Varennes-en-Argonne	796600	2473320	627	0.484
H6162010	L'Aire à Chevières	786685	2484880	1000	0.8779
H6313020	La Suipe à Orainville	722557	2488668	802	0.6923
H6402010	La Vesle à Bouy	747213	2456445	286	0.0765
H6423010	L'Ardres à Fismes	697268	2479628	297	0.4345
H7033010	Le Thon à Origny-en-Thiérache	721043	2545585	258	0.9915
H7162010	La Serre à Pont à Bucy	682899	2522311	1630	4.738
H7602010	La Brèche à Nogent-sur-Oise	609070	2476662	468	1.1687
H7713010	Le Petit Thérain à Saint-Omer-en-Chaussée	575557	2503550	212	1.0424
H7742010	Le Thérain à Beauvais	582840	2491628	747	2.9336
H7742020	Le Thérain à Maysel	603020	2475850	1200	4.0106
H7833540	L'Ysieux à Luzarches [Bertinval]	605790	2459500	57	0.0917
H7853010	Le Sausseron à Nesles-la-Vallée	587907	2458713	101	0.309
H7913020	La Mauldre à Beynes [Mairie]	566235	2428753	216	0.4419
H8012010	L'Epte à Gournay-en-Bray	555876	2497429	247	0.1933
H8042010	L'Epte à Fourges	549520	2458210	1403	4.5139
H8043310	L'Aubette de Magny à Ambleville	552771	2461641	99	0.3011
H8212010	L'Andelle à Vascoeuil	530819	2494597	377	2.3639
H9021010	L'Eure à Saint-Luperce	522651	2383883	330	0.208
H9202010	L'Avre à Acon	511450	2418390	495	0.9221
H9222010	L'Avre à Muzy	527198	2420025	880	1.2768
H9402030	L'Iton à Normanville	513331	2454273	1031	2.1536
H9923010	L'Austreberthe à Duclair [Bas Aulnay]	495549	2501158	209	1.2248
I0011010	La Risle à Rai	471010	2417870	149	0.4594
I1203010	La Calonne aux Authieux-sur-Calonne	450725	2479720	175	1.0825
I2021010	La Dives à Beaumais	422957	2435949	287	0.4114
I2051040	La Dives au Mesnil-Mauger	426100	2454885	638	0.9057
I3131010	L'Orne à Rabodanges	404900	2427000	995	0.8662
I4032010	La Seulles à Tierceville	391300	2480892	254	0.3525
I5053010	La Souleuvre à Carville	363687	2443625	115	0.0524
I7913610	Le Thar à Jullouville	315689	2427628	72	0.1449
I9221010	La Sélune à Ducey [Vézins]	336700	2404900	720	1.7435
J0014010	Le Nançon à Lécousse [Pont aux Anes]	338251	2381078	67	0.1827

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)	QMNA5 (m ³ /s)
J0144010	La Loysance à Saint-Ouen-la-Rouërie	320847	2387708	82	0.2006
J0323010	Le Guyoult à Epiniac	302691	2399536	63	0.0067
J0621610	La Rance à Guenroc [Rophemel]	274100	2377700	380	0.0958
J0626610	Le Néal à Médréac	274999	2372787	82	0.0082
J1103010	L'Arguenon à Jugon-les-Lacs	254343	2388480	104	0.0222
J1114010	La Rosette à Mégrit	260376	2383896	102	0.0158
J1813010	Le Leff à Quemper-Guézennec	202372	2425568	339	0.2712
J2233010	Le Léguer à Belle-Isle-en-Terre	176806	2409699	260	0.5699
J2514010	Le Dourduff à Garlan	150047	2418532	45	0.0658
J2603010	Le Jarlot à Plougonven	147389	2414104	44	0.1543
J2605410	Le Tromorgant à Plougonven	147607	2414123	42	0.1143
J2723010	La Penze à Taulé [Penhoat]	138459	2416959	141	0.3465
J3024010	Le Guillec à Trézilidé	127486	2421218	43	0.1663
J3205710	L'Aber Wrac'h au Drennec	105685	2413594	24	0.0875
J3213020	L'Aber-Benoit à Plabennec [Loc Maria]	102328	2413082	27	0.1028
J3323020	L'Aber Ildut à Brélès [Keringar]	81466	2407253	90	0.2622
J3514010	La Mignonne à Irvillac [Pont Mell]	115220	2396689	70	0.1575
J4211910	L'Odet à Ergué-Gabéric [Tréodet]	122915	2353506	205	0.4175
J4214510	Le Langelin à Briec [Pont D 72]	129481	2363792	7	0.0087
J4224010	Le Jet à Ergué-Gabéric	126454	2351318	107	0.3043
J4231911	L'Odet à Quimper [Kervir virtuelle]	121750	2352340	329	0.7721
J4313010	Le Steir à Guengat [Ty Planche]	116919	2356398	179	0.3466
J4614010	Le Ster Goz à Bannalec [Pont Meya]	145275	2340784	70	0.2109
J4742010	L'Éllé à Arzano [Pont Ty Nadan]	166320	2338786	578	1.0117
J4902010	La Laïta à Quimperlé [ancienne]	160403	2334885	831	1.5649
J5102210	Le Scorff à Plouay [Pont Kerlo]	170035	2338665	300	0.6049
J5412110	Le Blavet à Mûr-de-Bretagne [Guerlédan]	202049	2368156	620	0.9891
J5613010	L'Evel à Guénin	203163	2335808	316	0.0516
J5704810	Le Coët-Organ à Quistinic [Kerdec]	186330	2337444	48	0.0963
J6213010	Le Loch à Brech	200728	2316086	179	0.1697
J7083110	Le Chevré à la Bouëxière [Le Drugeon]	314876	2360743	153	0.0213
J7353010	Le Meu à Montfort-sur-Meu [L'Abbaye]	281446	2356379	468	0.0569
J7483010	La Seiche à Bruz [Carcé]	297327	2343403	820	0.0498
J7633010	Le Semnon à Bain-de-Bretagne [Rochereuil]	303300	2325354	383	0.0317
J7824010	L'Aron à Grand-Fougeray [La Bernardais]	297959	2309261	118	0.0035
J7973010	Le Canut Sud à Saint-Just [La rivière Colombel]	276705	2317415	37	0.0074
J8363110	L'Yvel à Loyat [Pont D 129]	249033	2343342	315	0.0114
J8433010	La Claie à Saint-Jean-Brévelay	222912	2326137	137	0.1397
J8602410	L'Aff à Paimpont [Pont du Secret]	265728	2341008	30	0
J8813010	L'Arz à Molac [Le Qinquizio]	242411	2312794	148	0.1308
K0010010	La Loire à Usclades-et-Rieutord [Rieutord]	744154	1976301	62	0.1721
K0030010	La Loire à Issarlès [Pont de la Borie]	735522	1981606	229	0.9633
K0403010	Le Lignon du Velay au Chambon-sur-Lignon	754765	2008282	139	0.2234
K0433010	Le Lignon Vellave à Yssingaux [Versilhac-la-Valette]	745587	2019587	350	0.5035
K0454010	La Dunières à Sainte-Sigolène [Vaubarlet]	747547	2025563	228	0.4641
K0523010	L'Ance du Nord à Saint-Julien-d'Ance [Laprat]	725670	2035417	354	0.4904

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km²)	QMNA5 (m³/s)
K0567520	La Semène à Saint-Didier-en-Velay [Le Crouzet]	749970	2036540	134	0.1951
K0568310	L'Ecotay à Marlhès	760838	2032444	5	0.0087
K0624510	Le Bonson à Saint-Marcellin-en-Forez [Le Bled]	744707	2053910	104	0.0098
K0663310	La Coise à Larajasse [Le Nézel]	770670	2072115	61	0.0341
K0673310	La Coise à Saint-Médard-en-Forez [Moulin Brûlé]	759050	2069540	181	0.0711
K0724510	Le Chanasson à Civens [La rivière]	748482	2089138	13	0.0015
K0733220	Le Lignon de Chalmazel à Chalmazel [Chevelières]	719201	2078543	61	0.3257
K0763310	Le Vizezy à Essertines-en-Châtelneuf [La Guillanche]	731212	2069300	43	0.0556
K0943010	Le Rhins à Amplepuis	754533	2111071	114	0.0905
K0974010	Le Gand à Neaux	743449	2107749	85	0.0117
K1004510	Le Rhodon à Perreux	737919	2116808	32	0.0072
K1173210	L'Arconce à Montceaux-l'Étoile	731835	2152310	599	0.3984
K1273110	Le Ternin à Tavernay [Pré Charmoy]	746170	2223050	257	0.162
K1284810	La Selle à la Celle-en-Morvan [Polroy]	741420	2224470	138	0.2345
K1341810	L'Arroux à Rigny-sur-Arroux	730234	2171909	2277	1.3045
K1383010	La Bourbince à Vitry-en-Charollais	733758	2164997	819	0.9441
K1503010	La Besbre à Châtel-Montagne	703911	2126105	135	0.2717
K1524010	Le Barbenan au Breuil	704290	2133544	121	0.1298
K1724210	La Dragne à Vandenesse	708703	2213318	115	0.122
K1764020	La Canne à Saint-Gratien-Savigny [Moulin de Challuy]	700310	2213510	182	0.0567
K1775510	L'Andarge à Diennes-Aubigny [Les Pérats]	691600	2213600	67	0.0057
K1914510	L'ixeure à la Fermeté	676000	2218600	115	0.0449
K1943010	La Nièvre de Champlemy à Saint-Aubin-les-Forges	666100	2237850	192	0.3946
K1954010	La Nièvre d'Arzembouy à Poiseux [Poisson]	669520	2237580	224	0.2321
K2010820	L'Allier à Laveyrune [Rogleton 2]	724008	1958128	49	0.0684
K2064010	Le Langouyrou à Langogne	720550	1971110	66	0.178
K2123010	Le Chapeauroux à Châteauneuf-de-Randon [Hermet]	708120	1964460	109	0.0892
K2134010	La Clamouze à Chastanier	712460	1970290	51	0.0131
K2163110	Le Grandrieu à Grandrieu	702950	1977300	73	0.1366
K2210810	L'Allier à Monistrol-d'Allier	703354	1997195	988	0.7357
K2233020	L'Ance du Sud à Monistrol-d'Allier [Pouzàs]	702604	1997200	225	0.3078
K2254010	La Seuge à Saugues	695820	1997465	122	0.1823
K2283110	La Desges à Chanteuges	694242	2008684	140	0.3348
K2363010	La Senouire à Paulhaguet [La Frièrre]	693180	2022600	155	0.1465
K2514010	L'Allanche à Joursac [Pont du Vernet]	650980	2015520	157	0.5191
K2523010	L'Alagnon à Joursac [Le Vialard]	652500	2015500	310	0.9875
K2534010	L'Arcueil à Massiac [Bousselorgue]	666492	2027105	99	0.0421
K2544010	L'Allagnonette à Massiac	667576	2028239	66	0.0129
K2593010	L'Alagnon à Lempdes	672702	2042859	984	1.3419
K2644010	L'Ailloux à Manglieu [Lavaur]	678500	2068630	73	0.0169
K2674010	La Couze Chambon à Montaigut-le-Blanc [Champeix]	658920	2065157	159	0.595
K2783010	La Morge à Maringues [Côte Rouge]	675876	2101512	713	1.2643
K2871910	La Dore à Saint-Gervais-sous-Meymont [Maison du Parc]	699234	2077360	800	1.449
K2884010	La Faye à Olliergues [Giroux-Faye]	698220	2078699	72	0.3406
K2944010	Le Couzon à Courpière [Le Salet]	695712	2083463	75	0.2304
K3153010	L'Andelot à Loriges	677260	2141727	210	0.1854

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km²)	QMNA5 (m³/s)
K3222010	La Sioule à Pontgibaud	639820	2092680	353	1.2754
K3264010	La Saunade à Pontaumur	626203	2096769	112	0.1131
K3292020	La Sioule à Saint-Priest-des-Champs [Fades-Besserve]	635558	2108265	1300	2.2219
K3374710	Le Boublon Lagées à Fourilles	666449	2138525	71	0.0133
K4094010	Le Nohain à Saint-Martin-sur-Nohain [Villiers]	649896	2261994	473	1.0136
K4443010	L'Ardoux à Lailly-en-Val	548950	2305560	155	0.0283
K4873120	La Brenne à Villedômer [Bas Villaumay Amont]	491780	2286360	263	0.2794
K5183010	La Tardes à Évaux-les-Bains	608370	2131589	854	0.1522
K5200910	Le Cher à Teillet-Argenty	615500	2138050	1600	0.4845
K5653010	L'Auron à Bourges [L'Ormediot]	608476	2226352	585	0.2288
K6402520	La Sauldre à Salbris [Valaudran]	577054	2269391	1200	1.2356
K6492510	La Sauldre à Selles-sur-Cher	539180	2254880	2254	1.6268
K7202610	L'Indre à Ardenes	561325	2193659	697	0.4821
K7312610	L'Indre à Saint-Cyran-du-Jambot	508056	2224821	1712	1.6451
K7424010	L'Olivet à Beaumont-Village [1]	514688	2243163	76	0.056
K7514010	L'Échandon à Saint-Branches	485127	2250845	127	0.0543
L0010610	La Vienne à Peyrelevade [Servières]	574363	2078033	59	0.2308
L0010620	La Vienne à Peyrelevade [La Rigole du Diable]	573397	2077781	71	0.2203
L0093010	La Combade à Masléon	539113	2085454	188	0.787
L0314010	La Vige à Saint-Martin-Sainte-Catherine	541225	2106498	134	0.5048
L0563010	La Briance à Condat-sur-Vienne [Chambon Veyrinas]	514694	2084646	597	1.226
L0624010	L'Aixette à Aix-sur-Vienne	506105	2086505	152	0.0877
L0813010	La Glane à Saint-Junien [Le Dérot]	489758	2102428	288	0.3297
L0914020	La Gorre à Chaillac-sur-Vienne	487465	2094687	186	0.1541
L2253010	La Vonne à Cloué [Pont de Cloué]	432448	2161739	320	0.1985
L2443010	L'Auxance à Quinçay [Rochecourbe]	440800	2182490	262	0.1662
L4010710	La Creuse à Felletin	586857	2098693	165	0.5153
L4033010	La Rozeille à Moutier-Rozeille [Aubusson]	587644	2103530	186	0.1649
L4321710	La Petite Creuse à Genouillac	573550	2151950	558	0.2228
L4411710	La Petite Creuse à Fresselines [Puy Rageaud]	550194	2154188	850	0.5051
L4653010	La Bouzanne à Velles [Forges]	545693	2185346	434	0.3019
L5034010	L'Ardour à Folles [Forgefer]	534981	2122179	131	0.3439
L5101810	La Gartempe à Folles [Bessines]	530170	2124131	570	1.3649
L5134010	La Semme à Droux	507735	2128547	177	0.1605
L5223020	Le Vincou à Bellac [2]	498358	2126862	286	0.2795
L5323010	La Brame à Oradour-Saint-Genest	496870	2139941	235	0.0773
L6202030	La Claise au Grand-Pressigny [Étableau 2]	484436	2212999	897	0.3151
L6216920	Le Brignon à Paulmy [2]	485130	2221280	75	0.0908
L8213010	Le Thouaret à Luzay [La Planche]	407150	2215902	308	0.0022
L8343010	L'Argenton à Massais [Moulin Bernard]	395241	2225473	634	0.0289
M0243010	L'Orne Saosnoise à Montbizot [Moulin Neuf Cidrerie]	441415	2353322	510	0.2681
M0361510	L'Huisne à Nogent-le-Rotrou [Pont de bois]	487054	2369931	827	3.0269
M0500620	La Sarthe à Spay	436195	2325979	5285	6.8717
M0633010	L'Erve à Auvers-le-Hamon [Moulin la Roche]	398260	2325437	380	0.1945
M0680610	La Sarthe à Saint-Denis-d'Anjou [Beffes]	396180	2314558	7380	8.5611
M1034020	L'Ozanne à Trizay-lès-Bonneval [Prémoteux]	526486	2357125	268	0.1029

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km²)	QMNA5 (m³/s)
M1213010	La Braye à Valennes [La Caboche]	486825	2336100	270	0.4008
M1214010	Le Couëtron à Souday [Glatigny]	489159	2340466	85	0.077
M1354020	L'Escotais à Saint-Paterne-Racan	460299	2290931	67	0.0494
M1531610	Le Loir à Durtal	406181	2299729	7920	7.8401
M3253110	L'Aron à Moulay	380103	2367470	188	0.1391
M3313010	L'Ernée à Ernée	356555	2371595	115	0.3366
M3323010	L'Ernée à Andouillé [Les Vaugeois]	368397	2356631	375	0.4699
M3340910	La Mayenne à l' Huisserie [Bonne]	370437	2339267	2890	2.8307
M3423010	La Jouanne à Forcé	373173	2341528	410	0.0999
M3504010	Le Vicoin à Nuillé-sur-Vicoin	367211	2336626	235	0.0508
M3600910	La Mayenne à Château-Gontier	372720	2317530	3910	3.1662
M3630910	La Mayenne à Chambellay	372994	2302169	4160	3.4496
M3771810	L'Oudon à Châtellais [Marcillé]	355490	2313351	734	0.0234
M3774010	Le Chéran à la Boissière	351076	2314642	85	0.0109
M5102010	Le Layon à Saint-Georges-sur-Layon	394615	2247235	250	8.00E-04
M5222010	Le Layon à Saint-Lambert-du-Lattay [Pont de Bézigon]	375608	2261625	920	0.0306
M6013010	L'Evre à la Chapelle-Saint-Florent [Pont Dalaine]	343871	2262224	460	0.0122
M6014010	Le Beuvron à Andrezé [Tuvache]	350046	2247278	38	0.006
M6323010	L'Erdre à Candé [La Grée]	345293	2289926	169	0.0338
M6333020	L'Erdre à Nort-sur-Erdre [Moulin de Vault]	312223	2280917	472	0.0814
M7112410	La Sèvre Nantaise à Tiffauges [La Moulinette]	337730	2230090	814	0.2329
M7453010	La Maine à Remouillé	318423	2235074	597	0.0142
M8205020	L'Ognon aux Sorinières [Villeneuve]	306570	2242980	147	0
N0113010	Le Falleron à Falleron	292270	2217640	31	0.0012
N3001610	Le Grand Lay à Saint-Prouant [Monsireigne]	348880	2199730	131	0.0342
N3024010	Le Louing à Chantonay [St-Philbert du Pont Charrault]	346980	2190840	120	0.0168
N3308210	La Doulaye à Moutiers-sur-le-Lay	329323	2180948	38	0
O0010040	La Garonne à Saint-Béat [2]	465449	1769443	640	7.4202
O0015310	Le Maudan à Fos	469828	1764001	38	0.2506
O0105110	La Neste de Cap de Long à Aragnouet [Les Edelweiss]	398647	1760475	5	0.0109
O0126210	La Neste de Rioumajou à Tramezaïgues [Maison Blanche]	433190	1755630	64	0.4436
O0362510	Le Salat à Soueix-Rogalle [Kercabanac]	508071	1767945	379	4.0597
O0384010	L'Arac à Soulan [Freychet]	509579	1766866	169	1.5311
O0485110	Le Lachein à Balaguères [Baget - Las Hountas]	493238	1773375	13	0.0634
O0525010	La Gouarège à Cazavet [Aliou]	494778	1777243	12	0.0221
O0554010	L'Arbas à Castelbiague [Pont de Prades]	485062	1783633	98	0.2896
O0584310	Le Lens à Betchat	494546	1789356	62	0.0261
O0624010	Le Volp à Montberaud [Sainte-Croix-Volvestre]	502630	1794306	91	0.1112
O0744030	L'Arize au Mas-d'Azil	520412	1787186	215	0.5429
O0794010	L'Arize à Rieux [Volvestre]	506972	1805133	442	0.5922
O1115010	L'Artigue à Auzat [Cibelle]	524405	1745647	24	0.1759
O1432930	L'Hers à Bélesta [source de Fontestorbes]	566458	1765595	85	0.804
O1442910	L'Hers Vif au Peyrat	567198	1772448	190	0.8738
O1464010	Le Blau à Chalabre	573783	1775037	67	0.0276
O1484310	La Touyre à Lavelanet [2]	560270	1770997	59	0.2918
O1484320	La Touyre à Montferrier [2]	554117	1765141	29	0.255

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)	QMNA5 (m ³ /s)
O1576910	Le ruisseau des Gourds à Limbrassac	559300	1778314	6	0
O1584610	Le Douctouyre à Vira [Engraviès]	553958	1782472	134	0.0841
O1634010	La Vixiège à Belpech	552237	1800089	196	0.0143
O1652920	L'Hers Vif à Mazères [nouvelle]	547306	1805179	1330	2.0931
O1844020	La Lèze à Lézat-sur-Lèze	520019	1809214	237	0.0608
O2215010	La Saune à Quint-Fonsegrives	536236	1841736	106	0.0133
O2725010	La Lauze à Sémézies-Cachan [Faget-Abbatial]	469855	1834191	36	0
O2825010	Le Pest à Laréole [Cologne]	492578	1859802	20	0
O3006710	La Goudech à Saint-Maurice-de-Ventalon [La Cépède]	715880	1927760	10	0.0152
O3011010	Le Tarn au Pont-de-Montvert [Fontchalettes]	713110	1929950	67	0.1545
O3015520	Le Rieumalet au Pont-de-Montvert	712390	1930410	20	0.0711
O3031010	Le Tarn à Bédouès [Cocures]	702293	1928006	189	0.42
O3035210	Le Briançon aux Bondons [Cocures]	701835	1929101	25	0.037
O3064010	Le Tarnon à Florac	700710	1924510	124	0.1302
O3084320	La Mimente à Florac	701130	1924630	125	0.165
O3121010	Le Tarn à Montbrun [Pont de Montbrun]	692591	1926545	621	0.8717
O3141010	Le Tarn à Mostuéjous [La Muse]	670860	1912540	925	5.5754
O3165010	La Brèze à Meyrueis	688160	1909170	36	0.034
O3194010	La Jonte à Meyrueis [aval]	687250	1909430	102	0.147
O3314010	La Dourbie à Dourbies [Le Mazet-récent]	690589	1897165	43	0.1458
O3364010	La Dourbie à Nant [Pont de Gardies]	676468	1897287	300	1.2624
O3394030	La Dourbie à Millau [Massebiau 3]	663540	1900355	548	3.0219
O3401010	Le Tarn à Millau [2]	659237	1899272	2170	8.8961
O3424010	Le Cernon à Saint-Georges-de-Luzençon [aval]	652181	1897496	220	0.7011
O3454310	La Muze à Montjoux [Saint-Hippolyte]	646915	1897988	112	0.0772
O3594020	Le Dourdou à Vabres-l'Abbaye [Le Poujol]	639543	1884038	656	1.8307
O4102510	L'Agout à Fraisse-sur-Agout	638444	1846445	48	0.0929
O4194310	Le Gijou à Vabre [Rocalé]	606470	1853441	208	0.8405
O4335010	L'Arnette à Mazamet [Moulin de l'Oule]	603371	1830649	57	0.2048
O4394010	Le Thore à Labruguière	596695	1836943	550	1.8971
O4704030	Le Dadou à Paulinet [Saint-Jean-de-Jeanne]	608382	1868950	72	0.0556
O4984320	Le Tescou à Saint-Nauphary	527348	1885368	287	0.0123
O5055010	Le Serre à Coussergues [Resuenhe]	642715	1935107	110	0.1158
O5092520	L'Aveyron à Onet-le-Château [Rodez]	622629	1929094	556	0.5831
O5192520	L'Aveyron à Villefranche-de-Rouergue [Recoules]	577523	1927498	1042	1.0575
O5224010	L'Alzou à Villefranche-de-Rouergue [barrage Cabal]	577091	1928453	199	0.0421
O5284310	La Serène à Saint-André-de-Najac [Canabral]	576566	1912000	103	0.0796
O5292510	L'Aveyron à Laguépie [1]	570939	1905684	1582	1.5282
O5312910	Le Viaur à Arques	637142	1923154	138	0.1547
O5344010	Le Vioulou à Salles-Curan [Trébons-Bas]	638138	1912229	57	0.0233
O5424010	Le Céor à Centrès [Estrebaldie]	605576	1904693	160	0.2284
O5464310	Le Giffou à Saint-Just-sur-Viaur [La Fabrèguerie]	607872	1900836	175	0.1676
O5534010	Le Lézert à Saint-Julien-du-Puy [Port de la Besse]	588779	1906801	222	0.2093
O5685010	La Bonnette à Saint-Antonin-Noble-Val	552893	1908064	179	0.0529
O5754020	La Vère à Bruniquel [La Gauterie]	546739	1891638	311	0.0532
O5854010	La Lère à Réalville	531439	1903229	366	0.0336

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)	QMNA5 (m ³ /s)
O6125010	La Petite Barguelonne à Montcuq	508528	1926520	62	0
O6134010	La Barguelonne à Valence [Fourquet]	492816	1908524	477	0.0252
O6793310	La Gélise à Mézin [Courbian]	432448	1899333	813	0.2569
O6804630	L'Osse à Castex [Mielan]	436738	1823996	10	8.00E-04
O7011510	Le Lot à Sainte-Hélène	700190	1948030	189	0.3105
O7035010	Le Bramont à Saint-Bauzile [Les Fonts]	690350	1941820	116	0.1694
O7041510	Le Lot à Balsièges [Bramonas]	686700	1943100	465	0.7525
O7085010	Le Coulagnet à Marvejols	677370	1950490	83	0.0115
O7101510	Le Lot à Banassac [La Mothe]	668660	1938330	1160	1.5757
O7234010	La Rimeize à Rimeize	677970	1974400	116	0.1938
O7245010	Le Chapouillet à Rimeize [Chassignoles]	675900	1977240	67	0.0924
O7265010	La Limagnole à Fontans [Saint-Alban]	680970	1975690	76	0.1251
O7272510	La Truyère au Malzieu-Ville [Le Soulier]	680007	1982106	542	0.8558
O7354010	La Lander à Saint-Georges	662432	2001559	310	0.1955
O7404010	Le Bes à Marchastel [Gour du Gou - 2]	661400	1959990	31	0.0316
O7444010	Le Bès à Saint-Juéry	659260	1980900	283	0.6762
O7635010	La Bromme à Brommat [EDF]	627222	1981284	111	0.2305
O7874010	Le Dourdou à Conques	605161	1954034	521	0.3298
O7944020	Le Rieu-Mort à Viviez [2]	590051	1951658	149	0.1932
O8113510	Le Célé à Figeac [Merlançon]	572041	1954232	676	1.5807
O8133520	Le Célé à Orniac [Les Amis du Célé]	547697	1946800	1194	1.7636
O8255010	Le Vert à Labastide-du-Vert [Les Campagnes]	512107	1946199	117	0.0791
O8344020	La Thèze à Boussac	495016	1947324	102	0.06
O8394310	La Lémance à Cuzorn	489404	1949347	234	0.364
O9196210	La Cadanne à Pondaurat	408219	1949998	10	0.0051
O9785310	La Jalle de Ludon au Pian-Médoc	361409	1999742	23	0.0051
P0010010	La Dordogne à Saint-Sauves-d'Auvergne	627370	2067090	87	1.1526
P0084010	Le Chavanon à Messeix [La Cellete]	611643	2071668	362	0.9354
P0115010	La Burande à la Tour-d'Auvergne	628366	2058729	20	0.24
P0115020	La Burande [ou ru de Burons] à Singles	616100	2060400	85	0.4194
P0190010	La Dordogne à Bort-les-Orgues	612807	2045815	1010	3.4846
P0212510	La Rhue à Égliseneuve-d'Entraigues	638654	2045488	40	0.2501
P0272510	La Rhue à Condat	633380	2037600	181	0.6665
P0364010	La Santoire à Condat [Roche-Pointue]	632571	2037176	172	0.3339
P0714010	La Diège à Chaveroche	594288	2064883	225	1.0358
P0804010	La Sumène à Saint-Étienne-de-Chomeil [Cheyrange]	619212	2035777	48	0.2473
P0885010	Le Mars à Bassignac [Vendes]	604018	2032932	117	0.2605
P0924010	La Triouzoune à Saint-Angel	592410	2054550	79	0.2224
P1114010	La Luzège à Maussac [Pont de Maussac]	585510	2052070	85	0.2201
P1154010	La Luzège à Lamazière-Basse [Pont de Bouyges]	583744	2042504	252	0.5854
P1422510	La Maronne à Sainte-Eulalie	603787	2013144	112	0.3369
P1502510	La Maronne à Pleaux [Enchanet]	588829	2009197	513	0.6163
P1712910	La Cère à Vic-sur-Cère [Comblat-le-Pont]	621993	1996112	88	0.3214
P1772910	La Cère à Sansac-de-Marmiesse	601087	1986808	350	0.9582
P2114010	La Sourdoire à la Chapelle-aux-Saints	551729	1998822	64	0.0334
P2184310	La Tourmente à Saint-Denis-lès-Martel	547205	1994204	202	0.0959

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km²)	QMNA5 (m³/s)
P2484010	Le Céou à Saint-Cybranet	507732	1977200	603	0.0286
P3001010	La Vézère à Saint-Merd-les-Oussines [Maisonnial]	574348	2069959	52	0.2383
P3015410	L'Ars à Pérols-sur-Vézère [Ars]	573869	2066673	33	0.1377
P3021010	La Vézère à Bugeat	567826	2067161	143	0.4691
P3234010	La Loyre à Voutezac [Pont de l'Aumonerie]	527723	2034382	103	0.2757
P3245010	Le Mayne à Saint-Cyr-la-Roche	526230	2030443	49	0.0759
P3264310	Le Roseix à Vars-sur-Roseix	524962	2029522	58	0.0077
P3322510	La Corrèze à Saint-Yrieix-le-Déjalat [Pont de Lanour]	570907	2052070	54	0.1645
P3502510	La Corrèze à Tulle [Pont des soldats]	556281	2030679	356	1.2608
P3614010	La Montane à Eyrein [Pont du Geai]	568830	2038057	43	0.1551
P3922510	La Corrèze à Brive-la-Gaillarde [Le Prieur]	534362	2018307	947	2.7017
P3994010	La Maumont à Ussac [La Chanourdie]	533372	2021248	162	0.5094
P4015010	La Couze à Chasteaux [Le Soulier]	531730	2010860	64	0.1422
P5404010	L'Eyraud à la Force [Bitarel]	444310	1989593	74	0.0489
P5715010	L'Engranne à Baigneaux	400832	1972527	30	0.0442
P6081510	L'Isle à Cognac-sur-l'Isle	491330	2042611	432	0.9642
P7001510	L'Isle à Bassilac [Charrieras]	479614	2023648	1863	4.2969
P7034010	Le Manoire à Saint-Laurent-sur-Manoire [Branchet]	477695	2018773	198	0.1254
P7041510	L'Isle à Périgueux	471448	2021805	2123	4.5104
P8012510	La Dronne à Saint-Pardoux-la-Rivière [Le Manet]	476000	2058526	140	0.3146
P8215010	La Belle à Mareuil	453699	2051458	40	0.0244
P8312520	La Dronne à Bonnes	428393	2028826	1935	3.1036
P9435110	Le Barbefer à Pugnac	378123	2013698	25	0
Q0115710	L'Oussouet à Trébons	417810	1790077	32	0.3353
Q0214010	L'Échez à Louey	411498	1799772	90	0.3277
Q0224020	L'Échez à Bordères-sur-l'Échez	413612	1809012	168	1.0662
Q0414010	Le Louet à Sombrun	408800	1833898	84	0.0293
Q0522520	L'Arros à Gourgue	430674	1794338	173	0.8875
Q0554010	L'Arret-Darre à Vielle-Adour	422018	1795573	12	0
Q0612510	L'Arros à Juillac	419697	1840643	590	0.614
Q0664020	Le Bouès à Beaumarchés	419073	1842808	240	0.0936
Q1094020	Le Larcis à Bernède	392540	1856450	430	0.0703
Q1314010	Le Gabas à Arrien	396284	1815095	56	0.0299
Q2125310	La Houeillède à Lannemaignan	396046	1882527	4	0.0068
Q2192510	Le Midou à Mont-de-Marsan	371719	1880803	800	1.2064
Q2593310	La Midouze à Campagne	359130	1883035	2500	6.4217
Q3464010	Le Luy à Saint-Pandelon	327253	1858629	1150	1.2138
Q4801010	Le Gave de Pau à Saint-Pé-de-Bigorre [Pont de Rieulhes]	397080	1790810	1120	16.4762
Q5501010	Le Gave de Pau à Bérenx [Pont de Bérenx]	341740	1839321	2575	23.8809
Q6142910	Le Gave d'Ossau à Oloron-Sainte-Marie [Oloron-Sainte-Croix]	361173	1802909	488	3.8394
Q6332510	Le Gave d'Aspe à Bedous [Pont d'Escot]	359930	1788220	425	4.6305
Q7002910	Le Gave d'Oloron à Oloron-Sainte-Marie [Oloron-SNCF]	360293	1804085	1085	12.0585
Q7322510	Le Saison à Mauléon-Licharre	338837	1810273	480	3.5906
Q7412910	Le Gave d'Oloron à Escos	329975	1832099	2456	17.9778
Q8032510	La Bidouze à Aïcirts-Camou-Suhast [Saint-Palais]	326762	1820529	246	0.3604
Q8345910	Le Mendialçu à Hasparren	304361	1830000	18	0.1145

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)	QMNA5 (m ³ /s)
Q9164610	La Nive des Aldudes à Saint-Étienne-de-Baïgorry	300932	1804972	156	1.8369
R1132510	La Tardoire à Maisonnais-sur-Tardoire	471941	2082100	140	0.2983
S2224610	Le Grand Arriou à Moustey [Biganon]	353858	1939250	108	0.1174
S2235610	Le Bouron à Belin-Béliet [Moulin du Moine]	352354	1945375	36	0.1221
S2242510	L'Eyre à Salles	344977	1954894	1650	5.3982
S4214010	Le Magescq à Magescq	313020	1870896	60	0.6701
S5144010	La Nivelle à Saint-Pée-sur-Nivelle	283850	1820735	138	0.9134
U0104010	Le Coney à Xertigny	895363	2349970	65	0.5448
U0415010	Le Breuchin à la Proiselière-et-Langle	911688	2322469	123	0.5688
U0444310	La Semouse à Saint-Loup-sur-Semouse	894199	2328080	222	0.8308
U0474010	La Lanterne à Fleurey-lès-Faverney	880330	2312100	1020	2.6412
U0610010	La Saône à Ray-sur-Saône	862445	2292153	3740	8.4738
U0635010	La Gourgeonne à Tincey-et-Pontrebeau	859980	2295311	140	0.1957
U0724010	Le Salon à Denèvre	849045	2290800	390	0.422
U0924010	La Vingeanne à Saint-Maurice-sur-Vingeanne	830943	2291038	417	0.3631
U0924020	La Vingeanne à Oisilly	828583	2273506	623	0.8404
U1004010	L'Ognon à Servance [Fourguenons]	924288	2320413	74	0.275
U1025010	Le Rahin à Plancher-Bas	929379	2312731	33	0.1294
U1054010	L'Ognon à Beaumotte-Aubertans	889978	2275556	1250	2.9209
U1074010	L'Ognon à Chevigney-sur-l'Ognon	865086	2261498	1707	3.7228
U1084010	L'Ognon à Pesmes	844228	2258123	2038	3.7184
U1109010	La Venelle à Selongey	814571	2291059	54	0.046
U1115210	Le Pannecul à Noiron-sur-Bèze [Rente de l'Ile]	822620	2275820	12	0.0148
U1204010	La Tille à Crécey-sur-Tille	809870	2287407	224	0.1142
U1224010	La Tille à Arceau [Arcelot]	815388	2267613	708	0.0984
U1224020	La Tille à Cessey-sur-Tille	817903	2257400	744	0.1284
U1235020	La Norges à Genlis	818337	2252688	264	0.1548
U1244040	La Tille à Champdôtre	824500	2246300	1100	0.4329
U1324010	L'Ouche à Plombières-lès-Dijon	799810	2262580	655	0.6243
U2012010	Le Doubs à Labergement-Sainte-Marie	901030	2204511	170	0.565
U2022010	Le Doubs à la Cluse-et-Mijoux [Pontarlier amont]	906108	2219616	350	1.1156
U2035020	Le Drugeon à Vuillecin [2]	903624	2222903	191	0.3479
U2215020	Le Dessoubre à Saint-Hippolyte	936881	2265720	560	1.476
U2305210	Le Saint-Nicolas à Rougemont-le-Château	945801	2314483	9	0.0131
U2345020	La Savoureuse à Giromagny	936609	2314286	31	0.096
U2345410	Le Rhome à Lachapelle-sous-Chaux	936025	2310240	17	0.0306
U2345820	La Rosemontoise à Chaux	939506	2310570	25	0.0477
U2356610	Le Rupt à Dung	932546	2287200	42	0.0516
U2425260	Le Cusancin à Baume-les-Dames	904933	2267638	358	0.57
U2604030	La Loue à Vuillafans	895452	2235718	326	4.2917
U2615820	Le Lison [source] à Nans-sous-Sainte-Anne	879570	2224880	140	0.531
U2615830	Le Lison à Myon	875104	2232091	217	0.5501
U2616410	Le Verneau à Nans-sous-Sainte-Anne	878796	2226309	11	0.0265
U2624010	La Loue à Chenecey-Buillon	874523	2244049	1160	6.7803
U2634010	La Loue à Champagne-sur-Loue	864228	2232923	1380	8.1846
U2722010	Le Doubs à Neublans-Abergement	829497	2218021	7290	22.3009

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)	QMNA5 (m ³ /s)
U3205210	La Grosne à Trades [Les Chambosses]	771211	2144162	31	0.0669
U3214010	La Grosne à Jalogny [Cluny]	777773	2158620	332	0.1858
U3225010	La Guye à Sigy-le-Châtel [Corcelles]	770767	2175505	273	0.1045
U3415020	La Brenne à Sellières	846794	2207845	37	0.0361
U3424010	La Seille à Saint-Usuge	823510	2190164	790	1.1663
U4014010	La Reyssouze à Montagnat	828000	2134440	84	0.0463
U4204010	La Veyle à Lent	821172	2128399	34	0.0721
U4235010	Le Renon à Neuville-les-Dames	805475	2131990	102	0.0364
U4405010	La Chalaronne à Villars-les-Dombes	808515	2114465	87	0.0032
U4505010	L'Ardières à Beaujeu	773597	2130827	55	0.0994
U4624010	L'Azergues à Châtillon	779068	2099730	336	0.2275
U4635010	La Brévenne à Sain-Bel	775900	2092570	219	0.0509
U4644010	L'Azergues à Lozanne	782561	2098097	792	0.5996
V0144010	Le Giffre à Taninges [Pressy]	925679	2132498	325	4.2793
V0205010	Le Bronze à Bonneville [Thuet]	918590	2126645	28	0.0662
V0205420	Le Borne à Saint-Jean-de-Sixt	916419	2112222	70	0.514
V0245610	L'Aire à Saint-Julien-en-Genevois [Thairy]	888067	2133510	40	0.0136
V0345210	Le Redon à Margencel	913899	2156944	31	0.0809
V0355010	Le Foron à Sciez	911286	2155818	66	0.1082
V1015010	La Valserine à Lélex [Niaizet]	876217	2148835	85	0.1982
V1015030	La Valserine à Chézery-Forens [Chézery]	872108	2141627	119	0.9065
V1015810	La Semine à Châtillon-en-Michaille [Coz]	867500	2133633	183	1.1887
V1214010	Le Fier à Dingy-Saint-Clair	900188	2107921	222	1.5882
V1235610	L'Eau Morte à Doussard	902759	2094989	93	0.6006
V1237410	Le Laudon à Saint-Jorioz	897326	2099988	29	0.0262
V1255010	Le Chéran à Allèves [La Charniaz]	893163	2087060	249	1.1162
V1257810	Les Eparis à Alby-sur-Chéran	886955	2098258	23	0.0313
V1264010	Le Fier à Vallières	878026	2106486	1350	5.5259
V1414010	Le Seran à Belmont-Luthézieu [Bavosière]	858896	2103439	158	0
V1425010	Le Groin à Artemare [Cerveyrieu]	859995	2102736	42	0.0337
V1504010	Le Guiers Mort à Saint-Laurent-du-Pont	866237	2048591	89	0.7087
V1515010	Le Guiers Vif à Saint-Christophe-sur-Guiers [Pont Saint-Martin]	869570	2055000	114	0.6293
V1774010	La Bourbre à Tignieu-Jameyzieu	819733	2083381	703	2.4592
V2024010	La Saine à Foncine-le-Bas	882467	2188858	95	0.3606
V2035010	La Lemme à Fort-du-Plasne [Pont-de-Lemme]	877218	2186793	46	0.0651
V2114010	L'Angillon à Champagneole	869759	2201201	117	0.0718
V2202010	L'Ain à Marigny [Chalain]	862295	2193035	650	3.3946
V2206010	Le Hérissou à Doucier	863138	2188878	49	0.1707
V2414010	La Bienne à Saint-Claude [Chenavier]	871370	2163479	216	0.9001
V2444020	La Bienne à Jeurre	859209	2156957	650	3.0313
V2624010	La Valouse à Thoirette [Chalea]	845082	2146369	280	0.6801
V2814020	Le Suran à Neuville-sur-Ain [La Planche]	836016	2128117	324	0
V2814030	Le Suran à Pont-d'Ain	831349	2122618	349	0.1143
V2924010	L'Albarine à Saint-Rambert-en-Bugey	840510	2110072	232	0.4289
V3015010	L'Yzeron à Craponne	785470	2084490	48	0.0111
V3315010	La Valencize à Chavanay	786585	2048645	36	0.0214

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km²)	QMNA5 (m³/s)
V4144010	L'Eyrieux à Beauvène [Pont de Chervil]	774080	1988475	392	0.4326
V4145210	La Glueyre à Gluiras [Tisoneche]	772593	1983373	71	0.0692
V4214010	La Drôme à Luc-en-Diois	846722	1962412	194	0.1622
V4225010	Le Bez à Châtillon-en-Diois	850100	1970791	227	0.4323
V4226010	L'Archiane à Treschenu-Creyers [Menée]	852898	1973637	43	0.2609
V4264010	La Drôme à Saillans	827754	1969630	1150	2.0295
V4275010	La Gervanne à Beaufort-sur-Gervanne	822431	1978970	108	0.0161
V4414010	Le Roubion à Soyans	812668	1961875	186	0.0663
V4455010	Le Jabron à Souspierre	809220	1951265	85	0.1493
V5045810	Le Borne à Saint-Laurent-les-Bains [Pont de Nicoulaud]	728167	1954010	63	0.1358
V5425210	La Gagnière à Gagnières [Bannes]	741800	1926971	55	0.0131
V5474010	La Cèze à la Roque-sur-Cèze	775234	1912263	1060	1.3952
V6052010	L'Ouvèze à Vaison-la-Romaine	818400	1919202	585	0.5917
V6125010	L'Auzon à Mormoiron	828517	1899383	75	0.0439
V7115010	Le Gardon de Sainte-Croix à Gabriac [Pont Ravagers]	710380	1910970	47	0.0671
V7124010	Le Gardon de Mialet à Générargues [Roucan]	730889	1898911	240	0.2497
V7135010	Le Gardon de Saint-Jean à Corbès [Roc Courbe]	730249	1898308	263	0.3066
W0000010	L'Isère à Val-d'Isère	963731	2060410	46	0.3322
W0224010	Le Doron de Bozel à la Perrière [Vignotan]	932170	2058888	330	4.5294
W2114010	La Séveraisse à Villar-Loubière	901503	1987736	133	1.1114
W2314010	La Bonne à Entraigues [Pont Battant]	884986	1995368	143	0.9562
W2335210	La Roizonne à la Valette [La Rochette]	878656	2000571	72	0.5561
W2405010	La Jonche à la Mure	872153	1996337	46	0.1159
W2714010	La Romanche à Mizoën [Chambon amont]	903139	2011606	220	1.0516
W3315010	Le Meaudret à Méaudre	851396	2017523	74	0.0564
W3335210	L'Adouin à Saint-Martin-en-Vercors [Tourtre]	844889	2005184	8	0.0877
X0010010	La Durance à Val-des-Prés [Les Alberts]	942800	2001000	207	1.5456
X0100010	La Durance à Briançon [aval]	939116	1997268	548	4.966
X0310010	La Durance à Embrun [La Clapière]	929808	1958813	2170	14.8763
X0434010	L'Ubaye à Barcelonnette [Abattoir]	943997	1940897	549	2.0355
X0454010	L'Ubaye au Lauzet-Ubaye [Roche Rousse]	923598	1947143	946	4.4456
X1034020	Le Buech à Serres [Les Chambons]	868944	1943749	723	1.6206
X1225010	Le Bes à la Javie [Esclangon-Pérouré]	914080	1921980	165	0.5538
X1424010	L'Asse à Beynes [Chabrières]	914213	1898308	375	0.4649
X2114010	L'Issole à Saint-André-les-Alpes [Mourefrey]	934360	1897010	137	0.4408
X2202010	Le Verdon à Demandolx [Castillon]	938004	1884354	655	1.8702
X3434010	Le Coulon à Saint-Martin-de-Castillon [Coste Raste]	853453	1877174	333	0
Y0105210	La Baillaury à Banyuls-sur-Mer	663550	1718270	18	0
Y0115410	La Massane à Argelès-sur-Mer [Mas d'en Tourens]	653519	1724862	17	0.0024
Y0245210	Le Mondony à Amélie-les-Bains-Palalda	627376	1718240	32	0.01
Y0254050	Le Tech [total] à Reynès [Saint-Paul-sur-Tech]	632484	1721469	473	1.6866
Y0255020	L'Ample à Reynès [Le Vila]	629818	1721298	48	0.0233
Y0325010	La Canterrane à Terrats [Moulin d'en Canterrane]	632596	1732878	31	0
Y0436420	Le Cady à Villefranche-de-Conflent	602846	1731466	60	0.1599
Y0624020	L'Agly à Saint-Paul-de-Fenouillet [Clue de la Fou]	613193	1755440	216	0.3168
Y0655010	Le Verdoube à Tautavel	633364	1756427	305	0.1669

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)	QMNA5 (m ³ /s)
Y0824010	La Berre à Villesèque-des-Corbières [Ripaud]	640706	1781850	165	0.0205
Y1012010	L'Aude à Puyvalador	582695	1737104	134	0.7138
Y1105010	Le Rebenty à Saint-Martin-Lys	591106	1756903	136	0.2404
Y1225010	Le Lauquet à Greffeil	605116	1784237	66	0.0182
Y1325010	Le Treboul à Villepinte	579989	1808264	142	0.0555
Y1416210	La Clamoux à Malves-en-Minervois	608188	1805629	85	0.0037
Y1435410	L'Argent Double à la Redorte [Les Salices]	623788	1806881	108	0.0223
Y1564010	L'Orbieu à Luc-sur-Orbieu	636164	1797745	586	0.0771
Y2015010	L'Arre au Vigan [La Terrisse]	706128	1889650	159	0.533
Y2035010	La Vis à Saint-Laurent-le-Minier	708111	1882957	332	1.5714
Y2102010	L'Hérault à Laroque	712510	1880320	760	2.4284
Y2214010	La Lergue à Lodève	679638	1858999	228	0.7656
Y2525010	La Mare au Pradal	662589	1847505	114	0.2381
Y3204010	Le Lez à Montferrier-sur-Lez [Lavalette]	723911	1851214	115	0.0494
Y4002010	L'Arc à Pourrières	874570	1837602	49	0.0024
Y4022010	L'Arc à Meyreuil [Pont de Bayeux]	857360	1838417	303	0.1526
Y4604020	Le Gapeau à Solliès-Pont	901309	1805993	169	0.0531
Y4615020	Le Réal Martin à la Crau [Decapris]	907341	1805595	277	0.0834
Y4624010	Le Gapeau à Hyères [Sainte-Eulalie]	910611	1801375	517	0.2068
Y5005210	Le Cauron à Bras [Pont de l'Avocade]	892835	1839193	154	0.1086
Y5032010	L'Argens à Châteauvert	898748	1840110	485	0.7795
Y5105010	Le Caramy à Vins-sur-Caramy [Les Marcounious]	910981	1834130	215	0.3745
Y5106610	L'Issole à Cabasse [Pont des Fées]	914946	1834591	223	0
Y5215010	L'Aille au Cannet-des-Maures [Reillanne]	927759	1825268	79	0
Y5215020	L'Aille à Vidauban [Le Baou]	933923	1830169	229	0
Y5235010	La Nartuby à Trans-en-Provence	935648	1842521	190	0.1226
Y5235030	La Nartuby à Châteaudoable [Rebouillon]	930446	1850179	111	0.0475
Y5435010	La Môle au Lavandou [Destel]	934003	1809119	44	0
Y5436210	La Verne à la Môle [Les Cabris]	935779	1810776	38	0
Y5505410	Le Grenouiller à Saint-Raphaël [Agay]	965681	1837240	48	0
Y5615010	Le Loup à Tourrettes-sur-Loup [Les Vallettes]	976714	1866292	206	0.381
Y5615020	Le Loup à Gourdon [Loup amont]	974300	1868700	140	0.1777
Y6234010	La Tinée à la Tour [Pont de La Lune]	987867	1893760	705	5.9434
Y6432010	Le Var à Malaussène [La Mescla]	990538	1890624	1830	11.5239
Y6624010	La Roya à Breil-sur-Roya	1015971	1895423	461	5.0621
Y8814010	Le Rizzanese à Zoza	1162140	1659630	130	0.3664
Y9025010	Le Vecchio à Venaco [Pont de Noceta]	1168052	1715877	147	0.2729
Y9315010	Le Fium-Alto à Taglio-Isolaccio [Acitaja]	1187690	1742380	114	0.1449

⁽¹⁾ Les coordonnées géographiques des stations sont exprimées dans le système de projection Lambert II étendu

Annexe III - Liste des stations de l'échantillon de chroniques courtes

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
A0220200	Le Lertzbach à Hégenheim	990440	2297870	15
A0220650	Le Liesbach à Blotzheim	988714	2300337	8.2
A1000310	L'III à Oltingue	980246	2287589	44
A1050320	L'III à Tagolsheim	970019	2306389	325
A1072010	Le Thalbach à Wittersdorf	970979	2303078	70
A1122020	La Largue à Friesen	962350	2296063	91
A1133010	Le Traubach à Traubach-le-Bas	957969	2305877	19
A1150200	La Largue à Spechbach-le-Bas	966800	2307260	239
A1202010	La Doller à Sewen [Lerchenmatt amont]	940853	2321110	5.2
A1202030	La Doller à Sewen [Village]	942198	2321870	21.2
A1204410	Le Wagensthalbach à Sewen [Lerchenmatt]	940774	2321055	3.3
A1226910	Le Bourbach à Bourbach-le-Bas	953702	2319051	13
A1235010	Le Michelbach à Michelbach	957405	2317688	3.05
A1256410	Le Kleebach à Burnhaupt-le-Haut	968515	2316833	6.1
A1340310	L'III à Horbourg-Wihr [Pont de Horbourg]	976706	2353551	1320
A1402020	La Thur à Wildenstein	945075	2340960	7.6
A1436910	Le Wissbach à Willer-sur-Thur	954786	2327609	21
A1462050	La Thur à Pulversheim	970275	2327590	250
A1512010	La Lauch à Buhl	963151	2336017	68.1
A1515810	Le Murbach à Buhl	961618	2335913	7.6
A1522020	La Lauch à Guebwiller	964255	2334824	68.1
A1552020	La Lauch à Eguisheim	973471	2349142	311
A1554030	L'Ohmbach à Westhalten [3]	967535	2339787	41.2
A2012020	La Fecht à Muhlbach-sur-Munster	954432	2346849	74
A2023030	La Petite Fecht à Stosswihr [Village]	955751	2349981	45.799
A2035310	Le Krebsbach à Soultzbach-les-Bains	962615	2349437	24
A2113010	La Béhine à Lapoutroie	959570	2361286	38.4
A2132010	La Weiss à Sigolsheim	970006	2359627	164
A2153020	Le Strengbach à Aubure	961634	2368192	0.8
A2244710	Le Hanfgraben à Sand	991833	2388047	0
A2312020	Le Giessen à Thanvillé	971600	2380727	99
A2322120	La Lièpvrette à Sainte-Marie-aux-Mines [Échery]	958299	2370220	18.8
A2342110	La Lièpvrette à la Vancelle [Hurst]	971593	2376231	127
A2352010	Le Giessen à Sélestat [aval]	981227	2379882	263
A2407320	Le Hanfgraben à Witternheim	990823	2381399	0
A2532010	L'Andlau à Schaeffersheim	988544	2395604	158
A2710670	La Rothaine à Natzwiller	964625	2398400	7.5
A2713710	La Chergoutte à Waldersbach [Belmont]	963275	2388590	3.33
A2750380	La Magel à Rosheim [Rossberg]	965000	2394000	1
A2750710	Le ruisseau de Baschney à Grendelbruch	970000	2400000	2.7
A2762090	La Bruche [totale] à Mutzig	977403	2404944	432
A2932010	La Souffel à Mundolsheim	997356	2418180	119
A3250210	Le Falkensteinbach à Gundershoffen	990020	2446230	69
A3311010	La Moder à Kaltenhouse	1004466	2435612	679
A3492020	La Zorn à Hoerdt [2]	1000531	2426405	750
A3501010	La Moder à Drusenheim	1012715	2432825	1541

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
A3782110	L'Eberbach à Leutenheim	1016135	2441950	190
A4020610	La Moselle à Fresse-sur-Moselle	933456	2328074	72
A4333010	Le Neuné à Laveline-devant-Bruyères	928129	2363234	94
A4442010	Le Durbion à Vaxoncourt	902069	2375044	145
A4443010	Le Saint-Oger à Deyvillers	911027	2363747	21.3
A5002010	L'Euron à Saint-Boingt	903873	2387384	36.9
A5012010	L'Euron à Froville	897890	2393140	91.9
A5100610	La Moselle à Saint-Mard	892265	2397059	1950
A5110610	La Moselle à Tonnoy	889709	2400434	1990
A5242010	Le Gite à Velotte-et-Tatignécourt [Velotte]	884932	2369241	114
A5500610	La Moselle à Pont-Saint-Vincent	877600	2407630	3080
A5622010	La Bouvade à Bicqueley	863384	2409073	71
A5723010	L'Ingressin à Toul	861133	2414582	54.7
A5842010	Le Terrouin à Villey-Saint-Étienne	868813	2422388	169
A6055910	Le Taintroué à Saint-Dié [Les Tiges]	940044	2375886	41.5
A6142010	Le Rabodeau à Moyenmoutier	936795	2385606	153
A6151030	La Meurthe à Raon-l'Étape	933712	2387700	727
A6221010	La Meurthe à Azerailles	922561	2395913	960
A6341010	La Meurthe à Lunéville	905784	2406259	1105
A6411110	La Vezouze à Cirey-sur-Vezouze	939807	2408187	76
A6431110	La Vezouze à Frémonville	935039	2408470	108
A6443010	Le Vacon à Barbas	932357	2407029	35.4
A6541110	La Vezouze à Thiébauménil	916230	2406800	458
A6543010	Le ruisseau des Amis à Marainviller	916394	2408461	35.6
A6653010	L'Arentèle à Saint-Gorgon	919491	2378224	63.2
A6701210	La Mortagne à Roville-aux-Chênes	916760	2383200	300
A6872010	Le Sanon à Dombasle-sur-Meurthe	894928	2410059	284
A6903810	Le Petit Rhône à Saint-Nicolas-de-Port	892188	2409617	21.4
A7213010	Le ruisseau du Trey à Vandières	870697	2445873	38.7
A7581010	La Seille à Vic-sur-Seille	908350	2428776	371
A7581020	La Seille à Moyenvic	910989	2428627	352
A7864310	Le ruisseau de Cherisey à Verny	883227	2452294	18.2
A8006210	Le ruisseau de Vaux à Morgemoulin	836499	2475625	42.3
A8021010	L'Orne à Étain	840240	2473430	138
A8071010	L'Orne à Boncourt	854948	2468408	412
A8122000	L'Yron à Hannonville-Suzémont [Hannonville]	855714	2461348	150
A8182010	L'Yron à Jarny [La Cartoucherie]	857265	2467782	383
A8431010	L'Orne à Rosselange	872037	2479633	1226
A8712010	La Canner à Bettelainville	891620	2479942	32.8
A8823010	La Boler à Gavisse	886557	2499928	58
A8853010	Le ruisseau de Montenach à Sierck-les-Bains	892198	2500573	47
A9021010	La Sarre à Sarrebourg	946662	2425803	264
A9301010	La Sarre à Wittring	951856	2461350	1719
A9425050	La Blies à Bliesbruck	953444	2468475	1815
A9737310	L'Elvon à Bazoncourt	895970	2456358	16.2
A9752010	La Nied Française à Condé-Northen [Pontigny]	898087	2468787	499
A9832010	La Nied Allemande à Faulquemont	912771	2458341	187
B1300010	La Meuse à Maxey-sur-Meuse	848323	2389033	1532
B1322010	Le Vair à Belmont-sur-Vair	864860	2367640	140
B2003810	Le ruisseau de Vicherey à Vicherey	866789	2382005	6.5
B2052010	L'Aroffe à Rigny-Saint-Martin	849219	2406865	265

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
B2130010	La Meuse à Commercy	840165	2423862	2290
B3103010	L'Andon à Cléry-Grand	805061	2488551	61
B3120010	La Meuse à Stenay [1]	805989	2503448	3904
B4001010	La Chiers à Longlaville	851124	2509959	151
B4021010	La Chiers à Longwy	848584	2506946	208
B4224310	Le Ton à Écouvies	827070	2507640	308
B4253010	La Thonne à Thonne-les-Près	818528	2507418	54.3
B4312010	L'Othain à Dommary-Baroncourt [Dommary]	845690	2480843	42.2
B4402010	La Loison à Billy-sous-Mangiennes	835274	2486382	18.4
B5043010	La Vrigne à Vrigne-aux-Bois	781383	2531480	30
B5572010	La Sormonne à Belval	765933	2533905	368
D0137050	L'Helpe Mineure à Fourmies	721363	2559338	25.8
D0158500	La Tarsy à Monceau-Saint-Waast [La Brasserie]	708470	2576310	38.3
D0197010	La Flamenne à Maubeuge [Douzies]	713717	2588401	19.23
D0206020	La Solre à Choisies	723707	2580182	35
E1827010	L'Hogneau à Gussignies	700088	2594292	91
E3518510	La Laquette à Witternesse	601483	2624154	86
E4035720	L'Aa à Fauquembergues	583100	2623400	143
E4035730	L'Aa à Lumbres	585214	2634709	317
E4036530	Le Bléquin à Lumbres	584645	2634340	67
E4905711	L'Yser à Bollezeele [Erkelsbrug]	600858	2652531	33
E4907005	La Peene-Becque à Ochtezeele	604643	2647021	50
E4909405	L'Ey-Becque à Steenvoorde	617594	2646481	78
E5105710	La Slack à Rinxent	557002	2645313	38.4
E5205710	Le Wimereux à Wimille	549993	2641394	78
E5310210	La Liane à Hesdigneul-lès-Boulogne	553111	2629863	196
E6386070	L'Ancre à Bonnavy	612724	2548879	221.73
E6397010	L'Hallue à Bavelincourt	608706	2554824	115
E6397030	L'Hallue à Querrieu	607067	2549038	195
E6456510	La Nièvre à l'Étoile	579330	2557049	269
E6498315	La Maye à Arry	556350	2586900	109
G0402020	La Bresle à Ponts-et-Marais [Ponts-et-Marais]	536246	2561479	693
G2011010	La Béthune à Saint-Aubin-le-Cauf	517131	2541443	307
G4002020	La Saane à Val-de-Saâne	500872	2523822	50.7
G5002010	Le Dun au Bourg-Dun [Le Pont Blanc]	496141	2543288	93.3
G6003010	Le Durdent à Vittefleury	477427	2537137	355
G7103010	La Ganzeville à Ganzeville	461121	2528119	89.3
G9003110	Le Rogerval à Rogerville	450737	2502282	11.8
G9103020	La Lézarde à Montivilliers	444252	2507268	116
H0203010	La Laignes à Chaume-lès-Baigneux	768872	2294933	87.3
H0210010	La Seine à Polisy	752523	2342193	1450
H0301010	L'Ource à Leuglay [Froidvent]	786293	2313937	173
H0321010	L'Ource à Voulaines-les-Templiers	781338	2315782	306
H0321020	L'Ource à Brion-sur-Ource	773284	2324822	406
H0413010	La Sarce à Virey-sous-Bar	746324	2350978	187
H1001010	L'Aube à Auberive	805615	2312260	44
H1113410	La source des Dhuits à Montheries	789880	2356960	4
H1122010	L'Aujon à Rennepont	787050	2352577	481
H1122020	L'Aujon à Maranville	787760	2351695	370
H1201010	L'Aube à Bar-sur-Aube	775964	2361715	1280
H1302010	La Voire à Droyes [Gervilliers]	776551	2391521	270

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
H1362010	La Voire à Lassicourt	759527	2385546	896
H1503510	L'Huitrelle à Lhuître	741420	2398300	160
H2001010	L'Yonne à Château-Chinon(Campagne)	723021	2230504	76
H2001020	L'Yonne à Corancy	721963	2234521	98
H2013010	L'Houssière à Chaumard	721870	2239550	55
H2133010	Le Chalaux à Saint-Martin-du-Puy	719670	2259040	98
H2163010	La Romanée à Bussières	730664	2271751	95
H2172320	Le Cousin à Avallon	716500	2277500	366
H2183110	Le Vau de Bouche à Lucy-le-Bois	716853	2285575	31.8
H2323810	Le Borsin à Savigny-en-Terre-Plaine	732237	2279641	7
H2342030	Le Serein à Beaumont	691370	2325680	1337
H2412010	L'Armançon à Quincy-le-Vicomte	744791	2291574	476
H2422310	La Brenne à Brain	763064	2276072	136
H2434010	L'Oze à Darcey	765877	2284006	205
H2434710	La Douix de Darcey à Darcey	768415	2286129	1.01
H2442330	La Brenne [totale] à Seigny	757225	2287716	613
H2442340	La Brenne à Montbard	749341	2293435	732
H2482010	L'Armançon à Briennon-sur-Armançon	695309	2332576	2990
H2482020	L'Armançon à Jaulges	708580	2331360	2160
H2513410	Le Vrin à Précly-sur-Vrin	669531	2331280	139
H3023211	L'Aveyron à la Chapelle-sur-Aveyron	639983	2318291	99
H3029810	Le fossé de Bonnières à Châtillon-Coligny [Bonnrières]	638830	2315360	1.52
H3029910	Le ru de Vaublot à Saint-Maurice-sur-Aveyron	642475	2317270	1.75
H3113010	Le Branlin à Champignelles	657745	2310454	136
H3113020	Le Branlin à Mézilles	665165	2297906	59
H3113310	Le ru du Four à Saint-Fargeau [Ronchères]	658286	2295869	6
H3113320	Le ru du Four à Saint-Fargeau [Les Perriaux]	659474	2294458	2.59
H3113330	Le ru du Four à Saint-Fargeau [Montréal]	657942	2296123	7
H3203110	Le Vernisson à Nogent-sur-Vernisson	630510	2316814	67.5
H3322010	La Bezonde à Pannes	625308	2333786	339
H3403101	La Cléry à Saint-Loup-de-Gonois [La Recette]	643616	2339883	173
H3403201	Le Betz à Bransles	636250	2349270	157
H3403410	La Sainte-Rose à Pers-en-Gâtinais	642288	2346816	32
H3613010	Le Lunain à Paley	638903	2360885	163
H3613020	Le Lunain à Épisy	632485	2370090	252
H3623010	L'Orvanne à Blennes	650972	2362170	108
H3923010	Le ru d'Ancoeur à Blandy	633113	2396886	181
H3953120	Le ru de Balory à Cesson	618871	2396620	26.6
H3953130	Le ru de Balory à Savigny-le-Temple [Noisement]	617062	2396178	49.4
H3953140	Le ru de Balory à Vert-Saint-Denis [La Fontaine Ronde]	620625	2397535	20
H4022030	L'Essonne à Boulancourt	606753	2362092	609
H4103210	Le ru des Hauldres à Tigery [Pont des Vignes]	612066	2405053	58.3
H4103220	Le ru des Hauldres à Tigery [Parc Tertiaire]	612711	2405427	48
H4202020	L'Orge à Saint-Chéron [Saint-Évroult]	583586	2394036	114
H4232040	L'Orge à Épinay-sur-Orge [Le Breuil]	598702	2407475	632
H4243010	L'Yvette à Villebon-sur-Yvette	592431	2411397	224
H4322020	L'Yerres à Ozouer-le-Voulgis [Les Étards]	630709	2405780	794
H4332010	L'Yerres [totale] à Crosne	608429	2413022	991
H4332040	L'Yerres à Évry-Grégy-sur-Yerre [Pont de Brie]	620303	2408088	882
H4333410	Le Réveillon à Férolles-Attilly [La Jonchère]	620093	2414507	55.4
H5023010	La Traire à Louvières	819570	2341795	101

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
H5033310	La Suize à Villiers-sur-Suize	813563	2335211	82.7
H5033340	La Suize à Chaumont	807485	2348825	144
H5042010	Le Rognon à Bourdons-sur-Rognon [Lacrète]	821450	2360920	164
H5053210	La Manoise à Humberville	825745	2369596	15
H5083010	La Blaise à Louvemont [ancien]	789360	2399920	480
H5083020	La Blaise à Colombey-les-Deux-Églises	794592	2369308	116
H5083050	La Blaise à Louvemont [Pont-Varin]	791672	2393953	480
H5083070	La Blaise à Daillancourt	794420	2370300	125
H5102010	La Saulx à Pancey	818580	2389850	40
H5102040	La Saulx à Montiers-sur-Saulx	816885	2397549	75.7
H5112310	L'Ormain à Saint-Joire	827395	2404650	420
H5122330	L'Ormain à Rancourt-sur-Ormain	789350	2427140	885
H5122340	L'Ormain à Tronville-en-Barrois	816506	2418014	672
H5123210	Le ruisseau de Malval à Nançois-sur-Ormain	818260	2416511	31.6
H5153010	La Vière à Val-de-Vière	777959	2425290	166
H5204210	La Coole à Écury-sur-Coole	746930	2435620	150
H5224310	Le Cubry à Pierry	717900	2448600	98.5
H5243010	La Semoigne à Verneuil	697775	2455875	91
H5412020	Le Petit Morin à Jouarre [Vanry]	659749	2437218	605
H5613020	La Théroouanne à Congis-sur-Théroouanne [Gué à Tresmes]	645937	2446996	167
H5702010	Le Grand Morin à Meilleray	679850	2421850	336
H5723011	L'Orgeval à Boissy-le-Châtel [Le Theil, ultrasons]	656985	2425600	104
H5723021	Les Avenelles à Boissy-le-Châtel [Les Avenelles, ultrasons]	657344	2425898	45.7
H5723030	Les Avenelles à Saint-Germain-sous-Doue [La Gouge]	659742	2428919	24.7
H5726510	Le ru de Choqueuse à Saint-Cyr-sur-Morin [Goins]	653925	2432250	1.3
H5726520	Le ru de Choqueuse à Jouarre [Choqueuse]	657957	2431830	1.7
H5726610	Le ru des Quatre-Cent à Doue [Les Quatre Cents]	657850	2431000	1.1
H5833010	Le ru de la Gondoire à Gouvernes [Deuil]	626950	2429213	19.6
H5833410	Le ru de la Brosse à Bussy-Saint-Martin	625455	2427898	23.7
H5913020	La Bièvre à Verrières-le-Buisson	592000	2416500	120
H6021010	L'Aisne à Passavant-en-Argonne	792760	2450020	233
H6021020	L'Aisne à Verrières	788460	2455300	388
H6033210	L'Auve à Dommartin-Dampierre	781795	2455075	173
H6053010	La Biesme au Claon	792261	2463700	70.4
H6153010	L'Agron à Champigneulle	788632	2486873	149
H6153020	L'Agron à Verpel	788620	2490900	133
H6233010	La Vaux à Barby	741261	2505340	324
H6233020	La Vaux à Écly	741923	2506379	316
H6233110	La Draize à Justine-Herbigny	743850	2513350	30.1
H6303820	La Retourne à Houdilcourt	729705	2493278	322
H6313010	La Suipe à Pontfaverger-Moronvilliers	744256	2479875	475
H6313030	La Suipe à Selles	742029	2480529	486
H6313210	Le Py à Dontrien	751202	2473835	89
H6321010	L'Aisne [totale] à Berry-au-Bac	715550	2490400	5230
H6321020	L'Aisne à Pontavert	707810	2490620	5345
H6402020	La Vesle à Sept-Saulx	739310	2463735	416
H6402030	La Vesle à Puisieulx	730248	2469096	603
H6402040	La Vesle à Beaumont-sur-Vesle	735061	2466053	446
H6412010	La Vesle à Saint-Brice-Courcelles	719693	2475400	762
H6412020	La Vesle à Châlons-sur-Vesle	715475	2476770	828
H6423020	L'Ardres à Faverolles-et-Coëmy	705905	2471527	147

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
H6432010	La Vesle à Braire	686622	2482914	1440
H6523532	Le ru de Retz à Ambleny [Pont Cheminet]	661925	2487275	89
H6531011	L'Aisne à Trosly-Breuil [Hérant]	644790	2490502	7940
H7053110	L'Ancienne Sambre au Nouvion-en-Thiérache [Moulin Lointain]	701586	2557970	20.89
H7153210	Les Barentons à Barenton-Bugny	694785	2516194	90
H7153220	Les Barentons à Chambry	695430	2511362	46
H7201010	L'Oise à Condren	668503	2514893	3280
H7332010	L'Ailette à Bichancourt	662800	2508350	540
H7413210	La Divette à Passel	645427	2506707	72
H7513610	La Sainte-Marie à Glaignes	637410	2474950	99
H7733010	L'Avelon à Goincourt	579650	2492598	171
H7813210	La Launette à Ver-sur-Launette	625691	2456211	41
H7833030	La Thève [totale] à Asnières-sur-Oise	604829	2461501	133
H7833530	L'Ysieux à Luzarches [Brassay]	607880	2457372	41
H7913030	La Mauldre à Aulnay-sur-Mauldre [Usine]	563378	2437810	385.45
H7913210	Le ru d'Élancourt à Jouars-Pontchartrain [Chennevières]	568513	2421845	23
H7913410	La Guyonne à Mareil-le-Guyon	564229	2421584	34.1
H7913610	Le Lieutel à Vicq	563279	2424079	71.4
H7914020	Le Maldroit à Thiverval-Grignon	568464	2426678	31.8
H7914030	Le Maldroit à Beynes [Les Chênes]	566826	2428154	36.7
H7914110	Le ru de Gally à Villepreux	575656	2427297	64
H7914120	Le ru de Gally à Thiverval-Grignon [Les Quatre Pignons]	568884	2429076	88.2
H8002010	L'Epte à Saumont-la-Poterie [La Bellière]	546193	2511743	23
H8202010	L'Andelle à Rouvray-Catillon	538945	2509858	30.1
H9033310	Le Coinon à Mainvilliers	533388	2386242	45.3
H9113001	La Drouette à Saint-Martin-de-Nigelles	544999	2402125	231
H9121010	L'Eure à Charpont	534142	2411743	2050
H9331010	L'Eure à Cailly-sur-Eure	517618	2457973	4598
H9402010	L'Iton à Manthelon [La Mésangère]	507549	2435486	396
H9402020	L'Iton à Crulai	476861	2414086	103
H9402040	L'Iton à Bourth	487529	2420717	159
H9913010	Le Cailly à Fontaine-le-Bourg [Grand-Tendos]	512411	2507791	84.9
H9913020	Le Cailly à Notre-Dame-de-Bondeville	506495	2499783	199
H9913030	Le Cailly à Cailly [Cailly]	519395	2509668	28.5
H9923020	L'Austreberthe à Saint-Paër	497457	2503321	157
H9943420	Le Commerce à Gruchet-le-Valasse	466095	2507646	118
I0031010	La Risle à Grosley-sur-Risle	488665	2449087	487
I0034010	Le Vernet à Glos-la-Ferrière	472770	2430340	19.5
I0034110	Le Val de Launay à Glos-la-Ferrière	472092	2429552	4.38
I0102010	La Charentonne à Bocquencé	463840	2429442	65.8
I0102020	La Charentonne à la Trinité-de-Réville	466689	2443857	224
I0129910	Le fossé d'assainissement à Grandchain	477401	2450216	21.4
I0211010	La Risle à Pont-Authou	480373	2472837	1800
I0233110	La Corbie à Toutainville	464330	2487700	66.1
I0903210	La Morelle à Fiquefleur-Équainville	452660	2489685	43.5
I1011010	La Touques à Mardilly	448800	2427871	87.5
I1031010	La Touques à Saint-Martin-de-la-Lieue	445185	2459052	290
I1103010	L'Orbiquet à Beuvillers	447862	2461379	326
I1111010	La Touques à Lisieux	445740	2463600	631.5
I2001010	La Dives à Saint-Lambert-sur-Dive	433824	2426474	94
I2023410	L'Ante à Eraines	416835	2437619	37.299

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
I2102010	La Vie à Guerquesalles [Les Longs Champs]	444194	2436097	73.4
I2162010	La Vie à Corbon	427112	2462544	434
I2201015	La Dives à Méry-Corbon [1]	424707	2463900	1090
I2203810	Le Laison à Croissanville	422020	2460937	146
I2211010	La Dives à Saint-Pierre-du-Jonquet [Le Ham, Hernetot]	421959	2466102	1330
I3033010	L'Ure au Bourg-Saint-Léonard	435521	2419595	80.4
I3103010	La Cance à Tanques [La Noé]	421745	2413208	91.5
I3113010	L'Udon à Écouché	418561	2415715	128
I3123210	La Maire à Sevrai [Le Poirier]	416400	2416200	61
I3302020	La Rouvre à Saint-Hilaire-de-Briouze [Le Tranchot]	404180	2412770	57.6
I3343010	Le Lambron à Taillebois [Le Fil]	395660	2427110	23
I3352010	La Rouvre à Ségrie-Fontaine [Maison de la Rivière]	399100	2427226	294
I3442310	La Druance à Périgny	384171	2438696	92.5
I3452310	La Druance à Saint-Germain-du-Crioult	386549	2433315	191
I3462010	Le Noireau à Cahan [Les Planches - CD 911]	396319	2433407	516
I3463010	La Vère à Saint-Pierre-du-Regard	390927	2431510	113
I3463510	La Visance à Landisacq	379516	2420350	4.5
I3463610	L'Aubrière à Chanu	379596	2419699	3.4
I3612010	La Laize à Saint-Germain-le-Vasson [Le Livet]	405781	2448419	96
I3712010	L'Odon à Épinay-sur-Odon	384298	2457000	76.3
I4013010	La Seulline à Maisonnelles-Pelvey [La Queue du Renard]	380180	2456947	13.5
I4022010	La Seullles à Juvigny-sur-Seullles	384585	2466795	133
I5013010	La Dathée à Saint-Germain-de-Tallevende-la-Lande-Vaumont [1]	359898	2429118	29.5
I5013040	La Dathée [totale] à Saint-Manvieu-Bocage	357553	2428934	21.5
I5013610	La Virène à Saint-Germain-de-Tallevende-la-Lande-Vaumont	361350	2429291	42
I5013615	La Virène à Saint-Germain-de-Tallevende-la-Lande-Vaumont [aval confluence Dathée]	360975	2429930	75
I5021010	La Vire à Vire	362343	2432135	133
I5101010	La Vire à Malloué	358061	2442603	469
I5121020	La Vire à Tessy-sur-Vire	351609	2447230	639
I5221010	La Vire à Saint-Lô [Moulin des Rondelles]	348881	2460124	868
I5231010	La Vire à Montmartin-en-Graignes	347536	2479120	1070
I5243010	L'Elle à Saint-Jean-de-Savigny	356204	2472230	57.3
I5321510	L'Aure à Maisons [Pont-Fatu]	375563	2484831	135
I5401510	L'Aure à Maisons [Fosses du Soucy]	375018	2484890	389
I6201010	La Douve à Magneville [Les Allains]	316894	2500393	300
I6923010	La Saire à Anneville-en-Saire	337893	2521392	107
I6943010	Le Trottebec à la Glacerie [Le Val Joli]	317628	2520198	14.8
I6943110	La Divette à Octeville	313585	2521023	102
I6943410	Le Houlbecq à Flottemanville-Hague	307240	2520254	5.27
I6963810	Le Grand Douet à Vasteville [Pont des Sablons]	299326	2518882	16.3
I6964010	Le Petit Douet à Héauville	298632	2516373	11.5
I6964210	La Diélette à Tréauville [Diélette]	296480	2514139	41.5
I6983010	L'Ay à Ancteville	322199	2463398	9.3
I7001040	La Sienne à Saint-Sever-Calvados [La Croix du Rocher]	351340	2428590	3.62
I7021020	La Sienne à Sainte-Cécile [2]	340211	2432365	84.6
I7131010	La Sienne à Treilly [Moulin-de-Sey]	322543	2447139	467
I7202010	La Soulles à Soulles [Le Bourg]	341958	2450679	29.7
I7222020	La Soulles à Saint-Pierre-de-Coutances	323478	2455357	143
I7913010	Le Boscq à Yquelon	314263	2435054	38.6
I8032020	La Sée à Tirepiéd [CD 104]	335148	2418332	314

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
I8033810	La Braize à Lolif	326551	2420582	24.9
I9031010	La Sélune à Notre-Dame-du-Touchet	356100	2405100	197
I9122020	L'Airon à Landivy	347800	2392300	147
I9233010	Le Beuvron à Saint-Senier-de-Beuvron	330634	2403893	110
J0611610	La Rance à Saint-Jouan-de-l'Isle	265649	2371236	153
J1004510	Le Frémur à Trémereuc [La Crochais]	274023	2405463	42
J1004520	Le Frémur à Pleslin-Trigavou	274380	2403800	37.5
J1105810	Le Quilloury à Plénée-Jugon [La Salle es Pie]	250446	2385179	38.5
J1123010	L'Arguenon à Plédéliac [Tournemine]	255507	2394693	352
J1313010	Le Gouessant à Andel	237542	2398624	242
J1324010	L'Évron à Coëtmieux	234795	2399426	142
J1405310	L'Urne à Plédran	223866	2397493	40.4
J1407110	Le Créac'h à Plédran	223890	2397647	3.35
J1513010	Le Gouët à Saint-Julien	217705	2395662	138
J1523010	Le Gouët à Ploufragan [Pont Noir]	217390	2400570	180
J1524010	La Maudouve à Saint-Donan	216751	2398031	24.2
J1614010	L'Ic à Binic	217412	2421902	79
J1711710	Le Trieux à Saint-Péver	197210	2401138	183
J1721710	Le Trieux à Trégonneau [Pont Broc'h'en]	196108	2415578	380
J1721720	Le Trieux à Saint-Clet [Moulin-de-Châteaulin]	194960	2424369	417
J1803010	Le Leff à Boqueho	209261	2400202	45
J2023010	Le Jaudy à Mantallot	187563	2427511	164
J2034010	Le Guindy à Plouguiel	189075	2435056	125
J2213110	Le Guic à Guerlesquin [Kerret]	162395	2405842	7.3
J2233020	Le Léguer à Pluzunet	176353	2419624	353
J2314910	Le Yar à Tréduder	164434	2421749	59
J2404010	Le Douron au Ponthou	158634	2412045	24.7
J2614010	Le Queffleuth à Plourin-lès-Morlaix [Lesquifiou]	145188	2412097	87.59
J2614020	Le Queffleuth à Plourin-lès-Morlaix [Les Trois Chênes]	144661	2414445	96
J3014330	L'Horn à Mespaul [Kertanguy]	131968	2419608	38.5
J3104010	Le ruisseau de Kernic à Plouescat [Kerret]	120790	2425325	27
J3114010	Le Quillimadec à Plouider [Coatiguinou]	111471	2419141	27
J3204010	L'Aber Wrac'h à Ploudaniel [Roch-Huez]	107158	2415585	38
J3335410	Le ruisseau de Kermorvan à Trébabu [La Haie]	77828	2399610	8.5
J3403020	L'Élorn à Commana [Kerfordenic]	131033	2395098	9.6999
J3404110	Le ruisseau de Mougau Bihan à Commana [Moulin Neuf]	131598	2396443	8.6999
J3733010	L'Hyères à Saint-Hernin	155155	2375256	526
J4124410	La rivière de Pont-l'Abbé à Plonéour-Lanvern [Moulin Neuf]	108950	2341270	51
J4124420	La rivière de Pont-l'Abbé à Plonéour-Lanvern [Tremillec]	108790	2343749	32.1
J4125720	Le Troyon à Plonéour-Lanvern [Ty Poes]	108150	2343778	12.4
J4231910	L'Odet à Quimper [Kervir 1]	121750	2352340	329
J4515420	Le Styval à Concarneau [Moulin de la Haie]	135707	2339358	23.9
J4623020	L'Aven à Pont-Aven [voie express]	146333	2338178	165
J4734010	L'Inam au Faouët [Pont Priant]	160923	2355251	118
J4803010	L'Isole à Scaër [Stang Boudilin]	151974	2349214	97.3
J5202110	Le Blavet à Kerien [Kerlouet]	186424	2391682	20.6
J5205210	Le Lestolet à Kerien	186882	2391185	14.2
J5212110	Le Blavet à Plounévez-Quintin [Pors Forêt]	187150	2384101	104
J5222110	Le Blavet à Gouarec	190559	2373041	340
J5618310	Le Fremeur à Guénin	205035	2339746	15.1
J5618320	Le Fremeur à Pluméliau	205063	2339889	5.88

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
J6407110	Le Rohan à Saint-Avé [Guern]	215368	2313091	10.199
J6407120	Le Rohan inférieur à Vannes [Menimur]	216761	2308931	21.5
J7000610	La Vilaine à Bourgon [Pont D 106]	347616	2359602	55.9
J7010620	La Vilaine à Saint-M'Hervé	343590	2355157	118
J7024010	La Valière à Erbrée [Pont D 110]	342132	2351176	31
J7090610	La Vilaine à Cesson-Sévigné [Cesson]	306279	2353522	877
J7103010	L'Ille à Montreuil-sur-Ille	302596	2373962	103
J7114010	L'Illet à Chasné-sur-Illet [Pont D 106]	309571	2368149	107
J7214010	La Flume à Pacé [Pont D 231]	293970	2361563	93
J7313010	Le Meu à Gaël	261163	2357340	135
J7356010	Le Careil à Monterfil [La Violais]	278036	2348847	13.8
J7364210	La Chèze à Saint-Thurial	280352	2345005	30.7
J7364220	La Chèze à Plélan-le-Grand [L'Enlevrier]	273631	2343510	9.3
J7513010	Le Canut Nord à Maxent [La Botelerais]	276981	2341820	26.3
J7803020	La Chère à Châteaubriant [Béré]	320524	2308788	61.5
J7833020	La Chère à Derval [Pont RN 137]	296904	2307904	349
J7963010	Le Don à Guémené-Penfao [Juzet]	290034	2299633	598
J8002310	L'Oust à Saint-Martin-des-Prés [La Ville Rouault]	207021	2382480	29
J8133010	Le Lié à la Prénessaye [Saint Sauveur Le Haut]	231545	2367510	296
J8143010	Le Lié à Plumieux [Pont de la Fosse]	228700	2357863	379
J8653010	Le Combs à Maure-de-Bretagne [Compassy]	279189	2328473	103
J8823010	L'Arz à Pluherlin [Pont d'Arz]	249467	2311675	180
K0114010	La Gazeille au Monastier-sur-Gazeille	729297	1994210	83
K0114020	La Gazeille à la Besseyre-Saint-Mary	734502	1993250	50.6
K0214010	La Gagne à Saint-Germain-Laprade [Les Pandreaux]	729620	2002705	107
K0243010	La Borne occidentale à Saint-Paulien [Larochembert]	714700	2014360	156
K0248810	La Musette à Loudes [Vendos]	712591	2011554	35
K0253010	La Borne occidentale à Chadrac	723662	2007459	428
K0253020	La Borne occidentale à Espaly-Saint-Marcel	720635	2006493	375
K0274010	La Sumène à Blavozy	728110	2007642	55
K0333010	L'Arzon à Vorey [Pont Eytravazet]	721248	2024068	156
K0403020	Le Lignon Vellave aux Vastres [Pont Marie]	750282	2000732	41
K0403030	Le Lignon Vellave aux Vastres [Pont Marie]	750282	2000732	41
K0436510	L'Auze à Araules [Pont]	744977	2011098	20
K0454020	La Dunières à Dunières	756761	2026382	141
K0513010	L'Ance du Nord à Sauvessanges	721799	2043358	189
K0614010	Le Furan à Andrézieux-Bouthéon	750130	2059859	178
K0643110	La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez [Vérines]	740250	2056002	95.2
K0714010	La Loise à Salt-en-Donzy	751926	2083970	68
K0714510	La Loise à Chambost-Longessaigne	757239	2088167	12.7
K0753210	Le Lignon du Forez à Boën	729460	2084058	371
K0813010	L'Aix à Grézolles [Château d'Aix]	724476	2096781	174
K0813020	L'Aix à Saint-Germain-Laval	729480	2093705	193
K0937010	L'Oudan à Riorges	732200	2119595	26.6
K0943030	Le Rhins à Cublize	758200	2114425	73
K1084010	La Teyssonne à Changy [La Noaillerie]	719543	2127655	23
K1211810	L'Arroux à Voudenay	756170	2235950	244
K1243010	La Drée à Saint-Léger-du-Bois [Champéceuilon]	758220	2226500	254
K1251810	L'Arroux à Dracy-Saint-Loup [Surmoulin]	751061	2224942	776
K1263110	Le Termin à Saint-Martin-de-la-Mer [Chamboux]	740095	2251058	16.4
K1314010	Le Mesvrin à Mesvres [Le Mousseau]	747020	2208980	202

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
K1321810	L'Arroux à Étang-sur-Arroux [Pont du Tacot]	741517	2207395	1798
K1414010	La Vouzance à Saint-Léger-sur-Vouzance	723280	2158521	130
K1436010	La Loddès au Donjon	712375	2151080	15.5
K1506410	Le Sapey à la Chabanne [Moulin Voir]	708431	2115818	21.5
K1533020	La Besbre à Lapalisse [Moulin Marin]	699661	2141265	452
K1753110	L'Alène à Cercy-la-Tour [Coueron]	702500	2205900	338
K1810310	L'Acolin à la Chapelle-aux-Chasses	691806	2186514	242
K1833010	L'Acolin à Saint-Germain-Chassenay	683644	2199039	384
K2070810	L'Allier à Langogne	720556	1971607	324
K2173010	Le Chapeauroux à Saint-Bonnet-de-Montauroux [Chapeauroux]	710776	1982588	398
K2223020	L'Ance du Sud à Saint-Préjet-d'Allier [Chambonnet]	702275	1989377	80
K2223030	L'Ance du Sud à Saint-Préjet-d'Allier	701647	1991423	161
K2226010	Le Panis à Saint-Préjet-d'Allier [La Romaine]	702280	1989430	70
K2234020	La Virlogeux à Saugues [Freycenet]	697657	1992580	48.5
K2316210	La Cronce à Aubazat	686666	2016284	130
K2335510	Le Céroux à Saint-Just-près-Brioude [Le Mas]	680151	2027278	82
K2373110	Le Doulon à Saint-Vert	693592	2041934	36
K2383110	Le Doulon à Domeyrat	692041	2028640	138
K2506010	Le Lagnon à Murat	643122	2011106	20.7
K2514020	L'Allanche à Allanche	646853	2025588	63.7
K2583010	L'Alagnon à Léotoing [Lanau]	669177	2039272	893
K2623010	La Couze d'Ardes à Madriat	666810	2048110	117
K2674030	La Couze Chambon à Chambon-sur-Lac [amont Lac]	644666	2063405	31.5
K2674040	La Couze Chambon à Murol [aval Lac]	646330	2063590	36
K2714010	Le Joron à Beauregard-l'Évêque [Saint Aventin]	673349	2090830	119
K2724210	L'Artière à Clermont-Ferrand [Domaine de Crouel]	662686	2086014	49
K2724220	L'Artière à Aulnat	664987	2088733	65.5
K2753030	La Morge au Cheix	664285	2106480	222
K2763110	Le Bedat à Cébazat [La Maison Rouge]	660244	2091879	40.5
K2773120	Le Bedat à Saint-Laure	674182	2100421	391
K2774010	L'Ambène à Charbonnières-les-Varennes [Beaunet]	649465	2100218	7.6
K2774020	L'Ambène à Ennezat	668869	2099228	112
K2784510	L'Andoux à Maringues	676695	2102900	60
K2821910	La Dore à Dore-l'Église	710370	2043418	105
K2834010	La Dolore à Saint-Bonnet-le-Chastel [Moulin Neuf]	701250	2050403	70
K2851910	La Dore à Ambert	708849	2061340	494
K2951910	La Dore à Peschadoires [Pont de Dore]	690458	2093766	1280
K2981910	La Dore à Dorat	688568	2099632	1523
K2994010	La Credogne à Puy-Guillaume	688129	2107730	78.8
K3053100	Le Sichon à Ferrières-sur-Sichon	701400	2114587	27
K3060310	Le Sichon à Cusset [Moulin Vidot]	687979	2124995	159
K3074010	Le Jolan à Cusset	686282	2126936	64
K3273010	Le Sioulet à Miremont [La Prugne]	628490	2098488	472
K3373010	La Bouble à Chareil-Cintrat	668625	2140739	555
K3464010	La Queune à Neuvy	673050	2175860	109
K3533010	La Burge à Agonges [Le Vieux Cheval]	661231	2181434	71.8
K3553010	La Burge à Aubigny	662051	2187510	225
K3603010	La Bieudre à Pouzy-Mésangy	651103	2189891	143
K4013010	L'Aubois à Grossouvre [Trézy]	645410	2210700	140
K4073110	La Vauvise à Saint-Bouize [La Grange]	642370	2252480	392
K4156510	L'Éthelin à Châtillon-sur-Loire	630680	2287710	27

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
K4335001	La Crérolle à Donnery	581835	2323740	13.6
K4383110	Le Dhuy à Saint-Cyr-en-Val [Gobson]	570610	2316720	216
K4552210	Le Beuvron à Chaumont-sur-Tharonne	568529	2286291	371
K4672210	Le Beuvron à Cheverny [Moulin Pezet]	531860	2281884	1100
K4853000	La Cisse à Nazelles-Négron	496620	2271480	790
K4856020	La Ramberge à Pocé-sur-Cisse [2]	498284	2273718	62.8
K4923030	La Choisille [totale] à Mettray	472971	2273811	174
K5054010	Le Boron à Saint-Marcel-en-Marcillat [Pont Rameau]	617889	2126962	76.7
K5083010	La Tartasse à la Petite-Marche [Saint-Pardoux]	618950	2130600	130
K5143110	La Voueize à Gouzou	594125	2132956	144
K5210910	Le Cher à Lavault-Sainte-Anne	620485	2145836	1658
K5333110	Le Bandais à Vieure	643360	2167701	130
K5336010	La Magieure à Vaux	618438	2157512	194
K5345910	La Chau à Colombier	634577	2140949	25.8
K5363210	L'Oeil à Villefranche-d'Allier [Fouctière]	637625	2157468	319
K5376810	Le ruisseau de Noël à Venas	631568	2164666	28
K5383010	L'Aumance à Hérisson [Pont de la Roche]	625896	2169946	928
K5383020	L'Aumance à Hérisson	628864	2167567	920
K5424010	La Sologne à Ainay-le-Château	626712	2189932	88.9
K5433020	La Marmande à Saint-Pierre-les-Étieux [Brébeurre]	621928	2191913	206
K5543010	L'Airain à Crosses	618497	2223426	300
K5552300	L'Yèvre à Savigny-en-Septaine	617233	2227817	531
K5574100	Le Moulon à Bourges [Asnières]	606431	2236027	138
K5623010	L'Auron au Pondy	623989	2200635	199
K5702310	L'Yèvre à Saint-Doulchard [Moulin Batard ancien]	601338	2231785	1750
K6022410	L'Arnon à Sidiailles	599606	2168159	162
K6102420	L'Arnon à Saint-Baudel [Les Gours]	587219	2205495	820
K6173110	La Théols à Sainte-Lizaigne [L'Échardon]	576922	2224318	797
K6192420	L'Arnon à Méreau [Alnay]	576953	2242348	2164
K6332520	La Grande Sauldre à Brinon-sur-Sauldre [2]	594151	2284962	594
K6373020	La Petite Sauldre à Ménétréol-sur-Sauldre	597620	2271890	318
K6544010	Le Poulain à Poulaines	549105	2239248	22.3
K7207510	La Ringoire à Déols	550620	2204050	97
K7217502	La Trégonce à Villedieu-sur-Indre [1]	539978	2206203	77
K7217503	La Trégonce à Villedieu-sur-Indre [La Beauce]	541270	2208120	73
K7217510	La Trégonce à Vineuil [Pont de Pierre]	546627	2214421	21
K7414010	La Tourmente à Villeloin-Coulangé [Coulangé]	516863	2237922	109
K7433010	L'Indrois à Chemillé-sur-Indrois	511425	2240928	337
K7433030	L'Indrois à Genillé	506026	2242956	396
K7526010	Le Bourdin à Sorigny	477978	2251243	22
K7529010	Le ruisseau de Montison à Thilouze	471979	2249100	14.6
K7542610	L'Indre à Lignières-de-Touraine [Marnay]	452636	2255383	3280
K7542620	L'Indre à Bréhémont	449845	2255575	3320
L0093020	La Combade à Roziers-Saint-Georges	540093	2083401	173
L0244510	La Leyrenne à Saint-Dizier-Leyrenne	551785	2111628	62
L0513010	La Roselle à Saint-Hilaire-Bonneval	522628	2081953	125
L0614010	L'Aurence à Limoges [Moulin Pinard]	517103	2096467	35.1
L0614020	L'Aurence à Isle	510876	2090737	87
L2103010	La Dive du Sud à Couhé [Abbaye de Valence]	433315	2148035	302
L2103020	La Dive du Sud à Voulon [Neuil]	438135	2152831	290
L2114010	La Bouleure à Chaunay [Les Planches]	429645	2136057	64

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
L2114020	La Bouleure à Caunay [Pont de Moquerat]	425647	2134615	22
L2201610	Le Clain à Vivonne [Le Petit Allier]	439989	2155137	965
L2213010	La Vonne à Ménigoute [Pont de la Barre]	414399	2169181	79
L2213020	La Vonne à Reffannes [La Guilbaudière]	407430	2175511	22.5
L2303010	La Clouère à Availles-Limouzine [Le Poux]	465594	2128884	16.6
L2313050	La Clouère à Château-Larcher [Le Rozeau]	442394	2161501	382
L2334010	Le Miosson à Smarves [La Bertandinière]	449313	2171160	129
L2341620	Le Clain à Poitiers [Pont Saint-Cyprien]	447400	2176950	2120
L2404030	La Boivre à Vouneuil-sous-Biard [La Ribalière]	441891	2177625	185
L2424010	La Vandelogne à Ayron [Pont d'Ayron]	427073	2186676	62
L3123010	L'Envigne à Thuré [Pont de Besse]	459447	2203009	242
L4024510	La Rozeille à Magnat-l'Étrange	594795	2087953	16.2
L4523010	La Sedelle à Crozant [Pont - Charraud]	544265	2153496	246
L5001810	La Gartempe à Saint-Victor-en-Marche	557464	2124498	78
L5014110	La Graulade à Saint-Silvain-Montaigut	554265	2127490	18.5
L5021810	La Gartempe à Folles [Mazéras]	532491	2125576	380
L5114010	La Couze à Saint-Léger-la-Montagne [Le Mazeaud]	526530	2115399	21
L5223010	Le Vincou à Bellac [1]	500655	2124725	275
L5301810	La Gartempe à Saint-Bonnet-de-Bellac	492860	2132485	1405
L5401810	La Gartempe à Lathus-Saint-Rémy [Pont de Massugeon]	491850	2143610	1730
L5511910	L'Anglin à Prissac	516860	2167680	225
L5623010	La Benaize à Jouac	517066	2151116	190
L5733020	Le Salleron à Journet [Tervannes]	496540	2166420	121
L7123001	La Veude à Lémeré [Moulin de Coutureau]	445880	2235460	412
L8102110	Le Thouet à Secondigny [Frécul]	390450	2181784	36
L8102120	Le Thouet au Tallud [La Pêchellerie]	398200	2184105	85
L8114010	La Viette à Beaulieu-sous-Parthenay [Pont de la Borde]	401203	2179695	33
L8114020	La Viette à Parthenay	400940	2183680	63
L8122110	Le Thouet à Parthenay [Pompairin]	403457	2187362	229
L8122120	Le Thouet à Châtillon-sur-Thouet	402898	2187387	223
L8122130	Le Thouet à Saint-Loup-Lamairé [Moulin de Remue]	408643	2199766	377
L8122140	Le Thouet à Saint-Loup-Lamairé [Pont de Saint-Loup]	408932	2201498	383
L8134010	Le Cébron à Gourgé [Orfeuille]	405415	2197839	116
L8134020	Le Cébron à Saint-Loup-Lamairé [Puy Terrier]	407005	2200247	162
L8134030	Le Cébron à Gourgé [Le Champ des Balastières]	404694	2195229	68
L8203010	Le Thouaret à Faye-l'Abbesse [La Rochette]	395215	2206122	140
L8216210	L'Étang Fourreau à Saint-Varent [Boucoeur]	406748	2214589	25
L8232110	Le Thouet à Sainte-Radegonde [Vrines]	403592	2225149	1170
L8303020	L'Argent à Neuil-sur-Argent [Pont Féron]	372166	2216272	61
L8307310	La Scie aux Aubiers	377061	2220088	42
L8503010	La Dive du Nord à Marnes [Moulin de Retourmay]	420761	2209945	167
L8523010	Le canal de la Dive à Pouançay [La Motte Bourbon]	415794	2235805	785
L9006210	La Lane à Saint-Patrice [rue Beaulieu]	442060	2253880	29.7
L9102210	L'Authion à Longué-Jumelles [Pont Saint-René]	408200	2267170	477
L9113010	Le Lathan à Rillé	442559	2274620	54
L9113020	Le Lathan à Vernantes [Pont des Planches]	422541	2270562	291
L9117310	Le Lathan à Vernantes [Gué du Ponceau]	423495	2270065	291
L9203010	Le Couason à Pontigné	421391	2285118	37
L9213010	Le Couason à Gée [Pont]	406560	2276080	222
L9214510	Le Taray à Mazé [Gruteau]	406321	2278799	27.7
L9222210	Le ruisseau de Baune à Bauné	399955	2280680	42.5

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
L9225410	L'Authion aux Ponts-de-Cé [Pont Bourguignon]	383940	2274055	1500
M0010610	La Sarthe au Mêle-sur-Sarthe	453780	2391847	283
M0014110	L'Hoëne à la Mesnière [La Foulerie]	459983	2396021	75.6
M0050610	La Sarthe à Mieuxcé	427929	2380401	877
M0050620	La Sarthe à Saint-Céneri-le-Gérei [Moulin du Désert]	425177	2378957	908
M0104010	L'Ornette à Saint-Pierre-des-Nids [Larray]	420083	2377909	54
M0105610	Le Terraçon à Saint-Pierre-des-Nids [Pont des Terriers]	420271	2378143	35
M0114910	Le Merdereau à Saint-Paul-le-Gaultier [Chiantin]	415770	2373090	118
M0124010	La Vaudelle à Saint-Georges-le-Gaultier	419191	2368769	89
M0134010	L'Orthe à Douillet [Le Joly]	423600	2366500	126
M0153010	La Bienne à Thoiré-sous-Contensor	441602	2369743	104
M0156510	La Saosnette à Thoiré-sous-Contensor	441764	2369795	36
M0234010	La Dive à Mamers	454440	2372944	19
M0250620	La Sarthe à Souillé	439923	2348523	2700
M0301510	L'Huisne à Réveillon [Moulin de Réveillon]	468900	2387200	78.3
M0354001	La Cloche à Margon	488930	2371670	115
M0371510	L'Huisne à la Ferté-Bernard [Château de la Plice]	475781	2357164	1190
M0384010	La Mêle à Saint-Germain-de-la-Coudre [La Sansaudière]	472598	2362016	175
M0384020	La Mêle à Souvigné-sur-Même [Moulin]	474050	2358100	190
M0401510	L'Huisne à Cherré [Les Ajeux]	474010	2353035	1420
M0416010	La Tortue à Saint-Michel-de-Chavaignes [L'Onglée]	466917	2338242	45
M0421510	L'Huisne à Montfort-le-Gesnois [La Pécardière]	455995	2339811	1890
M0424810	Le Narais à Saint-Mars-la-Brière	455494	2335422	167
M0434010	La Vive Parence à Yvré-l'Évêque [Parence]	447754	2339842	185
M0504510	Le Roule Crottes à Arnage [Gué Gilet]	440300	2328470	76
M0514010	Le Rhonne à Guécélard [La Soufflardière]	436580	2323170	77
M0524110	Le Fessard à Cérans-Foulletourte [Grand Mineloup]	429530	2320530	47
M0525210	L'Orne Champenoise à Voivres-lès-le-Mans	431408	2327278	59
M0535010	La Gée à Fercé-sur-Sarthe [Planche Augis]	422054	2325616	112
M0544010	La Vézanne à Malicorne-sur-Sarthe	418669	2315129	82
M0556010	La Claire Onde à Chantenay-Villedieu [Groteau]	412165	2328909	7
M0556030	Le Deux Fonds à Avoise [Gué Avezel]	409883	2322130	83
M0566210	L'Écharbeau à Rouez [Foullery]	420475	2351605	13
M0566220	Le Berdin à Tennie	420078	2348601	22
M0583010	La Vègre à Chevillé [Moulin le Pivot]	407616	2330470	360
M0583020	La Vègre à Asnières-sur-Vègre	407969	2324113	401
M0613010	L'Erve à Voutré [La Crousille]	402090	2351474	63
M0624010	Le Treulon à Auvers-le-Hamon [La Havardière]	399799	2328548	143
M0653110	La Vaige à Bouessay	396761	2322202	233
M0674010	La Taude à Saint-Brice	392251	2321565	48
M1021610	Le Loir à Alluyes	529034	2357934	764
M1024810	La vallée de la Malorne à Bouville	529639	2362380	122
M1025510	La vallée de Boncé à Montboissier	531100	2360690	203
M1073020	La Conie à Conie-Molitar [Pont de Bleuët]	531799	2345705	1450
M1114011	L'Yerre à Saint-Hilaire-sur-Yerre [Bêchereau]	519536	2337402	297
M1156110	La Cendrine à Ternay	482960	2304800	25
M1233030	La Bray [totale] à Savigny-sur-Braye	485311	2321169	550
M1244010	L'Anille à Saint-Gervais-de-Vic [La Cruchetière]	480823	2322010	98
M1254010	Le Tusson à la Chapelle-Gaugain [Les Riverelles]	474951	2312683	94
M1313010	La Veuve à Saint-Pierre-du-Lorouër [Petit Brives]	465160	2312515	156
M1324010	L'Étangsort à Courdemanche	467308	2314271	57

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
M1341610	Le Loir à Flée [Port-Gautier]	460688	2302893	5940
M1424410	La Maulne à Broc	440260	2287950	85
M1463010	L'Aune à Pontvallain [Casse Maillé]	438917	2306627	149
M1463020	L'Aune à Luché-Pringé [Moulin à Tan]	432267	2303790	224
M1534510	L'Argance à la Chapelle-d'Aligné [La Cheviraye]	408372	2305073	59
M3000910	La Mayenne à Pré-en-Pail [La Lande]	411006	2389116	37
M3000920	La Mayenne à Couptrain	405282	2390823	135
M3005510	Le Tilleul à Lignières-Orgères [Les Senaillères]	410098	2394641	47
M3014010	L'Aisne à Javron-les-Chapelles [Les Chapelles]	402516	2385596	145
M3020910	La Mayenne à Madré	399964	2391193	335
M3034010	La Gourbe à Saint-Ouen-le-Brisoult [Les Hayes]	401654	2395359	69.5
M3040910	La Mayenne à Couterne	396503	2393459	521
M3060910	La Mayenne à Ambrières-les-Vallées [Cigné]	383747	2386957	828
M3103030	La Varenne au Châtelier [La Fonte]	386680	2413843	45.2
M3133010	La Varenne à Saint-Fraimbault [Moulin Crinais]	377379	2392992	517
M3213010	La Colmont à la Bigottière [Lesbois]	367388	2387222	115
M3223010	La Colmont à Oisseau	377661	2377834	245
M3230910	La Mayenne à Saint-Baudelle	379913	2368876	2150
M3237310	Le Montanger à la Haie-Traversaine	380000	2374500	5.7
M3278010	Le ruisseau du Fresne à Châlons-du-Maine [Les Valettes]	376151	2356208	13
M3278020	Le ruisseau du Fresne à Louverné [Mézière]	372260	2354495	21
M3514010	L'Ouette à Entrammes	372821	2334545	118
M3711810	L'Oudon à Cossé-le-Vivien	356156	2331233	133
M3744010	L'Uzure à Saint-Michel-de-la-Roë [La Gouranderie]	341800	2324700	21
M3813010	La Verzée à Noëllet [Le Douet]	344032	2305514	103
M3816110	La Nymphé à Noëllet	342698	2305202	35
M3823010	La Verzée au Bourg-d'Iré [La Pommeraye]	353195	2302876	205
M3834010	L'Argos à Marans [La Grande Pommeraié]	359518	2300026	160
M3834030	L'Argos à Sainte-Gemmes-d'Andigné [Basse Rivière]	359394	2298942	153
M3851810	L'Oudon à Segré [écluse de Maingué]	360026	2303426	1310
M3854810	Le Tilleul à Saint-Sauveur-de-Flée	365310	2310423	5.2
M3861810	L'Oudon à Andigné [Port aux Anglais]	367086	2301065	1409
M4114010	Le Brionneau à Avrillé [La Poêle]	377983	2281546	86
M5014210	L'Aubance à Soulaines-sur-Aubance [Noizé]	384445	2267900	175
M5014220	L'Aubance à Soulaines-sur-Aubance [Charreau]	385146	2267892	172
M5104310	La Gaubretière à Cléré-sur-Layon [Le Mureau]	388471	2235013	33
M5124310	Le Lys à Aubigné-sur-Layon [La Guimardière]	386600	2250925	121
M5214010	L'Hyrome à Chanzeaux	374357	2256149	140
M5214020	L'Hyrome à Saint-Lambert-du-Lattay [Chauveau]	376398	2260101	151
M5215410	La Petite Aubance à Chemillé [La Chaperonnière]	366216	2251800	22
M6204010	Le Donneau à Mésanger [Pont-Esnault]	325725	2275014	79
M6214010	La Divatte à Landemont	327631	2257285	60
M6304310	Le Moiron à la Cornuaille [La Giraudaie]	347754	2288127	40
M6315610	Les Grands Gués à Angrie [Les Tuyas]	346548	2291571	37
M6325010	Le Croissel à Saint-Mars-la-Jaille	336150	2286254	50
M6333010	L'Erdre à Saint-Mars-la-Jaille	335375	2286508	213
M6333030	L'Erdre à Bonneuvre [Les Basses Provostières]	328288	2286032	298
M6357010	Le Cens à Orvault	300507	2259536	32.2
M6357020	Le Cens à Orvault [Pont du Cens]	303759	2257291	56
M7002410	La Sèvre Nantaise à l' Absie [La Chapelle Seguin]	380500	2188549	46
M7005610	L'Ouine au Breuil-Bernard [Les Alleuds]	378916	2193098	60.4

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
M7022410	La Sèvre Nantaise à Saint-Mesmin [La Branle]	368320	2205700	359
M7044010	L'Ouin à Mauléon [La Voie Moulins]	361390	2223001	61
M7203010	Le Moine à Maulévrier [La Rousselière]	360649	2228192	63
M7206410	Le Treizon à Mazières-en-Mauges	363613	2232223	52.5
M7302420	La Sèvre Nantaise à Clisson	325409	2238646	1390
M7314010	La Sanguèze à Tillières [Moulin Pichon]	330168	2244060	90
M7413010	La Grande Maine à Saint-Fulgent [Plessis des Landes]	333925	2217435	131
M7433110	La Petite Maine à Saint-Georges-de-Montaigne [Fromage]	325187	2219964	188
M8112610	La Boulogne à Rocheservière [La Vacherie]	305745	2223414	193
M8144010	La Logne à Saint-Colomban [La Roussière]	301590	2231460	130
M8144020	La Logne à Legé [Le Paradis]	299715	2216850	43.3
N0113020	Le Falleron à Machecoul [Le Bas Falleron]	285747	2228131	130
N0113030	Le Falleron à Saint-Étienne-de-Mer-Morte	289050	2222600	98.6
N0204210	Le Pont-Habert à Challans	278500	2215900	35
N1001510	La Vie à la Chapelle-Palluau	298000	2205000	118
N1014010	La Petite Boulogne à la Chapelle-Palluau [La Birochère]	295490	2206540	87
N1203010	Le Jaunay à Landevieille [Savarière]	284570	2192582	148
N1203020	Le Jaunay à la Chapelle-Hermier [Reveillère]	289993	2193743	125
N1203030	Le Jaunay à la Chapelle-Hermier [Lavaud]	290362	2193727	125
N2013010	L'Auzance à Vairé [Petit Besson]	287780	2183680	56.3
N2024010	La Ciboule à la Chapelle-Achard [La Renelière]	293230	2182830	89.2
N3031610	Le Grand Lay à Chantonay [St-Philbert du Pont Charraud]	341756	2189464	406
N3113010	Le Petit Lay à Saint-Hilaire-le-Vouhis	336208	2193206	262
N3304110	Le Marillet à Château-Guibert [Barilleraie]	326020	2180307	126
N3304120	Le Marillet à Saint-Florent-des-Bois [La Clopinière]	322530	2184550	48
N3403010	L'Yon à Dompierre-sur-Yon	315750	2199640	42
N3403020	L'Yon à la Roche-sur-Yon [La Grimaudière]	311910	2189830	136
N7101810	La Vendée à Foussais-Payré [Pont d'Izard]	369350	2171150	157
N7114010	La Mère à Antigny [Moulin-Textier]	361640	2182540	59
N8125010	Le Cure à Anais [Les Rivières]	351144	2135940	78
N8127010	Le Virson à Anais [Fraise]	348380	2136120	193
O0024010	La Pique à Bagnères-de-Luchon [Ravi, Usine]	457840	1750990	81
O0050010	La Garonne à Chaum	461874	1772141	1027
O0155010	La Neste de Clarabide à Loudenvielle [Rioumajou]	442614	1748411	16
O0234020	Le Ger à Aspet [2]	474126	1781077	95
O0362520	Le Salat à Soueix-Rogalle [Brousset]	507962	1765670	372
O0744020	L'Arize à Sabarat [Radelangue]	521419	1787367	236
O1002510	L'Ariège à l' Hospitalet-près-l'Andorre [amont]	555545	1731622	45
O1074310	L'Aston à Château-Verdun [Laparent]	547851	1742395	36.9
O1074320	L'Aston à Château-Verdun [Riete 1]	545158	1744942	52.8
O1076010	Le Quioulès à Château-Verdun [Riete 2]	543275	1745824	52.8
O1494310	La Touyre à Saint-Quentin-la-Tour	566010	1780359	108
O1494330	La Touyre à Lérans	565274	1776352	90.3
O1524010	L'Ambronne à Caudeval	569241	1786468	66.3
O1532910	L'Hers Vif à Roumengoux	567174	1786729	665
O1662910	L'Hers Vif à Calmont	539725	1810312	1350
O1804050	La Lèze à Gabre [Soutembel]	526431	1784200	13.5
O1814040	La Lèze à Artigat	526368	1795153	98
O1847410	Le Vermeil à Lézat-sur-Lèze	521532	1809979	6.92
O2172510	L'Hers Mort à Baziège	541176	1827946	445
O2186810	Le Tricou à Labège	534378	1836843	3.39

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
O2215910	Le Jean de Dieu à Aurin	547822	1837378	2.84
O2304020	Le Girou à Maurens-Scopont	557246	1842472	108
O2324010	Le Girou à Bourg-Saint-Bernard	547804	1847092	310
O2517410	La Montousse à Auradé	496723	1840947	3
O2886210	Les Marres à Saint-Nauphary	530320	1884150	1.27
O3005910	L'Alignon à Saint-Maurice-de-Ventalon [Cloutasses Basses]	720176	1929554	0.8
O3005920	Le Valat des Cloutasses à Vialas [Cloutasses Hautes]	720189	1929786	0.36
O3005930	La Latte à Saint-Maurice-de-Ventalon	719609	1930452	0.195
O3006620	Le Valat de la Sapine à Vialas [Sapine Haute]	717300	1930030	0.2
O3026210	Le Mirals [ou Rhunes] aux Bondons [Rhunes]	706667	1932216	11.7
O3064020	Le Taron à Vebron	700737	1924598	78
O3084310	La Mimente à la Salle-Prunet	701868	1924750	124
O3094020	Le Taron à Florac [Pont de la Bécède]	700494	1925812	267
O3237210	Le ruisseau la Barbade à Aguessac [Pont de la RN 9]	660207	1906937	45
O3335010	Le ruisseau du Mas de Pomier [Durzon] à Nant [Le Mas du Pré]	676209	1888845	97.7
O3395010	Le ruisseau de l'Espérelle (des G à la Roque-Sainte-Marguerite [L'Espérelle])	669932	1902632	115
O3405210	Le ruisseau de Saint Martin à Creissels [Boundoulaou]	657270	1896863	17.1
O3414010	Le Cernon à Sainte-Eulalie-de-Cernon [terrain de Football]	664710	1886589	17.3
O3416610	Le ruisseau de Balastière (Brias) à Tournemire [Balastière]	655480	1885801	7.45
O3416810	Le ru de la pisciculture de la Mo à Lapanouse-de-Cernon [La Mouline]	660212	1888301	27.1
O3509310	Le ru de Céras à Brusque [Céras]	650016	1861556	5.5
O3554010	Le Dourdou du Tarn à Vabres-l'Abbaye	640239	1882857	380
O3564620	La Sorgue à Cornus [aval pisciculture]	668697	1875358	37.2
O3565410	Le ruisseau de Cornus (la Lèbre) à Cornus [Gloriette]	667660	1878588	8.77
O3566110	Le ruisseau de Saint Beaulize [la Fousette] à Saint-Beaulize [Fousette]	662630	1878505	10.7
O3575510	L'Anrou (Annou) à Saint-Jean-et-Saint-Paul [Aigubelle-Roubiérou]	658660	1881225	6.44
O3584620	La Sorgues à Saint-Affrique [Vendelove]	644695	1881084	352
O3585710	Le ruisseau de Saint Jean d'Alcap [Vailhauzy] à Saint-Affrique [Dragonnière]	648469	1883768	8.2
O3754010	Le Rancé à Saint-Sernin-sur-Rance	621370	1876166	290
O3774010	Le Rancé à Curvalle	616006	1880686	390
O4314010	Le Thore à Sauveterre [La Bourgade]	617087	1830174	80.1
O4344310	L'Arn à Anglès [Les Taillades]	618683	1837861	81
O4364310	L'Arn au Vintrou [Saints-Peyres]	611800	1837170	129
O4384010	Le Thore à Payrin-Augmontel [Pont de Rigautou]	602858	1834949	433
O4514030	Le Sor à Garrevaques	570058	1832728	58.3
O4524010	Le Sor à Poudis	572001	1835422	178
O4544020	Le Sor à Cambounet-sur-le-Sor	582065	1841643	372
O4745610	Le Lézert à Roumégoux [La Bancalié]	595684	1866971	26.5
O4984310	Le Tescou à Montauban	521660	1889600	315
O5000510	Le Verlenque à Sévérac-le-Château [Verlenque]	658872	1921550	1.76
O5005710	Le ru de Cayrac le Haut à Sévérac-le-Château [Cayrac le haut]	659873	1923334	8.13
O5005810	Le ru de Bastide à Sévérac-le-Château [Bastide]	658702	1922625	4.13
O5010515	Le ru de Lagarde (Tantayrou) à Lapanouse [Tantayrou]	654385	1928783	0.93
O5010535	Le ruisseau de Buzareingues à Buzeins [Buzareingues]	653517	1929615	1.19
O5040510	Le Serre à Campagnac [La Serre]	659685	1933678	1.7
O5042510	L'Aveyron à Palmas [Pont de Manson]	640615	1933243	270
O5045510	Le Cuge à Vimenet	646806	1932957	23.8
O5045610	Le ru de Mayrinhac le Bas à Vimenet [captage]	648855	1932394	15.2

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
O5055110	Le ru de l'Etang (Brèves) à Saint-Saturnin-de-Lenne [amont de la minoterie]	654248	1934851	14.8
O5055310	Le ru de Duc à Campagnac [Canac]	658875	1933824	4.11
O5624010	Le Cérou à Rosières	582990	1895692	146
O5624020	Le Cérou à Valderiès [Maux]	592812	1893303	116
O5685020	Le ruisseau de la Gourgue à Saint-Antonin-Noble-Val [Gourgue]	549608	1908408	65
O6475910	La Lambronne à Lamontjoie	454338	1898528	6.8
O7001510	Le Lot à Bagnols-les-Bains	705720	1946960	94.5
O7015810	L'Esclancide à Pelouse [Les Salces]	701960	1949730	31
O7021510	Le Lot à Mende [amont]	692376	1947397	250
O7021530	Le Lot à Mende [aval]	691730	1947050	261
O7110502	Le Doulou à Saint-Pierre-de-Nogaret [Ferrière]	665000	1938140	80
O7145210	La Boralde de Saint-Chély à Saint-Chély-d'Aubrac [Pont des Touzes]	649840	1955500	18
O7155010	La Boralde de Bonneval au Cayrol [Bonneval]	636580	1951366	100
O7175010	La Coussane à Coubisou [Cabrespine]	630630	1953506	41
O7200710	Le ruisseau de Saint Saturnin à Banassac [Roquaizou]	666529	1933997	2.57
O7410401	Le Bes à Marchastel [Pont de Marchastel]	659800	1961850	81.599
O7434010	Le Lander à Roffiac [Le Blaud]	656130	2006130	96
O7515510	Le Remontalou à Chaudes-Aigues [Moulin de Gastal]	653369	1984478	27.5
O7535010	L'Epie à Oradour [Pont-de-Rochebrune]	647228	1994947	63.5
O7625210	L'Ondes à Saint-Symphorien-de-Thénières	629434	1973151	37
O7814010	Le Dourdou à Bozouls	630959	1939169	84
O7825010	Le ruisseau des Bardels à Muret-le-Château	618928	1943675	52
O7894010	Le Dourdou à Grand-Vabre	601540	1959017	535
O8264010	La Rance à Maurs [Les Brauges]	588256	1965515	237
O8474010	Le Boudouyssou à Penne-d'Agenais	477691	1933001	248
O9285010	Le Lescouroux à Soumensac	442781	1966505	41
O9564010	Le Ciron à Préchac	386471	1938028	771
O9675010	Le Saucats à Saucats	363686	1966722	16
O9675210	Le Jaugat à Saucats [Argilas]	365230	1964156	9.25
O9685310	La Pimpine à Cénac	377230	1980150	48.8
P0064310	Le Chavanon à Bourg-Lastic [Chavanon-Chantier]	614530	2072377	282
P0304010	La Santoire à Ségur-les-Villas [La Carrière]	638490	2021428	61
P0524010	La Petite Rhue à Marchastel [Pont de la Rodde]	628714	2030861	75.5
P0555010	La Véronne à Riom-ès-Montagnes	625750	2031780	44
P0814020	La Sumène à Antignac	616336	2037809	71.5
P0885020	Le Mars au Falgoux	622516	2017000	20.5
P1144310	La Soudeille à Moustier-Ventadour [Ventadour]	582996	2043435	122
P1454010	La Bertrande à Saint-Ilvide	597920	2007959	115
P1744010	La Jordanne à Aurillac [passerelle Paul Riotte]	608530	1991450	105
P1780520	Le ruisseau de Roannes à Saint-Mamet-la-Salvetat [CD48 Amont Confluence Faugrand]	601376	1985040	71
P1834010	L'Authre à Ytrac [Le Vert]	599183	1990796	143
P1852910	La Cère à Saint-Étienne-Cantalès	590679	1993886	691
P2054010	La Bave à Frayssinhes [Le Martinet]	569270	1984199	183
P2175410	La Fondial à Condat [Le Bayle]	547080	2000423	10
P2274020	L'Ouyse à Calès	538301	1978445	540
P2315020	La Borrèze à Lachapelle-Auzac [Lamothe]	531677	1990030	120
P3064010	La Soudaine à Soudaine-Lavinadière	553310	2061523	78
P3164010	Le Bradascou à Uzerche [Pont-Vieux]	538985	2048090	178
P3274010	La Loyre à Saint-Viance [Pont de Burg]	529422	2024565	274

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
P3352510	La Corrèze à Corrèze [Pont de Neupont]	565058	2041907	168
P3464010	La Vimbelle à Bar	557523	2035468	147
P3522510	La Corrèze à Tulle [2]	554207	2029001	358
P4015510	Le Sorpt à Chasteaux [Rozières]	531765	2009984	22
P4074010	L'Elle à Terrasson-la-Villedieu [La villedieu]	516017	2015773	78
P4135010	Le Coly à Condat-sur-Vézère [Pont de Bouch]	515038	2012097	167
P5685610	Le Corral à Ruch	412300	1977239	3.94
P5715210	Le Courmeran à Martres [Boissonneau]	402610	1970950	16.2
P6001510	L'Isle à Saint-Yrieix-la-Perche	509006	2064037	87
P6045010	La Valouse à la Coquille	494297	2060353	31.6
P6161510	L'Isle à Mayac	490149	2032331	800
P6202510	L'Auvézère à Benayes	532711	2057730	23.4
P6222510	L'Auvézère à Lubersac	523653	2049499	112
P6362510	L'Auvézère à Tourtoirac	499706	2030927	663
P6382510	L'Auvézère au Change [Aubarède]	485416	2022667	884
P8074010	La Côte à Saint-Jean-de-Côle	482528	2047923	168
P8102510	La Dronne à Brantôme [Pont des Roches]	470322	2041782	582
P8204010	La Lizonne aux Graulges [Puyrenier]	452365	2056304	119
P8284010	La Lizonne à Saint-Séverin [Le Marchais]	437370	2034998	640
P9315010	La Barbanne à Puisseguin [Moulin de Bassat]	410790	1994495	6.37
P9414010	Le Moron à Saint-Christoly-de-Blaye	378514	2019324	31.4
Q0120050	L'Adour à Montgaillard	418440	1793975	367
Q0360010	L'Adour à Hères [Ju Belloc]	410967	1842571	1000
Q0522530	L'Arros à Tournay	429650	1800000	0
Q0613910	Le Lascors à Ladevèze-Rivière	418880	1840750	0
Q0740020	L'Adour à Riscle	405050	2154350	2350
Q1100030	L'Adour [total Adour+canal] à Aire-sur-l'Adour	390295	1859217	0
Q2354010	L'Estampon à Retjons	390728	1901455	270
Q2364010	L'Estampon à Arue	389910	1899519	378
Q2414313	La Gouaneyre à Cachen	377591	1901070	86
Q2544310	L'Estrigon à Cère	368275	1890380	210
Q2554310	L'Estrigon à Campet-et-Lamolère	366947	1883742	252
Q2584610	Le Geloux à Saint-Martin-d'Oney	361801	1885662	130
Q4124010	Le Gave d'Héas à Gèdre	410171	1756510	84
Q4564010	Le Gave de Cauterets à Cauterets [Pont de Fanlou]	399599	1769242	137
Q4761010	Le Gave de Pau à Lourdes	405336	1791383	1070
Q6014010	Le Gave de Brousset à Laruns [Allias]	374360	1768640	60
Q9034610	La Nive de Béhérobie à Saint-Jean-Pied-de-Port	309204	1801723	115
Q9102510	La Nive à Ossès	304550	1809900	500
Q9302510	La Nive à Itxassou	296432	1819670	850
Q9312510	La Nive à Cambo-les-Bains	297461	1824343	870
R2015010	Le Bief à Courcôme	428867	2111447	29
R2104010	L'Aume à Longré	418247	2114399	90
R2125011	L'Aume à Oradour [Gouge]	418750	2104150	191
R2134020	L'Aume [totale] à Ambérac [Les Marais]	422618	2099439	452
R2335050	La Touvre [résurgence] à Gond-Pontouvre [Foulpougne]	431072	2077101	0
R2335060	La Lèche [résurgence] à Touvre [résurgence de la Lèche]	438027	2075268	0
R2335070	L'Échelle à Touvre [Chez Drau]	438138	2075193	63
R3104010	La Soloire à Bréville	397982	2091815	60.3
R3114010	La Soloire à Sainte-Sévère [Sainte-Sévère]	399357	2086866	88.599
R4122510	Le Né à Saint-Fort-sur-le-Né	393499	2067299	529

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
S0364020	La Livenne [totale] à Saint-Aubin-de-Blaye	371793	2031747	222
S1205110	La Matouse à Hourtin [Nord]	332201	2027856	17
S1215010	La Berle de la Garroueyre à Hourtin	333932	2019690	33.2
S2134010	La Petite Leyre à Belhade	358901	1935035	403
S2235010	Le ruisseau de Lilaire à Belin-Béliet [Muret]	348400	1940521	33.5
S2275110	Le Tagon à Biganos	336150	1967580	16.8
S3124310	Le Nasseys à Parentis-en-Born [Les Espalanques]	329276	1933023	95.1
S3214010	Le Canteloup à Saint-Paul-en-Born [Talucat]	321185	1920914	155
S4235410	Le ruisseau de Hardy à Soustons	303267	1867654	30.8
U0234010	L'Amance à Raincourt	864679	2323187	430
U0415030	Le Breuchin à Breuches [Champs Coquards]	897750	2318780	0
U0424010	La Lanterne à Briaucourt	893799	2320724	391
U0460510	Le Planey à Anjeux [Le Triquet]	890000	2326000	30
U0525010	La Colombine à Frotey-lès-Vesoul	889227	2298162	152
U0534010	Le Durgeon à Chariez	880068	2298515	375
U0534020	Le Durgeon à Pontcey	877707	2299413	410
U0620530	La Romaine à Maizières	876490	2283690	36.5
U0625010	La Romaine à Fresne-Saint-Mamès	863812	2289713	201
U0625020	La Romaine à Maizières	876998	2283123	24
U0704010	Le Salon à Coublanc	834640	2303720	123.6
U0715010	La Resaigne à Coublanc	834350	2303660	54
U0815010	La Morthe à Saint-Broing	853510	2277320	235
U0820010	La Saône à Gray	845350	2277295	5390
U1014010	L'Ognon à Vouhenans	911180	2303251	203
U1014020	L'Ognon à Montessaux	916668	2313033	168
U1025030	Le Rahin au Val-de-Gouhenans	911309	2299813	149
U1035410	Le Scey à Beveuge	912418	2293675	165
U1044010	L'Ognon à Chassey-lès-Montbozon [Bonnal]	902515	2286421	866
U1074020	L'Ognon à Pin	866760	2263450	0
U1115020	La Bèze à Bèze [Ferme de Rome]	821737	2277225	32.6
U1115030	La Bèze à Bèze [grotte]	821020	2278710	32
U1120010	La Saône à Auxonne	830626	2247735	8898
U1215020	L'Ignon à Diénay	804660	2282923	310
U1215030	L'Ignon à Villecomte	802951	2282917	304
U1235010	La Norges à Norges-la-Ville	807579	2270496	5.5
U1314010	L'Ouche à la Bussière-sur-Ouche	780949	2248318	304
U1329010	Le Suzon à Val-Suzon	795028	2272133	70
U1329020	Le Suzon à Ahuy	803476	2266906	141
U1329030	Le Suzon à Val-Suzon [Village]	792960	2270670	55
U1415020	La Vouge à Saint-Bernard	803102	2242272	34.29
U1415030	La Vouge à Saint-Nicolas-lès-Cîteaux [Abbaye-de-Cîteaux]	809519	2239896	76.09
U1415410	La Sansfond à Saulon-la-Rue	806980	2250498	51.5
U1415810	Le Chairon à Noiron-sous-Gevrey	808067	2248012	63.2
U1416010	La Varaude à Izeure [Tarsul]	810813	2245904	84.2
U1416410	La Bièvre à Brazey-en-Plaine	818395	2240713	61.8
U1420011	La Saône à Lechâtelet [1]	813510	2232730	11700
U2002010	Le Doubs à Mouthé	895985	2196725	30
U2015030	Le Bief Rouge à Longevilles-Mont-d'Or	903990	2203070	23
U2015210	Le ruisseau de la Drésine à Remoray-Boujeons	898591	2202826	14.6
U2022015	Le Doubs à Pontarlier [Ville]	906108	2219616	390
U2035040	Le Drugeon à Bonnevaux	894129	2208240	35.5

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
U2035050	Le Drugeon à Vaux-et-Chantegrue	898360	2208807	13
U2040520	La Jougnena à Jougne [La Ferrière 2]	909080	2200550	44
U2215010	Le Dessoubre à Rosureux	926211	2254344	360
U2225410	Le Gland à Meslières	943406	2278238	41
U2225420	Le Gland à Seloncourt	940900	2283344	67
U2225810	La Doue à Glay [Papeterie]	944874	2277153	0
U2315010	La Madeleine à Étueffont	943705	2312940	10
U2315220	L'Autruche à Fontenelle [2]	946950	2301520	44
U2315230	L'Autruche à Roppe	943829	2306688	7.6
U2324210	La Bourbeuse à Froidefontaine	946520	2295350	316
U2330600	La Feschotte à Badevel	946740	2287800	9
U2334020	L'Allaine à Joncherey	950800	2291100	319
U2334030	L'Allaine à Morvillars [Graviers Rançon]	946700	2292880	359
U2345810	La Rosemontoise à Riervescemont [Rosemont]	939094	2316702	7.5
U2354010	L'Allan à Courcelles-lès-Montbéliard	934065	2287310	1120
U2354020	L'Allan à Montbéliard	936650	2287940	960
U2402020	Le Doubs à Lougres	927650	2282000	3420
U2405210	Le Lougres à Lougres	928300	2284100	49
U2412020	Le Doubs à Branne	911193	2272014	3790
U2415010	Le ruissau de Soye à Soye	912908	2279198	30
U2419110	Le Buhin à Sancey-le-Grand	918108	2264927	35
U2425020	L'Audeux à Silley-Bléfond	902729	2265871	167
U2425050	L'Audeux à Bremondans	907122	2256349	42
U2425070	L'Audeux à Pont-les-Moulins [Chatel]	904300	2266650	168
U2425210	Le Cusancin à Cusance [source Noire]	909800	2266150	71
U2425220	Le Cusancin à Cusance [source Bleue]	909853	2266378	108
U2425230	Le Cusancin à Guillon-les-Bains [Bains-de-Guillon]	905723	2265747	196
U2425250	Le Cusancin à Cusance	909350	2266220	180
U2426010	Le ruisseau de Pont-les-Moulins à Pont-les-Moulins	904050	2265600	40
U2502010	Le Doubs à Esnans [Beaumerousse]	902300	2267780	4140
U2540520	L'Arne à Lavans-lès-Dole	849235	2244870	51.5
U2565010	La Clauge à Villette-lès-Dole [Arcore]	838707	2231612	137
U2565020	La Clauge à la Loye	843373	2231157	116
U2619110	Le ruisseau de Boujailles à Boujailles	886411	2216190	7.45
U2635010	La Furieuse à Salins-les-Bains	869512	2221927	43
U2655010	La Cuisance à Bans	847368	2226446	168
U2655030	La Cuisance à Mesnay	864097	2215911	70
U2715010	L'Orain au Deschaux	841138	2222990	181
U2745010	La Guyotte à Charette [Quintin]	817015	2213520	160
U3004010	La Dheune à Essertenne	770515	2202559	67.5
U3034010	La Dheune à Palleau	804750	2220400	985
U3035010	Le Meuzin à Villars-Fontaine	793127	2242704	50.4
U3035810	La Lauve à Ladoix-Serrigny [source de Ladoix]	792791	2233428	7.6
U3120010	La Saône à Chalon-sur-Saône	793813	2201750	21000
U3310010	La Saône à Tournus	797916	2176040	22860
U3404010	La Seille à Voiteur [amont]	850151	2200618	147
U3404020	La Seille à Arlay	843102	2200498	204
U3404030	La Seille à Voiteur [aval]	850502	2200252	174.4
U3415030	La Brenne à Sens-sur-Seille [L'Estalet]	825780	2198600	508
U3434320	Le Solnan à Verjon [Village]	831903	2153879	4
U3434340	Le Solnan à Domsure	825875	2164075	117

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
U3445010	Le Sevron à Saint-Étienne-du-Bois [Pont du Chatelet]	827373	2147659	55
U3445020	Le Sevron à Béný	826180	2150730	61
U3445030	Le Sevron à Varennes-Saint-Sauveur	823072	2170874	183
U3446410	La Gizia à Frontenaud	825825	2176975	85.4
U3455010	La Vallière à Lons-le-Saunier	846853	2190868	40
U3455020	La Vallière à Montmorot	842780	2191245	54
U3455030	La Vallière à Savigny-en-Revermont	836311	2185534	119
U4014020	La Reyssouze à Bourg-en-Bresse [Majornas]	822585	2140400	130
U4234020	La Veyle à Biziat [gourt des parties]	801795	2140635	490
U4305410	La Denante à Davayé	787052	2147482	11.1
U4405020	La Chalaronne à Châtillon-sur-Chalaronne	802550	2127488	175
U4506010	La Morcille à Villié-Morgon [Pont des Versauds]	779605	2131087	3.5
U4515410	La Vauxonne à Saint-Georges-de-Reneins [Pont de Bouchanin]	785780	2121862	61.5
U4515420	La Vauxonne à Saint-Étienne-des-Oullières [Buyon]	780810	2120373	49.3
U4525210	Le Morgon à Villefranche-sur-Saône	785816	2112500	68
U4625010	Le Soanan à Saint-Vérand [La Tracole]	768589	2103320	53
U4636610	La Turdine à l' Arbresle [Gobelette]	776037	2095536	161
U4710010	La Saône à Couzon-au-Mont-d'Or [2]	794081	2097170	29900
V0155010	Le Risse à Saint-Jeoire [Pont du Risse]	919676	2134678	57.5
V0235010	La Menoge à Vétraz-Monthoux	903850	2137555	160
V0316610	L'Ugine à Saint-Paul-en-Chablais	931175	2159449	25
V0415010	L'Allondon à Saint-Genis-Pouilly	883530	2144311	37.5
V0415040	L'Allondon à Échenevex [Naz-Dessous]	884331	2150950	3.2
V0415410	Le Lion à Prévessin-Moëns [Vesegnin]	886797	2147039	11
V1015020	La Valserine à Chézery-Forens [Les Hirondelles]	874076	2144467	105
V1015040	La Valserine à Lancrans [Moulin de Métral]	869499	2130460	395
V1015050	La Valserine à Lancrans [Le Viret]	868900	2132720	390
V1114010	Les Usses à Musièges [Pont des Douattes]	880920	2118302	182
V1225010	La Filière à Argonay	896780	2113407	140
V1225020	La Filière à Thorens-Glières	904631	2117021	31
V1235410	La Bornette à Doussard	900734	2093352	10
V1235420	La Bornette à Lathuile	901029	2094691	11.6
V1258410	La Nephaz à Rumilly	880030	2102360	31
V1305030	Le ruisseau de Belle-Eau à Voglans	877190	2076570	5.02
V1305210	Le Tillet à Aix-les-Bains	878077	2080503	34
V1315050	La Leysse à la Ravoire	883050	2070195	78
V1316440	L'Hyères à Chambéry [Charrière-Neuve]	878692	2070558	75.2
V1318210	L'Albane à Chambéry [Pont Chevalier]	881333	2068817	46.5
V1325020	Le Sierroz à Aix-les-Bains	877523	2084634	130
V1454310	Le Furans à Pugieu [Pont du Martinet, 1]	856680	2096629	45.2
V1454320	Le Furans à Pugieu [Pont du Martinet, 2]	856809	2096604	48
V1464310	Le Furans à Arbignieu [Pont de Peyzieu]	859191	2085056	160
V1505110	La résurgence de Fontaine-Noire à Saint-Pierre-de-Chartreuse	876060	2042770	0
V1506010	Le Merdaret à Saint-Joseph-de-Rivière	862747	2047910	32.5
V1525410	L'Ainan à Saint-Geoire-en-Valdaine	858340	2055780	41
V1525420	L'Ainan à Saint-Geoire-en-Valdaine [Pont de la Martinette]	858470	2056075	45
V1534010	Le Guiers à Romagnieu	859507	2068298	575
V1535210	La Leysse à Nances [Novalaise]	869975	2070075	26.6
V1714010	La Bourbre à Cessieu	837200	2067482	150
V1725010	L'Hien à Saint-Victor-de-Cessieu	837196	2066165	68
V1725020	L'Hien à Saint-Victor-de-Cessieu	839020	2065050	51.7

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
V1734010	La Bourbre à Bourgoin-Jallieu	830740	2069710	304
V1735010	L'Agny à Nivolas-Vermelle	831610	2066440	58.5
V1755010	Le canal Catelan à l' Isle-d'Abeau	826289	2074296	167
V2030410	La Saine à Syam	875460	2195650	196
V2039110	Le ruisseau d'Illay à la Chau-du-Dombief	871918	2185973	5.25
V2305610	Le Paillon à Clairvaux-les-Lacs	861883	2178970	14.6
V2305630	Le Paillon à Clairvaux-les-Lacs [Clairvaux aval]	861522	2181199	12.8
V2414020	La Bienne à Tancua	878450	2174353	141
V2414030	La Bienne à Morez	882150	2176720	85
V2420560	Le Tacon à Saint-Claude	871973	2159235	164
V2429010	L'Embouteilleux à la Pesse	871613	2150921	3.25
V2505020	L'Oignin à Maillat [Pontet]	847502	2131280	92
V2619110	La Thoreigne à Orgelet [Pont de la Thoreigne]	850182	2176625	13
V2619120	La Thoreigne à Orgelet [Sézéria]	848253	2173914	21
V2814050	Le Suran à Germagnat	839050	2150100	187
V2924020	L'Albarine à Chaley	847818	2111002	135
V2934010	L'Albarine à Saint-Denis-en-Bugey [Pont Saint Denis]	832150	2110478	288
V3005610	La Sereine à Montluel	811270	2098461	78
V3025110	L'Ozon à Sérézin-du-Rhône [La Sarrazinière]	793976	2073324	69
V3035010	Le Garon à Brignais	786931	2079460	79
V3036610	Le ruisseau de Fondagny à Saint-Didier-sous-Riverie [Madone]	779645	2070459	4
V3115010	Le Dorlay à la Terrasse-sur-Dorlay	775440	2050370	17
V3204010	La Gère à Villeneuve-de-Marc [Pont Rouge]	819355	2054721	14.9
V3215010	La Vesonne à Estrablin [Pont de Bourgeat]	805260	2060510	156
V3224010	La Gère à Pont-Évêque [Cancane]	800405	2062019	301
V3225410	La Véga à Pont-Évêque [Cancane]	800390	2062110	87.5
V3225420	La Véga à Pont-Évêque	800475	2062425	87.5
V3324010	Le Dolon à Revel-Tourdan	810523	2046088	21
V3404310	Le Rival à Brézins	833423	2043060	180
V3405010	La Combe-Robert à Saint-Geoirs	835493	2039950	12.4
V3424310	Le Rival à Beaufort	818220	2041120	461
V3434010	Les Collières à Saint-Rambert-d'Albon	794251	2036211	650
V3515010	La Deume à Saint-Julien-Molin-Molette [La Garinière]	778690	2034944	109
V3515610	Le ruisseau des Préaux à Bourg-Argental	773520	2034782	22.1
V3517010	Le Ternay à Savas [Ternay]	780365	2037001	25.5
V3614010	La Galaure à Saint-Uze	797555	2023101	232
V4015030	La Barberolle à Barbières [Pont des Ducs]	821690	1998450	9.6
V4025010	L'Embroye à Touloud	793438	1990098	7.4
V4034010	La Véore à Chabeuil [Pont des Faucons]	814700	1993529	60
V4034020	La Véore à Beaumont-lès-Valence [Laye]	804780	1988787	192
V4124010	L'Eyrieux au Cheylard	764867	1942516	300
V4275020	La Gervanne à Plan-de-Baix	825843	1985212	38
V4287010	La Grenette à la Répara-Auriples	810934	1966298	6.7
V4455020	Le Jabron à Montélimar	792272	1952878	206
V5004020	L'Ardèche à Pont-de-Labeaume [Pont de Rolandy]	754598	1964915	160
V5004030	L'Ardèche à Meyras [Pont Barutel]	753371	1965166	102
V5006210	La Fontolière à Meyras [Pont de Pourtalou]	754867	1965230	131
V5026410	La Ligne à Labeaume [Gourami]	758513	1945345	112
V5035010	La Beaume à Saint-Alban-Auriolles	757081	1940576	241
V5035020	La Beaume à Rosières	752459	1944094	210
V5046610	L'Altier à Altier [La Goulette]	723630	1941160	103

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
V5214010	Le Lez à Montségur-sur-Lauzon	803069	1932790	156
V5304010	L'Ayguès à Rémuzat	840106	1938917	202
V5324010	L'Ayguès à Saint-May [Pont de la Tune]	835869	1941489	473
V5404020	La Cèze à Sénéchas [Echelette]	736605	1925824	79.7
V5404040	La Cèze à Aujac	734124	1927768	69
V5406020	L'Homol à Sénéchas [Davaladou]	734326	1926050	31.2
V6105610	Le Brégoux à Carpentras [Château de La Plane]	819777	1903090	23
V6115010	Le Mède à Saint-Pierre-de-Vassols	824527	1903604	89
V6155410	Le Mède à Aubignan [Meyras]	815136	1902120	126
V6155420	La Grande Levade à Bédarrides [La Palud]	807489	1896253	260
V6155610	Le Brégoux à Aubignan	815510	1903260	37
V6155620	Le Brégoux à Sarriens [Bas Malançon]	812920	1902947	95
V7104010	Le Gardon de Saint-Martin à Saint-Étienne-Vallée-Française [Roq.]	719060	1910680	30.5
V7105210	Le Gardon de Saint-Germain à Saint-Germain-de-Calberte [Bastide]	719600	1912800	30.5
V7115020	Le Gardon de Sainte-Croix à Sainte-Croix-Vallée-Française [Pont du Martinet]	712870	1909565	99
V7124020	Le Gardon de Mialet à Saint-Jean-du-Pin [Aubignac]	725800	1904130	215
V7135020	Le Gardon de Saint-Jean à l' Estréchure [Soucis]	717850	1901165	128
V7135030	Le Gardon de Saint-Jean à Saumane	714952	1902365	104
V7136610	La Coulègne à Cognac	719106	1892807	1.52
V7155020	Le Gardon d'Alès à Arzenc-d'Apcher [La Farelle]	721758	1919587	30
V7156210	Le Galeizon à Saint-Paul-la-Coste [Aube Morte]	731500	1907794	62.2
V7177010	Le Bourdic à Aubussargues	760242	1890953	33.7
V7184010	Le Gard à Sanilhac-Sagriès [La Baume]	768252	1884177	1580
V7185010	L'Alzon à Uzès [Moulin de Bargeton]	767640	1891290	71
W0244010	Le Doron de Bozel à Moûtiers	927360	2062413	668
W0425010	La Chaise à Ugine [Pont de Soney]	915250	2092470	79
W1006010	L'Avérole à Bessans [Avérole]	970958	2044757	45.4
W1105020	Le Gelon à Bourgneuf	902334	2068609	110
W1105030	Le Gelon à la Rochette	895666	2058512	62.5
W2035010	Le torrent de Malcros à Champoléon	906001	1977731	0.85
W2215030	La Souloise à Saint-Étienne-en-Dévoluy [2]	885521	1972372	39.799
W2216410	La Ribière à Agnières-en-Dévoluy [La Combe]	880996	1972386	24.5
W2405020	La Jonche à Pierre-Châtel	872508	2002370	10.4
W2804020	La Gresse à Gresse-en-Vercors [Pont Jacquet]	855381	1997056	24.2
W3005010	Le Furon à Engins	858270	2025090	33
W3005210	Le Bruyant [résurgence] à Saint-Nizier-du-Moucherotte	857913	2021700	0
W3005410	Le Germe à Sassenage [Les Cuves]	860484	2028509	0
W3015010	La Vence à Proveysieux [Pont de l'Oulle]	864026	2032957	63.5
W3304010	La Bourne à Villard-de-Lans [Pont des Aniers]	853481	2015736	17.4
W3305410	Le Font Noire à Villard-de-Lans	853605	2013761	0
W3345010	La Lyonne à Bouvante	830532	1997113	21
W3534020	L'Herbasse à Clérieux [Pont de l'Herbasse]	805943	2009375	187
X0010020	La Durance à Val-des-Prés [La Vachette]	942519	2000180	210
X0015010	La Guisane au Monétier-les-Bains [Le Casset]	926962	2007025	78.5
X0415410	Le Riou de Crachet à Saint-Paul [Col de Vars]	939614	1959073	3.5
X0456310	La source Pruneyret au Lauzet-Ubaye [tunnel]	925470	1945810	10
X0605010	La Luye à Jarjayes [Les Genstriers]	898102	1950540	120
X1515010	La Laye à Limans [Les Ybourgues]	873088	1891034	125
X2002020	Le Verdon à Allos [La Foux]	937911	1930450	10.1

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
X2002030	Le Verdon à Colmars	943082	1917996	158
X2006010	Le Chadoulin à Allos	943050	1924700	34.6
X2035210	L'Ivoire à Allons	939087	1898794	37.5
X2305010	Le Jabron à Comps-sur-Artuby [Pont de l'Evescat]	936648	1870540	66.3
X2315010	Le Baux à Rougon [Pont de la D 952]	925541	1873966	35
X2424010	L'Artuby à Comps-sur-Artuby [Guent]	936330	1861040	225
Y0004010	Le Sègre à Saillagouse [Ro]	573936	1717356	33.299
Y0025010	L'Angoustrine à Angoustrine-Villeneuve-des-Escalades	569250	1721350	45.9
Y0045010	Le Carol à Porta [Carol]	559750	1722000	110
Y0224030	Le Tech [total] au Tech	618230	1712078	132
Y0244030	Le Tech à Amélie-les-Bains-Palalda [Pont de la piscine]	627055	1719052	343
Y0244039	Le Tech à Amélie-les-Bains-Palalda [aval 2]	627747	1718974	376
Y0436410	Le Cady à Casteil	605018	1724556	22.5
Y0446010	La Castellane à Molitg-les-Bains	603879	1738061	67
Y0455020	La Lentilla [totale] à Finestret	614237	1733935	53.7
Y0466010	Le Boulès à Casefabre	620860	1735581	59.5
Y0615020	La Boulzane à Saint-Paul-de-Fenouillet	611758	1755871	162
Y0625220	La Desix à Ansignan	615330	1750244	157
Y0626410	La Matassa à Felluns [Albas]	612930	1750111	41.1
Y0824020	La Berre à Villesèque-des-Corbières [Chateau de Gleon-Portel]	640200	1782900	220
Y0825410	Le Ripaud à Fontjoncouse [Ripaud]	639802	1782783	13.2
Y1135010	La Salz à Cassaignes	597610	1770910	144
Y1141150	Le Théron à Alet-les-Bains [Alet-les-Bains]	593880	1776393	14
Y1225020	Le Lauquet à Saint-Hilaire [Le Pech]	598290	1789670	173
Y1314010	Le Fresquel à Villepinte	579452	1808684	216
Y1364010	Le Fresquel à Carcassonne [Pont Rouge]	603018	1803915	939
Y1364020	Le Fresquel à Pezens	593939	1806001	733
Y1405010	Le Trapel à Villedubert	605721	1804422	59.5
Y1416220	Le Clamoux à Villeneuve-Minervois	609702	1813410	42
Y1435420	L'Argent Double à Caunes-Minervois	615346	1813901	41
Y1445010	L'Ognon à Pépieux	628847	1810623	47.1
Y1514010	L'Orbieu à Montjoi [Le Moulin]	611242	1775661	75.8
Y1524010	L'Orbieu à Saint-Martin-des-Puits	618766	1781803	170
Y1605020	La Cesse à Ferrals-les-Montagnes	624130	1822430	6
Y1605030	La Cesse à la Caunette [Cantignergues]	625410	1818590	47
Y1605410	Le Brian à Minerve	632866	1818040	40.2
Y2002010	L'Hérault à Valleraugue	705113	1898417	46.2
Y2002020	L'Hérault à Saint-André-de-Majencoules [Padens]	707172	1893991	96.1
Y2035020	La Vis à Blandas [Lafoux de la Vis]	692808	1878004	198
Y2214020	La Lergue à Lodève	679680	1859010	228
Y2414010	Le Libron à Magalas [Saint-Jean]	669824	1832174	36.5
Y2504010	L'Orb à Ceilhes-et-Rocozels	663263	1867149	85
Y3142010	La Mosson à Saint-Jean-de-Védas	720118	1840044	306
Y3514010	Le Vistre à Caissargues	762307	1867653	199
Y3514020	Le Vistre à Bernis	758851	1864374	291
Y3534010	Le Vistre [lit mineur] au Cailar	754081	1853948	490
Y4105210	L'Infernet à Vauvenargues [Gaudinettes]	861983	1844210	27
Y4414030	L'Huveaune à Roquevaire [2]	865270	1822000	165
Y4425010	La source de Saint-Pons à Gémenos	870400	1815800	14.5
Y4515410	La Reppe à Sanary-sur-Mer	883600	1797148	105
Y4615610	Le Réal Collobrier à Pierrefeu-du-Var [Pont de Fer]	915790	1811541	70.6

Code	Nom de la station	X ⁽¹⁾	Y ⁽¹⁾	S (km ²)
Y4615810	Le Valescure à Collobrières [aval]	925563	1813000	9.22
Y4615820	Le Réal Collobrier à Collobrières [Sainte-Anne]	923258	1812198	29.5
Y4615830	Le Réal Collobrier à Collobrières [village]	923041	1812045	29
Y4616010	Le ruisseau des Maurets à Collobrières [Les Bourdins]	925365	1812900	8.37
Y4616210	Le ruisseau du Rimbaud à Collobrières [Lave du Destrou]	925570	1809548	1.4
Y4616220	Le ruisseau de la Malière à Collobrières [Gour de l'Astre]	921422	1811113	12.3
Y4617610	Le ruisseau de Maraval à Pierrefeu-du-Var [Les Cogolins]	915624	1813623	5.5
Y4617810	Le ruisseau du Vaubarnier à Collobrières	925167	1812101	1.54
Y4705410	Le Maravenne à la Londe-les-Maures [Valcros]	922977	1806631	3.5
Y5002010	L'Argens à Bras [Clos-d'Auran]	891571	1839152	82.8
Y5105020	Le Caramy à Mazaugues [Vallon d'Agas]	890886	1824184	17.6
Y5115010	La Bresque à Salernes [Boulodrome]	915210	1847639	166
Y5115020	La Bresque à Salernes [Les Vingalières]	915000	1847950	166
Y5305030	L'Endre à Callas [Gandy]	945521	1848299	99
Y5424010	La Giscle à Cogolin	941146	1815129	65.8
Y5534040	La Siagne à Mandelieu-la-Napoule [La Tour]	972671	1851278	522
Y5605210	La Brague à Biot [Plan Saint-Jean]	984665	1858471	41
Y6002030	Le Var à Villeneuve-d'Entraunes [Pont d'Eaux]	956674	1912406	160
Y6334010	La Gordolasque à Utelle [Saint-Jean-la-Rivière, usine]	996250	1893988	348
Y6424140	Le Vegay à Aiglun [Vascognes]	969119	1882813	3.62
Y6434010	L'Estéron au Broc [La Clave]	987795	1883522	451
Y6614010	La Roya à Tende [Saint-Dalmas-de-Tende]	1021063	1908560	168
Y6635010	La Bévéra à Sospel [Pont D 2204]	1011253	1888507	81.5
Y7002020	Le Golo à Albertacce	1148254	1724855	95.6
Y7114020	L'Asco à Morosaglia [Ponte-Leccia]	1165554	1743776	365
Y7315010	Le Bevinco à Olmeta-di-Tuda [Lancone]	1178676	1759218	53.6
Y7415220	Le Luri à Luri [Piazza]	1178727	1752165	16.8
Y7915010	Le Porto à Ota	1131260	1716300	103
Y8124010	Le Liamone à Arbori [Pont de Truggia]	1137120	1701210	322
Y8324020	La Gravone à Peri	1143240	1688760	201
Y8505010	Le Botoracci à Coti-Chiavari [Pont de Gradello]	1140360	1664714	3.75
Y8614010	Le Taravo à Corrano [Bains de Guitera]	1161910	1677750	154
Y8624010	Le Taravo à Zigliara [Pont d'Abra]	1151640	1668190	331
Y8905020	L'Ortolo à Levie [Vignalella]	1163670	1648590	26.15
Y9102005	Le Tavignano à Antisanti [2, avant prise EDF]	1182840	1712660	566
Y9102010	Le Tavignano à Antisanti [2]	1182811	1712706	571
Y9102020	Le Tavignano à Altiani	1172990	1716100	492
Y9102030	Le Tavignano à Antisanti [Pont du Faïo]	1183450	1712500	573
Y9205010	L'Alesani à Pietra-di-Verde	1188310	1726740	44.2
Y9414020	Le Fium-Orbo à Ghisoni [Sampolo]	1173773	1702869	115
Y9605230	La Solenzara à Sari-Solenzara [Canniciu]	1185250	1677100	99.7
Y9605410	La Cannone à Quenza [DFCI]	1174670	1668500	0.33
Y9705210	Le Cavo à Conca [Sainte-Lucie]	1183820	1659280	57.5
Y9705220	Le Cavo à Zonza [Tagliu Rossu]	1181200	1660110	48.9
Y9825010	Le Francolo à Bonifacio [Balistra]	1175550	1629300	29
Y9905010	La Ventilegne à Figari [Linsticonu]	1170510	1631080	16.7

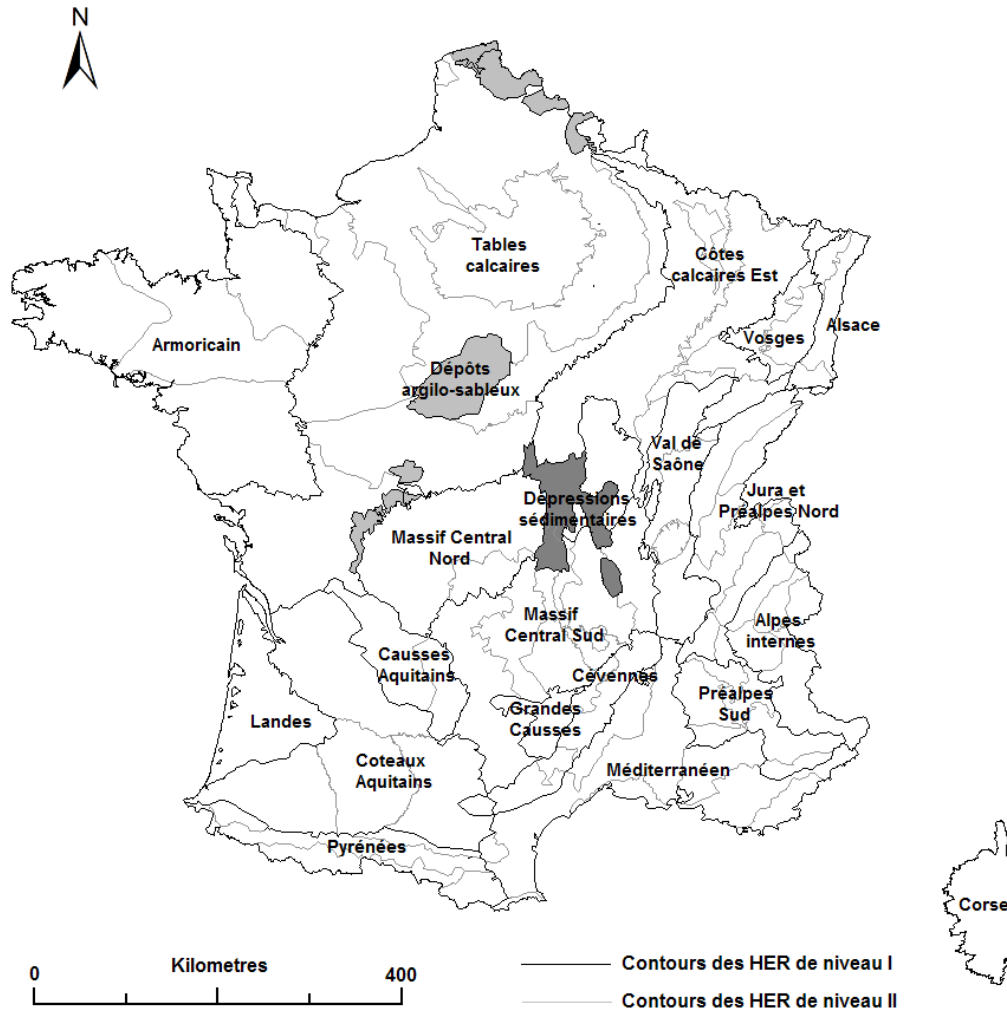
⁽¹⁾ Les coordonnées géographiques des stations sont exprimées dans le système de projection Lambert II étendu

Annexe IV - Ré-interprétation des catégories d'occupation des sols de la nomenclature Corine Land Cover

Dénomination CLC90	Re-interprétation
Zone intertidale	
Estuaires	Mer
Mers et océans	
Rizières	
Marais	
Tourbières	
Marais maritimes	Zones humides et plan d'eau
Marais salants	
Cours et voies d'eau	
Plan d'eau	
Lagunes littorales	
Glaciers et neiges éternelles	Glaciers et neiges éternelles
Tissu urbain continu	
Tissu urbain discontinu	
Zones industrielles et commerciales	
Réseau routier et ferroviaire	Zones urbanisées
Zones portuaires	
Aéroports	
Décharges	
Equipements sportifs et de loisirs	
Extraction de matériaux (carrières)	
Chantiers	
Plage, dunes et sable	Sol/substratum nu
Roche nue	
Zones incendiées	

Dénomination CLC90	Re-interprétation
Terres arables hors périmètre d'irrigation	
Périmètres irrigués en permanence	
Vignobles	
Vergers	Zones agricoles
Oliveraies	
Cultures annuelles associées aux cultures permanentes	
Systèmes culturaux et parcellaires complexes	
Surface essentiellement agricoles interrompues par des espaces naturels importants	
Espaces verts urbains	
Prairies	
Pelouses et pâturages naturels	Prairies/ végétation basse
Landes et broussailles	
Végétation sclérophylle	
Végétation clairsemée	
Territoires agro-forestiers	
Forêts de feuillus	
Forêts de conifères	Zones forestières
Forêts mixtes	
Forêts et végétation arbustive en mutation	

Annexe V - Synthèse des caractéristiques des Hydro-Eco-Region telles que décrites par Wasson *et al.* (2001)



Le **Massif Armorica** se distingue par ses roches primaires dures, imperméables et non carbonatées, un relief de collines peu accidenté et un climat océanique.

Les **Tables Calcaires** constituent une région de plaines, d'altitude inférieure à 200 m, couvrant le Bassin Parisien et le Nord du Bassin Aquitain ; le sous-sol est formé de roches sédimentaires tabulaires en majorité carbonatées. Cependant ces roches présentent en superficie des caractéristiques variables de perméabilité induisant des différences dans la densité du réseau de drainage ou des différences de dureté et de résistance à l'érosion produisant localement des formes de relief plus marquées (côtes et collines).

Les Dépôts Argilo-sableux, entité incluse dans les tables calcaires, correspondent à des formations géologiques bien individualisées imperméables, non carbonatés et meubles, caractérisées par un relief plat.

Les Côtes Calcaires de l'Est se différencient des tables calcaires par un relief de côtes disposées en auréoles concentriques à l'est du Bassin Parisien, dû à l'alternance de couches sédimentaires de marnes et de calcaires durs. Les reliefs les plus marqués s'échelonnent entre 200 et 400 m avec des formes hétérogènes entre plaines argileuses humides et plateaux calcaires à vallées sèches. Le gradient climatique d'Est en Ouest se manifeste par des précipitations sensiblement plus abondantes.

Les Vosges, sur le rebord oriental du Bassin Parisien, forment un massif montagneux de roches non carbonatées, peu perméables et assez résistantes à l'érosion. Le relief accentué culmine à 1800 m et le climat est froid et humide.

L'Alsace, dépression tectonique entre Vosges et Forêt Noire, est une grande zone de plaine aux sous-sols à dominante alluvionnaire. Le climat y possède des caractéristiques nettement continentales (hiver froid et sec, saison estivales arrosée).

Les Ardennes, plus au Nord, constituent une région de collines composées de roches primaires imperméables et non carbonatées ; seul l'extrémité sud-Ouest de l'ancien massif concerne la France.

Le Nord du Massif Central (plateau du Limousin, montagne Bourbonnaise, Morvan) est constitué de reliefs de plateaux descendant en pentes peu accentuées vers le Nord, dominés par les roches granitiques, dures, imperméables et non carbonatées. Les précipitations plus abondantes sont influencées par le relief.

Le Sud du Massif Central, au relief plus accentué et plus élevé, est constitué d'un grand plateau granitique relevé vers le Sud, surmonté de relief d'origine volcanique ; il est pénétré au Nord par de grandes dépressions orientées Nord-Sud et entouré au Sud par de grands plateaux calcaires. Les précipitations y sont abondantes et le climat froid et humide.

Les dépressions sédimentaires sont des fossés tectoniques remplis de roches sédimentaires qui constituent des zones de plaine internes du Massif Central. Les tendances continentales du climat se révèlent assez proches de la plaine d'Alsace.

Les grands Causses, plateaux calcaires au relief assez élevé (jusqu'à 1250 m) situés au Sud du Massif Central, possèdent les caractéristiques de zones karstiques avec un réseau hydrographique peu dense, limité au fond de vallées, exutoires hydrauliques de ces massifs perméables.

Le Val de Saône, entouré par le Massif Central à l'Ouest, le Vosges au Nord et le Jura à l'Est, constitue une vaste dépression aux sous-sols à dominante marno-argileuse.

L'ensemble **Jura – Préalpes du Nord** auxquelles sont associées les dépressions molassiques et les collines du Bas Dauphiné, constituent une entité au relief accentué, aux sous-sols hétérogènes à dominante de calcaire massif et de roches carbonatées et au climat montagnard très humide à tendance continentale.

Les Alpes Internes sont un massif au relief extrêmement accentué, caractérisé par l'importance de l'étage alpin avec une géologie hétérogène mais peu carbonatée et un climat typiquement montagnard à tendance continentale.

Les Préalpes du Sud, montagnes alternant massifs calcaires et ensembles marneux, ont un climat sous influence méditerranéenne se traduisant notamment par un bilan hydrique plus faible.

La région Méditerranéenne, au relief de plaines et de collines, est caractérisée par son climat très chaud à sécheresse estivale prolongée ; la géologie est très hétérogène variant de la plaine alluvionnaire aux massifs granitiques en passant par des collines de calcaire massif.

Les Cévennes, sur la bordure Sud-Est du Massif Central, sont une région de montagne granitique au relief abrupte tourné vers la plaine méditerranéenne qui se différencie par son régime de précipitation abondante et particulièrement à l'automne.

La Corse, île méditerranéenne aux montagnes dominées par les roches granitiques, avec un régime de précipitation proche du type cévenol, possède des caractéristiques particulières liées à son insularité.

Au Sud-Ouest, **les Coteaux Aquitains**, région de colline incisée de vallées parfois très larges pour les principaux émissaires, bénéficie d'un climat océanique. Les roches à dominante peu carbonatée, y sont globalement assez sensibles à l'érosion.

En bordure Sud-Ouest du Massif Central, **les Causses Aquitains**, plateaux et collines calcaires, se différencient par la nature du sous-sol et des formes de relief caractéristiques, où le réseau hydrographique est de faible densité.

La région des Landes, connue par son sous-sol sableux dont la nappe libre est drainée par les rivières, ruisseaux et canaux artificiels, est une grande plaine au climat océanique.

Les Pyrénées, massif montagneux au relief très accentué, différent des Alpes Internes par des altitudes moins élevées (étage alpin nettement moins important, très peu de glaciers), et une structure géomorphologique avec des vallées perpendiculaires à l'axe du massif, donc très courtes (moins de 40 km pour les cours d'eau les plus importants). Le climat est océanique avec une frange méditerranéenne à l'Est.

