



Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiage

Florine Garcia

► To cite this version:

Florine Garcia. Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiage. Hydrologie. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2016. Français. NNT : 2016PA066653 . tel-01624530

HAL Id: tel-01624530

<https://theses.hal.science/tel-01624530>

Submitted on 26 Oct 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.

Université Pierre et Marie Curie

Ecole doctorale : Géosciences, Ressources Naturelles et Environnement

Irstea - UR RECOVER - équipe Risques Hydrométéorologiques

Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiage

Par Florine Garcia

Thèse de doctorat en Hydrologie

Dirigée par Ludovic Oudin (Directeur, UPMC) et
Nathalie Folton (Encadrant, Irstea)

Présentée et soutenue publiquement le 15 décembre 2016

Devant un jury composé de :

M. Drogue Gilles	Maître de conférences Université de Lorraine	Rapporteur
Mme Favre Anne-Catherine	Professeur Grenoble INP – ENSE3	Examineur
Mme Folton Nathalie	Ingénieur de recherche Irstea	Encadrant
Mme Habets Florence	Directeur de recherche CNRS	Examineur
M. Mathevet Thibault	EDF - DTG	Examineur
M. Oudin Ludovic	Maître de conférences UPMC	Directeur de thèse
M. Paturel Jean-Emmanuel	Chargé de recherche IRD	Rapporteur



Except where otherwise noted, this work is licensed under
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement Nathalie Folton, mon encadrante de thèse, et Ludovic Oudin, mon directeur de thèse, pour m'avoir fait confiance et m'avoir accompagnée pour mener à terme ce travail de recherche. Merci pour votre grande disponibilité, vos multiples conseils, votre transfert de connaissances et les nombreuses discussions que nous avons pu avoir tout du long de ces trois années.

Je souhaite aussi remercier tous les membres du jury qui ont accepté et pris le temps d'examiner mes travaux. Merci à Florence Habets en sa qualité de présidente du jury. Merci à Gilles Drogue et Pierre-Emmanuel Paturel pour leurs rapports et tous les conseils pour améliorer ce manuscrit. Et merci à Anne-Catherine Favre et Thibault Mathevet pour leur participation au jury de thèse ainsi que pour leurs remarques.

Je remercie une nouvelle fois Bénédicte Augeard, Gilles Drogue, Anne-Catherine Favre, Rémy Garçon et Charles Perrin pour leur suivi de mes travaux à travers l'un des deux comités de pilotage ou les deux. Leurs remarques, critiques et encouragements ont été d'un grand apport lors de ces trois années de thèse.

Ces trois années de thèse n'auraient pu aussi bien se dérouler sans toute l'équipe à laquelle j'ai eu l'occasion de participer. Merci à Patrick, Pierre et Catherine pour leur contribution à mes travaux, notamment sur la thématique commune de régionalisation et leur point de vue « crues ». Un immense merci à Angelica, jumelle de thèse si on peut dire, pour le soutien mutuel pendant ces trois années. Merci à Anthony et Stéphane pour l'intégration rapide dans l'équipe et la découverte des calanques, de Peyrol et de tous les alentours. Merci à Clotilde pour la découverte du pan géographique de l'hydrologie, les chats et la culture. Merci à Dimitri pour la mise dans le bain de la thèse. Merci à Jean pour le partage des galères en régio, la summerschool et la plage. Merci à Mathieu, « vrai co-bureau », pour la bonne humeur et toutes les discussions autour du sport, des séries et de la fantasy. Merci à Philippe, mon premier co-bureau, pour la découverte de cette équipe et toutes les astuces sous R. Merci à Amina, Aurore, Boe, Magloire et Mohammed, pour l'aide et les découvertes multiculturelles. Et pour finir, je tiens à remercier un grand nombre de collègues du centre d'Aix, actuels et anciens, pour l'ambiance d'entraide, la bonne humeur pendant ces trois années,

ainsi que toutes les sorties, culturelles, sportives et « hydrologiques » qui ont agrémenté ma thèse.

Je n'oublie pas tous mes amis, des copines de flamenco à Aix aux copains d'Hamburg en passant par les amis d'école à Grenoble et ceux d'enfance à Chaville. Leurs encouragements ont été importants pendant ces trois années, en particulier pendant les derniers mois, et les fiestas post soutenance ont été bien remplies.

Cela prendrait trop de lignes de les remercier ici un à un, mais je tiens à adresser un grand merci à toute ma famille : les grands-parents, les oncles, tantes et cousins, qui ont toujours montré un grand intérêt à mes travaux et de nombreux encouragements tout du long de ces trois ans et qui ont fait le déplacement pour la soutenance, lorsque leur emploi du temps le leur a permis.

Je terminerai enfin par un immense merci à ma famille la plus proche : mes parents, Michel et Valérie, et mon frère et ma sœur, Julien et Diane. Ils ont été mes rocs pendant ces trois années, la thèse et l'à-côté, et le sont depuis bien longtemps, quels que soient les hauts et les bas. Merci pour les nombreuses discussions autour de ma thèse et pour m'avoir supportée, en particulier pendant l'écriture de ce manuscrit. Un dernier merci à notre Virgule, qui s'en est allée quelques jours après ma soutenance, et qui, à sa manière, a contribué à l'avancée de mes travaux et à l'écriture de ce manuscrit.

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	iii
Table des figures.....	vii
Liste des tableaux	xiv
Introduction Générale.....	1
Introduction	3
Méthodes d'estimation des indices d'étiage.....	4
Modèles pluie-débit pour l'estimation de différents indices d'étiage	5
Objectifs de la thèse	6
Organisation du mémoire	7
1 Etiage, impacts et réglementations	9
1.1 Définitions de l'étiage	11
1.2 Processus hydro-climatiques liés à l'étiage	13
1.3 Indices d'étiage.....	18
1.4 Réglementations	20
1.5 Synthèse du chapitre	24
2 Données et régimes d'étiage français	25
2.1 Echantillons de bassins versants.....	27
2.2 Données	32
2.2.1 Données hydrométéorologiques.....	32
2.2.2 Données descriptives de bassin versant	34
2.3 Indices d'étiage.....	38
2.3.1 Module interannuel	38
2.3.2 Sévérité de l'étiage.....	41
2.3.3 Saisonnalité de l'étiage	48
2.3.4 Inertie de l'étiage	51
2.4 Liens entre les différents indices d'étiage	54

2.5	Illustrations sur quatre bassins versants.....	59
2.6	Synthèse du chapitre	60
3	Which objective function to calibrate rainfall–runoff models for low–flow index simulations?	61
	Introduction du chapitre et compléments à l’article	63
	Résumé	69
	Abstract	69
3.1	Introduction	70
3.2	Study area, models and methodology	72
3.2.1	Dataset.....	72
3.2.2	Hydrological models	75
3.2.3	Calibration and validation methodologies	77
3.3	Results and discussions	81
3.3.1	Assessment criteria as objective function	81
3.3.2	Single objective function	82
3.3.3	Combination of two single objective functions	86
3.3.4	Comparison between $KGE(Q^{0.5})$ and the combination of $KGE(Q)$ with $KGE(1/Q)$	90
3.3.5	Weights in the combination of $KGE(Q)$ with $KGE(1/Q)$	94
3.3.6	Temporal robustness	96
3.3.7	Comparison with the six parameter model TOPMO	98
3.4	Conclusions	99
	Acknowledgments	100
	Synthèse du chapitre.....	101
4	Développement de la structure journalière de LoiEau	103
4.1	Introduction	105
4.2	Méthodologie.....	108
4.2.1	Développement de la structure journalière	110
4.2.2	Méthodes d’évaluations	115
4.3	Résultats et discussions	117
4.3.1	Structure à 2 réservoirs linéaires et pertinence des paramètres A et B	117

4.3.2	Structure à 1 seul réservoir : quelle loi de vidange pour le réservoir de transfert ?	118
4.3.3	Structure à un réservoir de transfert et une composante directe	123
4.3.4	Comparaisons avec GR4J	125
4.3.5	Robustesse temporelle	128
4.4	Synthèse du chapitre	129
5	Régionalisation des paramètres des deux structures de LoiEauJ	131
5.1	Introduction	133
5.2	Méthodologie	136
5.2.1	Proximité spatiale	136
5.2.2	Régression linéaire multiple	140
5.2.3	Méthodes d'évaluations et de comparaisons	147
5.3	Résultats et discussions	150
5.3.1	Choix du nombre de voisins et de la puissance pour la proximité spatiale	150
5.3.2	Choix du calcul de la distance entre bassins versants pour la proximité spatiale	152
5.3.3	Choix du voisinage pour la proximité spatiale	153
5.3.4	Choix de la variable interpolée pour la proximité spatiale	154
5.3.5	Choix des descripteurs pour les régressions selon le voisinage	155
5.3.6	Régressions et interpolations des résidus	160
5.3.7	Comparaison entre proximité spatiale et régressions linéaires multiples .	163
5.4	Synthèse du chapitre	169
6	Simulations d'indices d'étiage en contexte non jaugé	171
6.1	Introduction	173
6.2	Méthodologie	176
6.2.1	Approche stochastique pour l'estimation du VCN3(5)	176
6.2.2	Approche déterministe	178
6.2.3	Méthodes d'évaluations	179
6.3	Résultats et discussions	181
6.3.1	Analyse des méthodes de régressions pour l'estimation du VCN3(5) en sites non jaugés	181

6.3.2	Comparaison des quatre modèles pluie-débit pour la simulation en sites non jaugés	183
6.3.3	Comparaison entre les deux approches pour la simulation du VCN3(5)..	188
6.3.4	Comparaison sur l'échantillon de validation	192
6.3.5	Comparaison entre le modèle journalier et le modèle mensuel	194
6.3.6	Cartographie finale des indices d'étiage	196
6.4	Synthèse du chapitre	198
Conclusion Générale		199
	Résultats obtenus.....	201
	Perspectives	204
Références bibliographiques		207
Annexe 1 – Listes de bassins versants.....		223
	Annexe 1.1 – Liste des 691 bassins versants de l'échantillon de référence.....	224
	Annexe 1.2 – Liste des 141 bassins versants de l'échantillon de validation.....	240
Annexe 2 – Descriptions des modèles pluie-débit utilisés dans la thèse		245
	Annexe 2.1 – Modèle GR4J	246
	Annexe 2.1 – Modèle GR2M-LoiEau (noté LoiEauM dans le manuscrit)	248

Table des figures

Figure 1.1 : Photos illustrant le phénomène d'étiage. A gauche, le Réal Collobrier à Rimbaud à l'été 2011. A droite, la Seine à Paris à l'été 1943.....	13
Figure 1.2 : Schéma des différents processus hydrologiques et de stockages sur un bassin versant (schéma modifié d'après WMO, 2008).	14
Figure 1.3 : Carte des départements concernés par des arrêtés de limitations des usages en eau au 1 ^{er} septembre 2016.....	23
Figure 1.4 : Indices d'étiage et définition des niveaux (ou seuils) de vigilance, d'alerte, de crise et de crise renforcée (issus de Lang Delus, 2011).	24
Figure 2.1 : Représentativité spatiale et hydro-climatique de l'échantillon de référence. Les régimes hydrologiques sont basés sur la classification des régimes mensuels français de Sauquet <i>et al.</i> (2008).....	29
Figure 2.2 : Représentativité spatiale et hydro-climatique de l'échantillon de validation. Les régimes hydrologiques sont basés sur la classification des régimes mensuels français de Sauquet <i>et al.</i> (2008).....	31
Figure 2.3 : Délimitation des HER de niveau 1 (22 classes) définies par Wasson <i>et al.</i> (2001).	37
Figure 2.4 : a) Exemple de la chronique de débit journalier de l'année 1998 et du calcul du débit moyen annuel (Q annuel) associé à cette année sur le Loir à Durtal. b) Exemple d'une chronique de débits moyens annuels (Q annuel) sur la période de 1970 à 1991 et du calcul du module interannuel (QA) associé à cette période sur le Loir à Durtal.....	39
Figure 2.5 : Cartographie du module interannuel (QA) aux stations de l'échantillon de référence.	40
Figure 2.6 : Exemple de calcul des VCN30, VCN10 et VCN3 en 1998 sur le Loir à Durtal..	41
Figure 2.7 : Illustration du problème de calcul calendaire du QMNA sur la Moselotte à Vagney en 1988 (issus de Lang Delus, 2011).	42
Figure 2.8 : Exemple de calcul du QMNA(5) sur la période de 1970 à 1991 sur le Loir à Durtal.....	43
Figure 2.9 : Cartographie du QMNA(5) aux stations de l'échantillon de référence.....	44
Figure 2.10 : Courbe des débits classés construite sur la période du 01/01/1970 au 31/12/1991 et calculs du Q95 et du Q75 associés sur le Loir à Durtal.....	46
Figure 2.11 : Cartographie du Q75 aux stations de l'échantillon de référence.....	47

Figure 2.12 : Cartographie Ratio Saisonnier (SR) aux stations de l'échantillon de référence.	48
Figure 2.13 : Répartition mensuelle et spatiale des QMNA(5).....	49
Figure 2.14 : Répartition annuelle des QMNA. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 des distributions, du bas vers le haut. Les points correspondent à la moyenne de chaque distribution. La ligne rouge en pointillée correspond à la moyenne interannuelle.	50
Figure 2.15 : Répartition spatiale du Q_b	51
Figure 2.16 : Répartition spatiale du BFI.....	53
Figure 2.17 : Localisation des quatre bassins versants choisis pour illustrer l'échantillon de référence.	59
Figure 3.1 : Exemple d'évaluation d'une bonne simulation et d'une mauvaise simulation d'un indice d'étiage.	64
Figure 3.2 : Illustration de la saisonnalité sur la période du 01/01/1970 au 31/12/2013 sur le Loir à Durtal.	65
Figure 3.3 : Exemple d'évaluation d'une bonne simulation et d'une mauvaise simulation de la saisonnalité.	66
Figure 3.4 : Exemple d'évaluation d'une bonne simulation et d'une mauvaise simulation de la chronique de débits.....	67
Figure 3.5 : Exemple de représentation des résultats pour analyser les simulations des dix critères d'évaluation. Les critères entourés en rouge représentent les six indices d'étiage, le critère entouré en vert représente la saisonnalité et les critères entourés en bleu représentent la chronique de débits avec différentes transformation.	68
Figure 3.6: Spatial distribution of the QMNA(5) over the set of 691 French catchments. The red contour line delimits the catchment of the Loir River at Durtal.	73
Figure 3.7: Schematic diagram of the GR4J model structure (PE: potential evapotranspiration, P: rainfall, Q: streamflow, X_i : parameter i, other notations correspond to internal state variables).	75
Figure 3.8: Radial plot showing the mean results in calibration and in validation for the two periods for the seven assessment criteria used as an objective function.	82
Figure 3.9: Representation of seasonality (a), the flow duration curve (b), the annual MAM3 (c), the annual MAM10 (d), the annual QMNA (e) and the annual runoff (f) observed (in black) and simulated with the six single objective functions (in colours) in the validation period 1970–1991 for the Loir River at Durtal.	84

Figure 3.10: Radial plot showing the mean results in validation for the two periods for the six single objective functions.	86
Figure 3.11: Representation of seasonality (a), the flow duration curve (b), the annual MAM3 (c), the annual MAM10 (d), the annual QMNA (e) and the annual runoff (f) observed (in black) and simulated with the three objective functions, KGE(sqrt(Q)) and two combinations (in colours) in the validation period 1970–1991 for the Loir River at Durtal.	87
Figure 3.12: Radial plot showing the mean results in validation for the two periods for all the combinations of two single objective functions.	88
Figure 3.13: Scatter plot of relative errors on MAM3(5) (a), MAM10(5) (b), QMNA(5) (c), Q95 (d), Q75 (e) and MAR (f), and the NSE(QMM) (g) obtained in validation by KGE(sqrt(Q)) and the combination of KGE(Q) with KGE(1/Q).	91
Figure 3.14: Comparison of the GR4J parameters calibrated by the objective function KGE(sqrt(Q)) and the parameters calibrated with the objective function combining KGE(Q) with KGE(1/Q).	93
Figure 3.15: Evaluation of the weights in the combination of KGE(Q) and KGE(1/Q). Radial plot showing the results in validation for the two periods.	95
Figure 3.16: Assessment of temporal robustness. Radial plot showing the results in calibration for the two periods (dry and wet periods) and in validation for the two periods for the two objective functions, KGE(sqrt(Q)) and the combination of KGE(Q) and KGE(1/Q).	97
Figure 3.17: Box plot of distribution of MAR obtained in validation (P1: calibration on dry period, P2: calibration on wet period) with the two objective functions, KGE(sqrt(Q)) (called sFO) and the combination of KGE(Q) and KGE(1/Q) (called cFO) over the entire catchment set (boxes represent the 0.25 and 0.75 percentiles, with the median value inside, and the whiskers represent the 0.05 and 0.95 percentiles).	98
Figure 3.18: Radial plot showing the results in validation for the two objective functions, KGE(sqrt(Q)) and the combination of KGE(Q) and KGE(1/Q) and the two models, GR4J and TOPMO.	99
Figure 4.1 : Schéma de la structure du modèle LoiEauM (ETP : évapotranspiration potentielle ; P_{liq} : précipitation liquide ; P_{sol} : précipitation solide ; Q : débit ; A, B_m et C_m : paramètres du modèle pluie-débit ; TEC et coefT : paramètres du module de neige ; les autres notations correspondent à des variables d'état internes au modèle).	108

Figure 4.2 : Cartographie du paramètre A en France et en Corse.	109
Figure 4.3 : Schéma de la première structure du modèle journalier LoiEauJ testée (A : capacité maximale du réservoir de production (mm) ; Pr : pluie efficace ; Q : débit ; B, C ₁ , C ₂ et D : paramètres du modèle pluie-débit ; les autres notations correspondent à des variables d'état internes au modèle).	111
Figure 4.4 : Schéma de la deuxième structure du modèle journalier LoiEau testée (A : capacité maximale du réservoir de production (mm) ; Pr : pluie efficace ; Q : débit ; B et C : paramètres du modèle pluie-débit ; les autres notations correspondent à des variables d'état internes au modèle).	112
Figure 4.5 : Schéma de la troisième structure du modèle journalier LoiEau testée (A : capacité maximale du réservoir de production (mm) ; Pr : pluie efficace ; Q : débit ; B, C et D : paramètres du modèle pluie-débit ; les autres notations correspondent à des variables d'état internes au modèle).	113
Figure 4.6 : Distribution des performances pour la simulation des indices d'étiage (VCN3(5), QMNA(5), Q75) et du QA pour les différents régimes hydrologiques (uniforme, pluvial, nival et méditerranéen) avec les différentes lois de vidange en validation. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut.	120
Figure 4.7 : Distribution des performances pour la simulation de la saisonnalité et des simulations continues pour les différents régimes hydrologiques (uniforme, pluvial, nival et méditerranéen) avec les différentes lois de vidange en validation. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut.	121
Figure 4.8 : Hydrogrammes observé et simulés par la loi de vidange quadratique ou les lois de vidange puissance pour l'année 2008 pour l'Authie à Dompierre-sur-Authie, E5505730 (a) et a Mimente à Florac, O3084320 (b).	122
Figure 4.9 : Distribution des performances en validation pour la simulation des indices d'étiage (VCN3(5), QMNA(5), Q75), du QA, de la saisonnalité et des simulations continues pour les différents régimes hydrologiques (uniforme, pluvial, nival et méditerranéen) avec l'absence ou la prise en compte d'un écoulement direct. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut.	124
Figure 4.10 : Radial plot présentant les résultats moyens en validation pour les deux sous-périodes pour les quatre modèles pluie-débit.	126

- Figure 4.11 : Distributions des performances en validation pour la simulation des indices d'étiage (VCN3(5), QMNA(5), Q75), du QA, de la saisonnalité et des simulations continues pour les différents régimes hydrologiques (uniforme, pluvial, nival et méditerranéen) avec les quatre modèles. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut. 127
- Figure 4.12 : Radial plot présentant les résultats moyens en calage et en validation pour les structures à 2 et 3 paramètres de LoiEauJ et pour les deux sous-périodes lorsque nous calons sur les 22 années les plus humides puis validons sur les 22 plus sèches et inversement. 129
- Figure 5.1 : Impact du choix du nombre de voisins et de la puissance dans la méthode PID sur la régionalisation des paramètres A3, B2, B3, C2 et C3. 151
- Figure 5.2 : Distribution des performances pour la simulation des débits caractéristiques (VCN3(5), QMNA(5), Q75, QA) pour le modèle LoiEauJ2 (à gauche) et LoiEauJ3 (à droite). Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut. Les différentes couleurs indiquent les distributions lorsque les paramètres sont calés (Cal) et chacune des variables interpolées par la méthode PID dans leur configuration optimale (Param : paramètres, Simul : simulations). 154
- Figure 5.3 : Comparaisons entre paramètres calés et paramètres régionalisés en fonction du voisinage de la régression et de l'absence ou de la prise en compte des résidus (de gauche à droite : régression globale (RG), régressions par HER (RH), régression globale avec prise en compte des résidus (RGR), régressions par HER avec prise en compte des résidus(RHR)). 162
- Figure 5.4 : Cartographies des 5 paramètres en fonction de la méthode de régionalisation. . 166
- Figure 5.5 : Distribution des performances pour la simulation des débits caractéristiques (VCN3(5), QMNA(5), Q75, QA) et des simulations continues (Q_{MM} , Q , $Q^{0.5}$, $1/Q$) pour le modèle LoiEauJ2 (en haut) et LoiEauJ3 (en bas). Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut. Les différentes couleurs indiquent les distributions lorsque les paramètres sont calés (Cal) et chacune des méthodes de régionalisation dans leur configuration optimale (proxi : proximité spatiale, regr : régression, med : paramètres médians). 168
- Figure 5.6 : Comparaison entre les quatre débits caractéristiques observés et simulés à l'aide du modèle LoiEauJ à deux paramètres régionalisés. 169

- Figure 6.1 : Distribution des performances pour l'estimation du VCN3(5) pour les quatre modèles de régressions (V1 : régression globale, V2 : régressions par HER, V3 : régression globale avec interpolation spatiale des résidus et V4 : régressions par HER avec interpolation spatiale des résidus). Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut. 183
- Figure 6.2 : Distributions des performances pour la simulation des débits caractéristiques (VCN3(5), QMNA(5), Q75, QA) et des simulations continues (Q_{MM} , Q , $Q^{0.5}$, $1/Q$) pour les modèles LoiEauJ à 2 et 3 paramètres et les modèles GR4J à 3 et 4 paramètres. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut. 184
- Figure 6.3 : Distributions des performances pour la simulation des indices d'étiage (VCN3(5), QMNA(5), Q75) et du module interannuel (QA) en contexte non jaugé pour les différents régimes hydrologiques (uniforme, pluvial, nival et méditerranéen) avec les quatre modèles. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut. 186
- Figure 6.4 : Distributions des performances pour la simulation de la saisonnalité et des simulations continues en contexte non jaugé pour les différents régimes hydrologiques (uniforme, pluvial, nival et méditerranéen) avec les quatre modèles. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut. 187
- Figure 6.5 : Distributions des performances sur l'échantillon de référence pour la simulation du VCN3(5) en contexte non jaugé pour les deux approches (V3 : régression globale avec interpolation des résidus, M1 : LoiEauJ à 2 paramètres régionalisés, M4 : GR4J régionalisé). Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut. 188
- Figure 6.6 : Comparaison entre VCN3(5) simulés par le modèle V3 (approche stochastique par régression globale avec interpolation spatiale des résidus) et VCN3(5) simulés par les modèles M1 et M4 (M1 : approche déterministe par le modèle LoiEauJ à 2 paramètres régionalisés et M4 : approche déterministe par le modèle GR4J régionalisé). La droite pleine représente la bissectrice. 189

- Figure 6.7 : Distributions des performances pour la simulation du VCN3(5) en fonction de quatre intervalles de valeurs en contexte non jaugé pour les deux approches et des régimes hydrologiques (V3 : régression globale avec interpolation des résidus, M1 : LoiEauJ à 2 paramètres régionalisés, M4 : GR4J régionalisé). Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut. 191
- Figure 6.8 : Distributions des performances sur l'échantillon de validation pour la simulation du VCN3(5) en contexte non jaugé pour les deux approches (V3 : régression globale avec interpolation des résidus, M1 : LoiEauJ à 2 paramètres régionalisés, M4 : GR4J régionalisé). Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut. 192
- Figure 6.9 : Distributions des performances pour la simulation des débits caractéristiques (VCN3(5), QMNA(5), Q75, QA) et des simulations continues (Q_{MM} , Q , $Q^{0.5}$, $1/Q$) pour les modèles LoiEauJ à 2 et 3 paramètres et les modèles GR4J à 3 et 4 paramètres sur l'échantillon de validation. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut. 193
- Figure 6.10 : Distributions des performances sur l'échantillon de 348 bassins versants pour la simulation du QMNA(5) et du QA en contexte non jaugé pour le modèle journalier LoiEauJ et le modèle mensuel LoiEauM. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut. 195
- Figure 6.11 : Cartographies du QMNA(5), du VCN10(5), du VCN3(5), du Q95, du Q75 et du module interannuel (QA) estimé à l'aide du modèle LoiEauJ régionalisé sur la période du 01/01/1970 au 31/12/2013 sur l'échantillon qui regroupe les 691 bassins versants de référence et les 141 bassins versants de validation. 197

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Percentiles de la distribution de caractéristiques hydro-climatiques des échantillons de bassins versants (en noir pour l'échantillon de référence et en bleu pour l'échantillon de validation).	34
Tableau 2.2 : Liste des données descriptives de bassin versant utilisées pour ces travaux de recherche.	35
Tableau 2.3 : Résumé des indices d'étiage et de bilan présentés dans cette étude.	54
Tableau 2.4 : Matrice de corrélation de Pearson entre les différents indices étudiés.	57
Tableau 2.5 : Caractéristiques de quatre bassins versants illustrant l'échantillon de référence.	60
Tableau 3.1: Percentiles of the distributions of climatic and catchment characteristics on the set of 691 study catchments.	74
Tableau 3.2: Percentiles of the distribution of low-flow characteristics on the set of 691 study catchments.....	75
Tableau 3.3: Selection of the assessment criteria.....	78
Tableau 3.4: Selection of the objective functions tested.	80
Tableau 3.5: Simulations of the seven assessment criteria in validation for the two periods for all objective functions.	89
Tableau 4.1 : Résumé des différents tests sur la structure du modèle journalier LoiEauJ.....	114
Tableau 4.2 : Descriptions des différents critères de validation.	116
Tableau 4.3 : Evaluation de la pertinence du paramètre B et de la régionalisation du paramètre en A en validation pour les deux sous-périodes. Les valeurs en gras correspondent aux valeurs maximales prises par chaque critère d'évaluation entre les quatre variantes du modèle 1.	117
Tableau 4.4 : Evaluation des différentes lois de vidange pour un seul réservoir de transfert en validation pour les deux sous-périodes. Les valeurs en gras correspondent aux valeurs maximales prises par chaque critère d'évaluation entre les six variantes du modèle 2.	118
Tableau 4.5 : Evaluation en validation de l'apport d'une composante simulant l'écoulement direct dans la fonction de transfert. Les valeurs en gras correspondent aux valeurs maximales prises par chaque critère d'évaluation entre les deux variantes du modèle 3.....	123

Tableau 5.1 : Liste des distances utilisées pour mesurer la distance entre deux bassins versants.....	137
Tableau 5.2 : Regroupement des différentes HER.....	139
Tableau 5.3 : Descripteurs considérés avec les éventuelles transformations appliquées pour atteindre la normalité de la distribution (ln : logarithme népérien, asr : arc sinus racine carrée, – : distribution normale atteinte sans transformation, X : aucune transformation n’a permis de normaliser la distribution). Le symbole ✓ et la mise en forme en gras indiquent que le descripteur a été retenu pour déterminer les modèles de régression.	143
Tableau 5.4 : Résumé des différents tests des méthodes de régionalisation.	147
Tableau 5.5 : Critères d’évaluation des différentes méthodes de régionalisation.....	149
Tableau 5.6 : Impact du calcul de la distance sur la performance de la méthode PID sur les paramètres B2, C2, A3, B3 et C3 (en noir sur l’échantillon de référence de 691 bassins, en bleu uniquement sur les 410 bassins possédant au moins un bassin amont ou un bassin aval).....	152
Tableau 5.7 : Impact du choix du voisinage sur la performance de la méthode PID sur les paramètres B2, C2, A3, B3 et C3 (en noir sur l’échantillon de référence de 691 bassins, en bleu uniquement sur les 217 bassins possédant au moins un voisin différent).....	153
Tableau 5.8 : Modèles de régression retenus pour les paramètres A3, B2, B3, C2 et C3 des deux structures du modèle LoiEauJ suivant le voisinage de la régression.	155
Tableau 5.9 : Résumé des différents descripteurs pouvant expliquer chaque paramètre (A3, B2, B3, C2 et C3) suivant les HER, avec le nombre de fois où ces descripteurs ressortent pour expliquer les paramètres suivant les HER ainsi que le signe des coefficients qui leur sont associés. Les cellules en gras correspondent aux descripteurs ressortis majoritairement pour expliquer chaque paramètre.....	157
Tableau 5.10 : Impact du choix du voisinage sur les régressions et de la prise en compte des résidus sur les régressions linéaires pour régionaliser A3, B2, B3, C2 et C3 (RG : régression globale, RH : régressions par HER, RGR : régression globale avec interpolation des résidus et RHR : régressions par HER avec interpolation des résidus). Les valeurs en gras sont celles pour lesquelles la méthode de régression est la plus performante vis-à-vis du RMSE calculé entre paramètres calés et paramètres régionalisés.....	160

Tableau 5.11 : Comparaison des deux méthodes de régionalisation sur les 5 paramètres. Les valeurs en gras sont celles pour lesquelles la méthode de régionalisation est la plus performante vis-à-vis du RMSE calculé entre paramètres calés et paramètres régionalisés.....	163
Tableau 6.1 : Descripteurs considérés avec les éventuelles transformations appliquées pour atteindre la normalité de la distribution (ln : logarithme népérien, asr : arc sinus racine carrée, – : distribution normale atteinte sans transformation, X : aucune transformation n’a permis de normaliser la distribution).....	177
Tableau 6.2 : Les 4 modèles de régression testés.....	178
Tableau 6.3 : Les 4 modèles journaliers et leur méthode de régionalisation des paramètres.	178
Tableau 6.4 : Résumé des différents tests de ce chapitre pour la simulation d’indices d’étiage en sites non jaugés.....	180
Tableau 6.5 : Modèles de régression retenus pour l’estimation du VCN3(5) suivant le voisinage.	181

Introduction Générale

Introduction

L'étiage est un phénomène saisonnier, plus ou moins sévère, plus ou moins long, qui concerne tous les cours d'eau (Smakhtin, 2001). Ce phénomène correspond à une diminution du débit des cours d'eau, voire leur assèchement sur une certaine période. Les hommes et les écosystèmes se sont adaptés à ce phénomène. Cependant, l'impact de l'étiage sur le volume d'eau disponible peut entraîner de nombreux problèmes. Ainsi, les rivières servent régulièrement à l'approvisionnement en eau, à l'irrigation ou encore à la production d'énergie. Les cours d'eau jouent aussi un rôle important dans le maintien du bon fonctionnement des écosystèmes. Ce besoin en eau, lié aux écosystèmes et aux activités anthropiques, demeure important, même dans les périodes d'étiage. De nombreux systèmes ont été créés pour pallier au manque d'eau pendant ces périodes (création de réservoirs, aqueducs, ...) mais ceux-ci ne suffisent pas. De plus, avec l'accroissement de la population et le développement, la demande en eau continue d'augmenter. Cela se traduit souvent par une augmentation des pompages, de l'irrigation, etc. ce qui accroît le déficit en eau, notamment lors de ces périodes d'étiage.

Nous observons régulièrement de nombreuses conséquences liées à l'étiage et plus généralement aux sécheresses dans le monde. La Californie connaît par exemple, un épisode de sécheresse depuis près de 7 ans et en juillet 2016, le lac Mead, plus grand réservoir des Etats-Unis qui alimente le Nevada, l'Arizona et la Californie a atteint son niveau le plus bas. Des rationnements d'eau obligatoires ont alors été imposés. Le printemps et l'été de l'année 2016 ont aussi été particulièrement durs pour l'Inde et la Tunisie. En Inde, par exemple, des centrales thermiques à charbon à l'est du pays ont été mises à l'arrêt pendant une dizaine de jours par manque d'eau dans un canal relié au Gange. En Tunisie, entre mi-mai et mi-septembre 2016, plus de 700 coupures d'eau ont été décidées entraînant de nombreuses tensions locales. L'Europe connaît aussi des périodes sèches aux nombreuses conséquences. En Espagne, au mois d'août 2016, le lac de Guadalest qui alimente la province d'Alicante au sud-ouest du pays n'était rempli qu'à 17% de sa capacité, entraînant de nombreuses coupures d'eau et obligeant les autorités à importer de l'eau depuis la région Catalogne. En France, l'année 2011 a été particulièrement sèche avec 68% des réservoirs français dont le niveau d'eau était inférieur à la normale.

Le phénomène d'étiage est donc une préoccupation pour de nombreux pays, à travers le problème d'une meilleure gestion de la ressource en eau (prévision et prédétermination) et une meilleure compréhension des processus qui influent sur ce phénomène et de leurs évolutions, notamment dans le contexte de changement climatique actuel et d'augmentation continue des prélèvements en eau. Selon le domaine d'étude, différents indices existent pour décrire l'étiage (Smakhtin, 2001 ; Hisdal et Tallaksen, 2004 ; WMO, 2008) qui servent de seuils pour le développement de différentes règles de gestion de la ressource en eau, entraînant par exemple la limitation des prélèvements. Il est donc important de pouvoir connaître ces différents indices en tout point des cours d'eau et de pouvoir évaluer les différents impacts qui peuvent influencer sur leurs valeurs. Cependant, ces indices sont des statistiques dérivées de chroniques de débits mesurés au niveau d'exutoires d'un nombre forcément limité de bassins versants. Il est donc nécessaire de mettre en place une méthode pour pouvoir estimer ces indices en tout point et sous différentes conditions.

Méthodes d'estimation des indices d'étiage

La question de l'estimation des différents indices d'étiage en contexte non jaugé a été l'un des grands axes de recherche de la décennie de recherches PUB (« Prediction in Ungauged Basin ») lancée par l'IAHS (« International Association of Hydrological Sciences ») en 2003 et du programme de recherche international FRIEND (« Flow Regimes from International Experimental and Network Data »). La décennie PUB s'est achevée en 2013 avec la publication d'une synthèse exhaustive sur ce sujet (Blöschl *et al.*, 2013). Elle s'est attachée à comprendre les différents processus hydrologiques et à définir des méthodes de modélisation en contexte non jaugé pour différentes signatures hydrologiques, parmi lesquelles les indices d'étiage. La branche européenne du programme de recherche FRIEND, sous l'égide de l'UNESCO, a lancé un thème de recherche sur l'étude des étiages et des sécheresses et l'une de ses problématiques a été la détermination des indices d'étiage et leur régionalisation, dans l'objectif d'établir une cartographie européenne de ces statistiques.

L'approche la plus classique pour l'estimation des indices d'étiage est une approche stochastique utilisant différentes méthodes pour régionaliser directement chaque indice. Ces méthodes ont été utilisées dans de nombreux pays pour l'établissement de cartographie de différents indices d'étiage accompagnant la réglementation de ces pays. Au Royaume-Uni, de nombreuses recherches démarrées en 1980 (Hydrology, 1980) ont abouti à l'élaboration d'un

logiciel nommé Low Flows 2000¹ qui permet l'estimation de différents indices d'étiage en sites non jaugés (Gustard *et al.*, 1992 ; Holmes *et al.*, 2002 ; Gustard *et al.*, 2004). En Suisse, l'Atlas hydrologique de la Suisse² (Aschwanden et Kan, 1999) combine des indices d'étiage calculés en sites jaugés et des indices estimés en sites non jaugés. En Autriche, une méthodologie exhaustive a été mise en place pour l'estimation d'un indice d'étiage utilisé dans la réglementation autrichienne, le long du réseau hydrographique (Laaha et Blöschl, 2005 ; 2006b ; 2006a ; 2007 ; Laaha *et al.*, 2014). Aux Etats-Unis, l'Institut d'études géologiques des États-Unis (US Geological Survey) a développé des méthodes pour estimer ces indices état par état (Ries, 2002). Ces estimations sont intégrées à un outil de système d'information géographique appelé StreamStats³ couvrant actuellement plus de la moitié des états. En France, un travail de 4 ans mené par 3 équipes de l'Irstea a permis l'établissement d'une cartographie nationale de deux indices d'étiage utilisés dans la réglementation française (Catalogne et Sauquet, 2012 ; Cipriani et Sauquet, 2012 ; Folton et Arnaud, 2012 ; Nicolle *et al.*, 2012 ; Riffard *et al.*, 2012).

Modèles pluie-débit pour l'estimation de différents indices d'étiage

Ces méthodes ne peuvent cependant traiter qu'un indice d'étiage à la fois et ne sont pas adaptées pour évaluer l'impact de changements environnementaux sur ces indices. L'approche alternative qui sera développée dans ce manuscrit est une approche que nous pourrions considérer comme déterministe, en comparaison aux approches stochastiques, qui consiste à utiliser un modèle pluie-débit régionalisé pour simuler des chroniques de débit en tout point des cours d'eau pour en déduire les différents indices d'étiage. Cette approche a plusieurs avantages. Alors que les méthodes classiques utilisent uniquement de l'information statique, l'utilisation de modèles pluie-débit prend en compte la dynamique de l'hydrogramme et des différents processus liés à l'étiage. Le passage par un modèle pluie-débit permet aussi d'être indépendant des indices d'étiage souhaités et de garder une cohérence dans le cas où l'estimation de plusieurs indices d'étiage est demandée. Les modèles pluie-débit apportent aussi une aide à l'opérationnel pour l'estimation de tout indice d'étiage souhaité, voire de nouveaux indices d'étiage si un changement de réglementation se produit.

¹ <http://www.hydrosolutions.co.uk/products.asp?categoryID=4656>

² <http://hades.unibe.ch/fr>

³ <http://water.usgs.gov/osw/streamstats/index.html>

Enfin, ces modèles ont la possibilité de prendre en compte tout changement pouvant exister au niveau des précipitations, comme par exemple des projections dans les cas de changement climatique, et d'évaluer la réponse des bassins versants à ces changements.

Malgré cela, cette approche est relativement peu utilisée. Smakhtin (2001) a étudié cette approche et n'en a trouvé qu'un nombre limité d'utilisation. Les travaux de Clausen et Rasmussen (1993) et de Van Lanen *et al.* (1993) en Europe et de Smakhtin et Watkins (1997) en Afrique du Sud ont proposé un cadre méthodologique pour cette approche. Plus récemment, Engeland et Hisdal (2009) ont comparé les approches stochastique et déterministe pour la simulation d'un indice d'étiage de référence en Norvège. Folton et Arnaud (2012) ont développé et régionalisé un modèle pluie-débit mensuel pour l'estimation de deux indices d'étiage de référence en France. Ce modèle est intégré à l'outil informatique d'aide à la décision « LoiEau » utilisé depuis une dizaine d'années par les hydrologues des Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) et des Agences de l'Eau.

La faible utilisation de cette approche peut être expliquée par les nombreuses difficultés liées à l'utilisation d'un modèle pluie-débit (Smakhtin, 2001) :

- le modèle doit être bien conceptualisé et flexible pour pouvoir simuler les différents processus influant sur l'étiage et les différents aspects de l'étiage,
- une fonction objectif adaptée à la simulation de l'étiage doit être définie pour pouvoir caler au mieux les paramètres du modèle pluie-débit,
- des méthodes de régionalisation doivent être définies pour pouvoir connaître les valeurs des paramètres du modèle pluie-débit sans avoir à les caler ou lorsqu'il est impossible de les caler.

Objectifs de la thèse

L'objectif principal de la thèse est de déterminer une structure de modèle pluie-débit régionalisée pour la simulation de différents indices d'étiage en tout point des cours d'eau français. Ce travail de thèse s'inscrit dans l'objectif d'amélioration de l'outil informatique d'aide à la décision « LoiEau », afin d'intégrer l'estimation de nouveaux indices d'étiage à l'ensemble de la France, notamment à un intervalle de temps journalier.

Pour ce faire, nous nous intéressons à l'ensemble de la chaîne de modélisation. Nous cherchons d'abord à déterminer une fonction objectif adaptée à la simulation des différents indices étiages souhaités, puis à définir une structure de modèle pluie-débit et à régionaliser ses paramètres en émettant l'hypothèse de départ que les modèles moins paramétrés sont plus facilement régionalisables.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est divisé en 6 chapitres précédés d'une introduction générale et suivis des conclusions.

Le premier chapitre est une introduction au phénomène d'étiage. Il explique les différents processus hydrologiques liés à l'étiage ainsi que les impacts de ce phénomène et les réglementations qui ont été mises en place.

Le deuxième chapitre présente l'échantillon de bassins versants et les données retenus pour nos travaux. Les différents indices d'étiage sont définis et les régimes d'étiage sont étudiés à l'échelle de la France.

Le troisième chapitre est un article (soumis et accepté) consacré à la recherche d'une fonction objectif adaptée pour la simulation de différents indices d'étiage.

Le quatrième chapitre présente le développement d'une version journalière faiblement paramétrée d'un modèle pluie-débit et l'impact du nombre de paramètres libres des modèles pour simuler les indices d'étiage en sites jaugés.

Le cinquième chapitre présente la recherche d'une méthode de régionalisation des paramètres adaptée pour la structure du modèle journalier, tout en étudiant l'impact du nombre de paramètres libres sur ces méthodes de régionalisation.

Le sixième chapitre présente un travail comparatif des différents modèles journaliers pour étudier l'impact du nombre de paramètres du modèle journalier sur les simulations en sites non jaugés, puis une comparaison avec d'une part, une méthode stochastique d'une estimation d'un indice d'étiage classique et d'autre part le modèle mensuel LoiEau pour analyser le changement de pas de temps.

Le dernier chapitre résume les travaux effectués au cours de cette thèse et les principales perspectives.

1 Etiage, impacts et réglementations

La gestion de la ressource en eau est l'une des grands problématiques du 21^e siècle. De nombreux phénomènes, naturels ou anthropiques, viennent influencer sur la ressource et plus particulièrement sur le cycle de l'eau. Parmi eux, l'étiage est probablement l'un des plus importants phénomènes affectant la ressource. Ce terme est cependant difficilement définissable. Dans ce premier chapitre sont exposés les définitions de l'étiage et les processus relatifs à ce phénomène. Cette étape permet alors de définir les indices qui caractérisent l'étiage, les impacts de ce phénomène et la réglementation qui a été mise en place pour limiter les risques qui lui sont liés.

1.1 Définitions de l'étiage

Le mot étiage est un mot typiquement français qui n'a pas vraiment d'équivalent dans d'autres langues. Ainsi, en allemand nous pourrions le traduire par « Niedrigwasser » (littéralement basses eaux) et en anglais, les termes « low-flow » (littéralement basses eaux) ou « hydrological drought » (littéralement sécheresse hydrologique) sont employés. Pourtant, une distinction est faite entre les notions d'étiage et celles de basses eaux et entre celles d'étiage et de sécheresse.

Selon le Glossaire Internationale d'Hydrologie⁴, l'étiage correspond au « niveau le plus bas atteint par un cours d'eau ou un lac ». Dans ce sens, inspiré du « niveau le plus bas atteint par la marée descendante » dans le domaine maritime, aucune notion de temporalité de l'étiage n'est formulée. Dans le Dictionnaire français d'hydrologie de surface, Roche (1986) donne une autre définition et prend en compte la notion de temporalité. Il définit l'étiage comme le « niveau annuel le plus bas atteint par un cours d'eau en un point donné ». La différence entre étiage et basses eaux n'est alors pas encore introduite. Dans le Dictionnaire français d'hydrologie, Dacharry (1996) définit l'étiage comme étant le « débit exceptionnellement faible d'un cours d'eau, qu'il ne faut pas confondre avec les basses eaux saisonnières habituelles, même s'il est en exacerbation ». Cette définition fait la distinction entre étiage et basses eaux, phénomène habituel du cycle de l'eau défini comme la gamme de débits inférieurs aux débits moyens interannuels ou inférieurs aux débits médians. Cette seconde définition des basses eaux est préférée par Smakhtin (2001) car plus rigoureuse.

⁴ <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/HINDFR.HTM>

Le phénomène d'étiage apparaît alors comme une situation annuelle, ou pluriannuelle pour certains bassins, de débits extrêmes par rapport à une situation « normale » de basses eaux. Il convient maintenant de différencier le phénomène d'étiage des événements de sécheresse. La sécheresse est un phénomène de manque d'eau résultant d'un manque de précipitations par rapport à la normale pendant une certaine période. La sécheresse est un phénomène plus général qui n'est pas seulement caractérisé par une baisse du débit des cours d'eau mais par d'autres facteurs tels que le manque d'eau disponible dans les sols (sécheresse des sols) ou le déficit pluvial (sécheresse météorologique). Ainsi, les sécheresses peuvent inclure des périodes d'étiage mais une période d'étiage ne constitue pas nécessairement une sécheresse (Smakhtin, 2001). Le phénomène de sécheresse dépassant notre contexte d'étude, il ne sera pas étudié ici. Pour autant, un intérêt existe pour les nombreux travaux de recherche qui portent plus particulièrement sur ce sujet (Keyantash et Dracup, 2002 ; Keyantash et Dracup, 2004 ; Wilhite et Glantz, 2009 ; Mishra et Singh, 2010 ; Vidal *et al.*, 2010b ; Mishra et Singh, 2011 ; Van Lanen *et al.*, 2016) ainsi que sur l'impact du changement climatique sur ce phénomène (Soubeyroux *et al.*, 2010 ; Dai, 2012 ; Vidal *et al.*, 2012).

Ainsi, l'étiage est défini comme un phénomène naturel, saisonnier, résultant généralement d'un déficit de pluie plus ou moins long et plus ou moins sévère, susceptible de varier dans le temps et dans l'espace et entraînant une diminution du débit dans les cours d'eau. La Figure 1.1 illustre le phénomène d'étiage à travers deux photos. La première a été prise sur le Réal Collobrier à Rimbaud dans le sud-est de la France au cours de l'été 2011. La seconde a été prise sur la Seine à Paris durant l'été 1943.

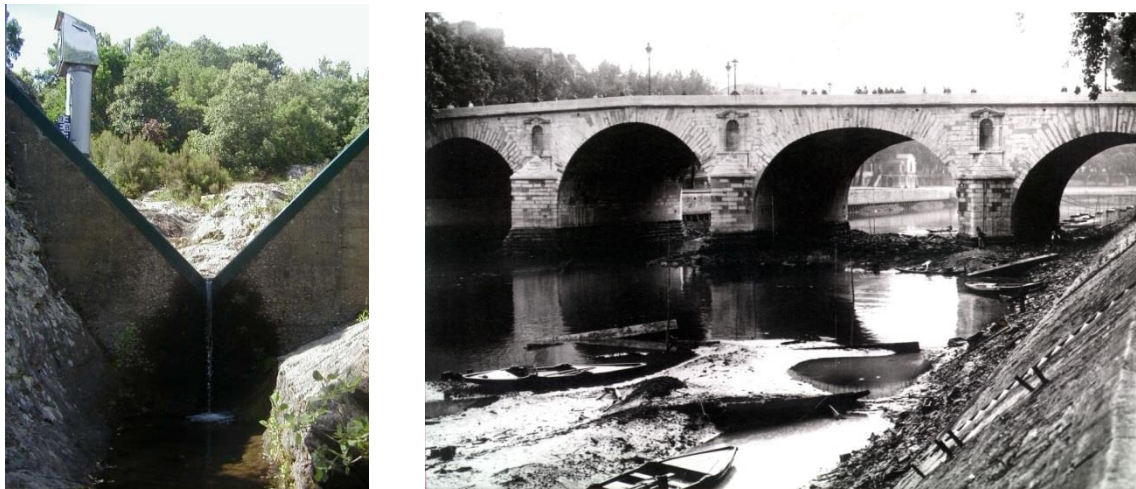


Figure 1.1 : Photos illustrant le phénomène d'étiage. A gauche, le Réal Collobrier à Rimbaud à l'été 2011. A droite, la Seine à Paris à l'été 1943.

1.2 Processus hydro-climatiques liés à l'étiage

Le phénomène d'étiage est le résultat de la combinaison de différents processus liés au climat et aux caractéristiques du bassin versant. Connaître ces processus permet de mieux identifier les impacts de l'étiage mais aussi d'évaluer la grande diversité des régimes d'étiage. Il s'agit ainsi de produire une base de connaissance des types de données utiles à l'étude des étiages ainsi que de déterminer des similarités entre bassins versants à l'aide des processus qui contrôlent l'étiage.

Smakhtin (2001) décrit le fonctionnement d'un bassin versant de manière conceptuelle sous la forme d'un ensemble de réservoirs interconnectés. Chacun de ces réservoirs possède trois composantes : recharge, stockage et vidange. La Figure 1.2 illustre cette représentation conceptuelle du cycle de l'eau sur un bassin versant.

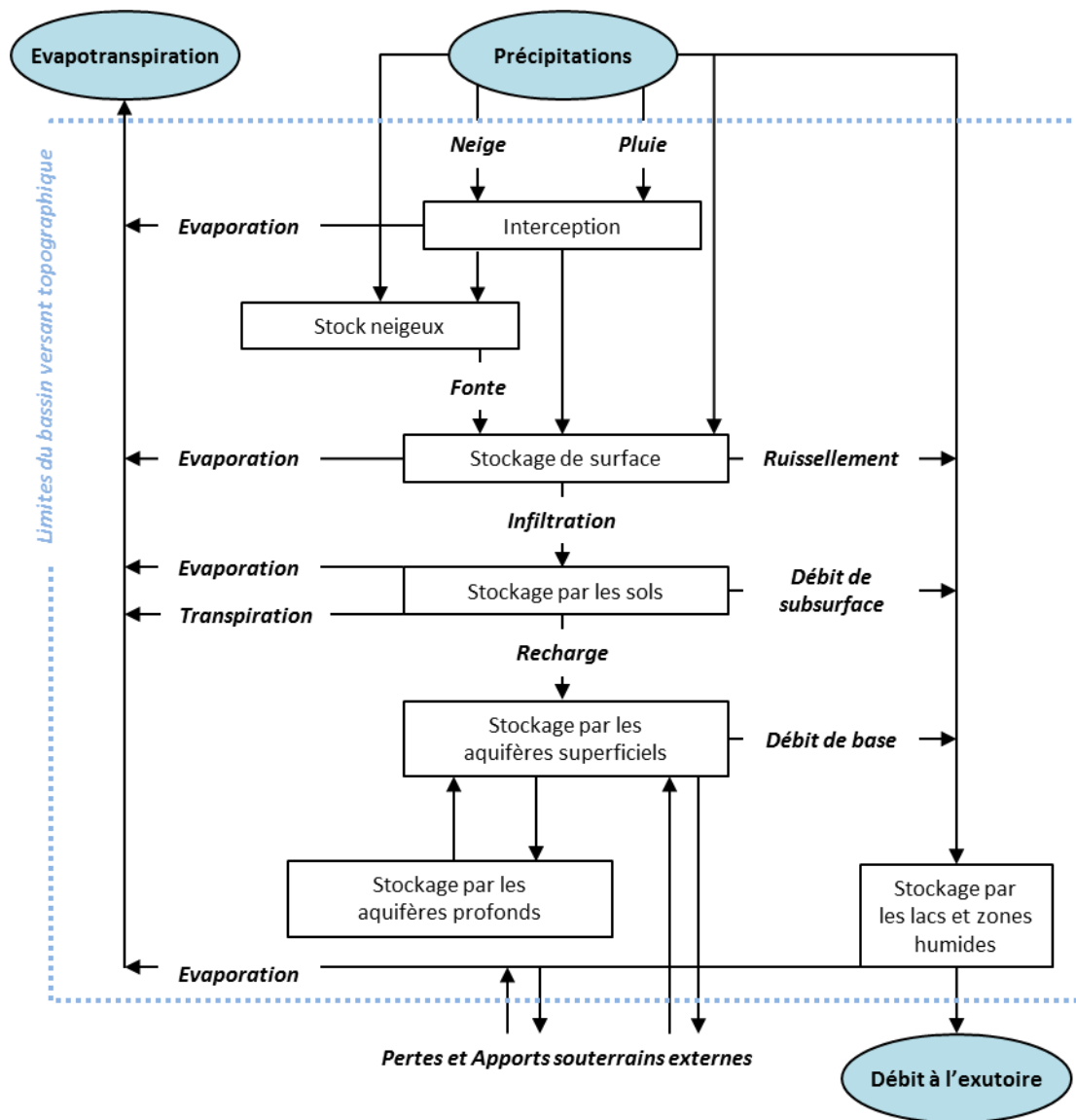


Figure 1.2 : Schéma des différents processus hydrologiques et de stockages sur un bassin versant (schéma modifié d'après WMO, 2008).

La recharge de l'ensemble du système est assurée par les précipitations. Une partie de celles-ci retourne à l'atmosphère par évaporation et par transpiration, et le reste se répartit entre ruissellement de surface et infiltration. Le stockage et la vidange sont alors assurés par différentes caractéristiques physiographiques du bassin versant comme la géologie, la présence d'aquifère, ... Nous comprenons alors que les processus liés à l'étiage se divisent en deux grandes composantes : une composante liée aux précipitations et plus généralement au climat et une seconde composante liée aux sols et aux aquifères.

Facteurs climatiques

A partir de cette première interprétation, il apparaît que le premier facteur influant sur les débits et donc sur l'étiage est le climat à travers les variations des précipitations et de l'évapotranspiration. Ainsi, en période d'étiage, le débit du cours d'eau va diminuer à cause d'un manque de précipitations (diminution de la recharge), d'une augmentation de l'évapotranspiration (pertes sur les couches superficielles des sols) ou des deux phénomènes combinés. Le débit du cours d'eau n'est alors assuré que par la vidange progressive des différents réservoirs, sous réserve qu'ils existent et en fonction de leur taux de remplissage. Le débit résultant de ces écoulements est alors appelé débit de base. Il ressort de ces considérations deux types de régime d'étiage associés à la saisonnalité.

- Un étiage lié à un déficit pluviométrique et une évapotranspiration élevée. Ce type d'étiage est très observé dans les milieux arides mais aussi dans des régions plus humides où les températures estivales sont relativement élevées et les précipitations sont faibles. Nous parlerons donc d'étiage estival.
- Un étiage lié aux stockages des précipitations sous forme de neige ou de glace. Ce type d'étiage est observé dans des régions froides et montagnardes. Nous parlerons alors d'étiage hivernal.

Généralement, nous ne constatons qu'une seule saison d'étiage suivant les bassins versants. En effet, dans le cas des cours d'eau influencés par la neige, la fonte des neiges ou de la glace au printemps entretient le débit de ces cours d'eau lors de la saison estivale. Cependant, certains bassins influencés à la fois par la neige en hiver et par de faibles précipitations et de fortes évapotranspirations en été peuvent alors posséder deux saisons annuelles d'étiage.

Cette information sur la saisonnalité et la dépendance spatio-temporelle de l'étiage avec le climat sont des indicateurs importants utilisés pour le regroupement de bassins versants dans l'optique de régionaliser différents indices d'étiage (Laaha et Blöschl, 2006a ; WMO, 2008 ; Van Loon et Van Lanen, 2012).

Comme le climat joue un rôle important sur le phénomène d'étiage, le changement climatique en constitue un facteur particulièrement influent. L'impact du changement

climatique sur la ressource en eau, notamment en période d'étiage, a déjà été abordé par de nombreuses études (Hisdal *et al.*, 2001 ; Drogue *et al.*, 2004 ; Giuntoli et Renard, 2010).

Facteurs liés au bassin versant

Les processus liés au bassin versant ont une grande influence sur l'étiage. En effet, nous remarquons que les propriétés géologiques, pédologiques et le couvert végétal des bassins versants ont un effet sur la recharge et le stockage des réservoirs qui représentent les sols et les aquifères mais aussi sur la vidange de ces réservoirs. Les propriétés de stockage et de capacité de drainage sont ainsi déterminées par la pente, la profondeur des sols, la texture, la géologie ou encore la couverture végétale. Parmi tous ces descripteurs, de nombreuses études ont montré que la géologie tenait un rôle très important et qu'il existait des relations entre elle et le débit d'un cours d'eau, notamment en période d'étiage (Armbruster, 1976 ; Bingham, 1986 ; Aucott *et al.*, 1987 ; Tallaksen, 1989 ; Gustard *et al.*, 1992 ; Vogel et Kroll, 1992 ; Smakhtin, 2001 ; Kroll *et al.*, 2004 ; Tallaksen et Van Lanen, 2004) : une fois que les processus de surface (interception, stockage de surface) ont déterminé le volume d'eau qui s'infiltre, sa vitesse d'infiltration dépend de la perméabilité des sols dont la capacité de drainage détermine la vitesse de recharge du système souterrain et la réponse du bassin versant (WMO, 2008).

Le gradient hydraulique et la conductivité hydraulique déterminent ensuite le temps de stockage ainsi que le débit de base. Ces processus sont lents et permettent le soutien des débits d'étiage. Par exemple, la présence d'aquifère superficiels dans les bassins versants de montagne est une source d'eau lors des périodes sèches.

Outre ces facteurs qui favorisent l'entretien du débit des cours d'eau en l'absence de précipitations, la présence de lacs ou de zones humides permet également le soutien des débits en période d'étiage (Gerasimenko, 1972 ; Gustard, 1989 ; Sakovich, 1990).

Tous ces processus conduisent à une grande variété dans les régimes d'étiage avec généralement de grandes disparités spatiales en fonction des caractéristiques de bassin versant. A tous ces processus d'apports d'eau lors des périodes d'étiage, il faut rajouter les processus de pertes qui proviennent tout d'abord de l'évapotranspiration des couches superficielles (climat et couvert végétal) mais aussi le phénomène de drainage des cours d'eau par la nappe lorsque le niveau de celle-ci est assez bas pour le permettre. Dans certains cas, la

géologie d'un bassin versant peut jouer un rôle encore plus complexe en permettant un apport ou une perte suivant la période considérée et les zones. C'est notamment le cas des systèmes karstiques dont la complexité est grande et qui ne seront pas étudiés dans la thèse.

Facteurs liés aux activités anthropiques (hors changement climatique)

Le phénomène d'étiage peut aussi être influencé par des activités humaines : les prélèvements d'eau, les rejets d'eau, la création de réservoir et le changement de l'occupation du sol.

Les prélèvements d'eau sont principalement liés à la production d'eau potable, aux activités industrielles et agricoles, en particulier à l'irrigation. Cela entraîne une baisse du niveau des cours d'eau, en particulier lors de périodes sèches (Eheart et Tornil, 1999 ; Ngigi *et al.*, 2008). L'eau peut aussi être prélevée dans la nappe mais lorsque ces prélèvements sont trop proches de la rivière ils tendent à avoir un impact sur la diminution de son niveau (Clausen *et al.*, 1994 ; Van Lanen et Weerd, 1994 ; Tallaksen et Van Lanen, 2004).

Les rejets d'eau dans les cours d'eau sont principalement constitués des rejets des industries et des rejets en sortie des stations d'épurations. En période d'étiage, ces rejets peuvent augmenter la pollution des cours d'eau en plus d'en augmenter les débits, les débits rejetés étant parfois supérieurs à ceux naturels (Maurice, 2009 ; Despriée *et al.*, 2011).

Les débits des cours d'eau sont aussi très influencés par la création de réservoirs et d'ouvrages hydrauliques dont les objectifs varient : hydroélectricité, alimentation en eau potable, tourisme, ... Suivant l'utilisation et l'activité, ces ouvrages sont susceptibles d'avoir des impacts importants sur les débits des cours d'eau, en accentuant la sévérité de l'étiage ou en apportant un soutien au débit des cours d'eau.

Un dernier facteur rentre dans cette catégorie. Il s'agit de l'occupation du sol dont les impacts sur les cours d'eau sont indirectement associés aux activités humaines d'urbanisations, de déforestations et de reforestations. Par exemple, la reforestation entraîne une augmentation de l'évapotranspiration ainsi qu'une diminution de l'eau souterraine qui est consommée par les plantes. Ces deux facteurs ont pour conséquence d'augmenter la sévérité de l'étiage (Robinson et Cosandey, 2002). L'impact quantitatif reste cependant souvent très localisé et assez controversé, tout comme l'impact de l'urbanisation (Salavati, 2015).

1.3 Indices d'étiage

Différents indices ont été définis pour caractériser l'étiage ainsi que les impacts que celui-ci peut avoir sur la ressource en eau. Ces indices d'étiage sont des statistiques dérivées des chroniques de débit. Une liste exhaustive de ces indices peut être trouvée dans l'article de Smakhtin (2001), qui a fait un état des lieux des différentes méthodes de caractérisation des étiages en contextes jaugés et non jaugés, ainsi que dans le manuel de l'Organisation Météorologique Mondiale (WMO) sur l'estimation et la prédiction de l'étiage (2008). Nous présenterons ici les différentes catégories d'indices d'étiage, utiles par la suite pour évaluer les impacts possibles de l'étiage, et les réglementations fondées sur ces indices. Le calcul des indices retenus dans le cadre de ces travaux est présenté dans le chapitre 2.

Les indices d'étiage peuvent être regroupés en trois catégories :

- ceux qui mesurent la sévérité de l'étiage et la probabilité de retour de ces événements,
- ceux qui représentent la durée et le déficit de l'étiage,
- ceux qui déterminent la phase pendant laquelle le débit décroît en l'absence de précipitations, phase appelée tarissement.

La première catégorie d'indices permet d'identifier des seuils de débit en rapport avec la sévérité de l'étiage. Elle est divisée en trois sous-catégories : (i) les débits minimaux annuels, (ii) les débits minimaux annuels associés à une période de retour, (iii) les débits issus de la courbe des débits classés.

Les débits minimaux annuels portent sur des débits moyens représentatifs de périodes plus ou moins longues pendant la période d'étiage. Les débits moyens peuvent être calculés sur un intervalle de temps journalier (VCNd) ou mensuel (QMNA). Sur un intervalle de temps journalier, ils correspondent au minimum annuel d'une moyenne glissante sur d jours. Le nombre de jours est souvent choisi à 7 ou 10 jours pour lisser l'effet des erreurs de mesure sur les débits ou les effets liés aux activités anthropiques (Laaha, 2000). Sur un intervalle de temps mensuel, nous parlons de débit moyen mensuel le plus bas de l'année. Cet indice est surtout utilisé en France.

Ces débits minimaux annuels sont souvent associés à une période de retour T et sont utilisés dans de nombreux pays. Dans la littérature, nous trouvons souvent des périodes de retour de 5 et 10 ans. Par exemple, le VCN7 associé à la période de retour de 10 ans est très employé aux Etats-Unis et au Canada (Kroll et al., 2004) alors que le QMNA(5), QMNA de période de retour 5 ans, est préféré pour la gestion de l'eau en France.

Pour ce qui est de la courbe des débits classés, elle consiste à représenter sur un même graphique l'ensemble des valeurs de débit à un exutoire, de la plus forte valeur en crue à la plus faible en étiage. Il peut en être déduit les fréquences de dépassement de débits donnés. Les débits dépassés 90% du temps (noté Q90) ou 95% (noté Q95) sont couramment étudiés dans de nombreux pays. Lorsque les cours d'eau s'assèchent une partie de l'année, des pourcentages de dépassement de 60% (noté Q60) ou 75% (noté Q75) sont préférés pour caractériser les débits d'étiage (Smakhtin, 2001). Ces statistiques de débits sont relativement robustes par rapport aux effets des erreurs de mesures sur les débits (Laaha, 2000).

De cette première catégorie d'indices d'étiage il est déduit les seuils de débits qui sont utilisés dans la deuxième catégorie. Cette dernière fournit des indices qui mesurent la durée moyenne ou maximale, ainsi que le déficit moyen ou maximal, de l'événement durant lequel le cours d'eau est considéré en étiage, c'est-à-dire lorsque les débits sont inférieurs à un débit seuil fixé. Le choix de la valeur seuil dépend de l'objectif de l'étude. Les débits issus de la courbe des débits classés avec des pourcentages de dépassement entre 70% (Q70) et 95% (Q95) sont classiquement utilisés pour déterminer cette valeur seuil (Gottschalk *et al.*, 1997 ; Tallaksen et Hisdal, 1997 ; Fleig *et al.*, 2006).

La dernière catégorie regroupe des indices qui servent à évaluer la vitesse à laquelle le débit décroît pendant la phase de récession. L'indice de récession, issu de l'interprétation de la courbe de tarissement, renseigne sur la vitesse de décroissance du débit lors de cette phase et permet ainsi de différencier les différents réservoirs localisés au sein du bassin versant et qui participent par leur vidange au soutien de l'étiage. Les indices d'inertie reflètent le débit de base et sont aussi reliés à cette catégorie.

1.4 Réglementations

Les réglementations définies et appliquées pour la gestion de la ressource en eau diffèrent suivant les pays. A travers les différentes définitions de l'étiage et les processus qui lui sont associés, ce phénomène d'étiage peut avoir de nombreux impacts, aussi bien sur les écosystèmes que sur les activités humaines. Les politiques ont donc mis en place de nombreuses réglementations pour mieux gérer la ressource en eau. Ces réglementations se fondent sur les indices d'étiage précédemment définis. Ainsi, les indices portant sur la durée et le déficit d'un événement d'étiage sont utiles lorsque la demande en eau est importante dans de nombreux domaines comme l'irrigation, l'alimentation en eau potable, la navigation ou encore les volumes nécessaires aux différents écosystèmes (Yevjevich, 1967 ; Nathan et McMahon, 1990 ; Tallaksen et Van Lanen, 2004). En outre, ces indices reposent sur des seuils de débits associés à un indice d'étiage dont le choix dépend du pays et de l'activité (QMNA(5) en France, Q95 en Autriche, Q97 en Suisse, ...). Nous détaillerons ici la réglementation française qui a été mise en place ces 25 dernières années.

En France, les premières réglementations sur la gestion des ressources en eau sont issues de la loi n°92-3 du 3 janvier 1992. Celle-ci a permis de reconnaître la ressource en eau comme un « patrimoine commun de la Nation » et de définir les premières mesures de gestion et de protection de la ressource à travers la création de Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) qui gèrent les grands bassins versants français et de Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) pour la gestion à l'échelle des sous-bassins. Concernant la gestion de la ressource en eau en période d'étiage, cette loi définit le QMNA(5) comme le débit de référence d'étiage pour l'application de la police de l'eau, à savoir le contrôle des rejets et des prélèvements en eau.

Le 23 octobre 2000, le Parlement européen a adopté la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) qui a fixé une politique et des objectifs communs afin d'atteindre un « bon état qualitatif et quantitatif des milieux aquatiques » superficiels et souterrains en 2015. Les objectifs de la DCE sont :

- une gestion de la ressource en eau par bassin versant,
- des référentiels définis par « masse d'eau »,
- une planification des différents objectifs et des différentes méthodes de travail (état des lieux, plan de gestion, programme de mesure et de surveillance),
- une transparence des données et des politiques de l'eau.

Cette directive a été suivie en France par l'élaboration de la loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006, dite Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA). Les principaux objectifs définis par cette loi sont :

- définition d'un cadre et des méthodes pour l'application des objectifs de la DCE,
- amélioration du service public et de l'assainissement pour un meilleur accès à l'eau pour tous,
- modernisation de l'organisation de la pêche en eau douce.

L'action aux niveaux des SDAGE et des SAGE a ainsi été renforcée. Cette loi a permis d'établir un état des lieux de la ressource en eau en France et la mise à disposition de nombreuses données sur la ressource en eau⁵, comme la Banque Nationale des Prélèvements en Eau (BNPE) ou encore les sites de chacun des grands bassins versants français où sont regroupées les fiches synthèses de chacune des « masses d'eau » présente sur le bassin versant.

En ce qui concerne l'étiage, les différentes lois sur l'eau ont permis aux préfets de décider des arrêtés cadres limitant ou interdisant les usages de l'eau en cas de sécheresses importantes. A la suite de la sécheresse de 2003, un Plan Cadre Sécheresse a été mis en place à l'échelle nationale en 2005 pour une meilleure gestion de la ressource en eau. Quatre niveaux d'intervention ont été définis, de la vigilance à la crise renforcée, pour instaurer

⁵ Toutes ces informations sont regroupées sur le site <http://www.eaufrance.fr/spip.php?page=portail>.

différentes restrictions en fonction du stade de sécheresse observée. Ces niveaux permettent un compromis entre la préservation des écosystèmes et de la santé et les différents prélèvements (agriculture, industrie et usages domestiques). La définition de ces quatre niveaux fait intervenir des valeurs d'indices d'étiage spécifiques à chaque bassin versant. Les quatre niveaux sont les suivants.

- Niveau de vigilance : à ce premier niveau, 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 ;
- Niveau d'alerte : ce niveau, associé au Débit d'Objectif d'Etiage, doit être garanti au moins 8 années sur 10 et doit assurer le bon fonctionnement du milieu aquatique. A ce niveau, les premières limites d'usages de l'eau doivent être prises ;
- Niveau de crise : ce niveau correspond au franchissement du Débit de Crise, valeur à partir de laquelle l'alimentation en eau potable et la survie de certaines espèces sont mises en péril. Un renforcement des mesures de limitations de prélèvements, voire des suppressions de certains usages sont mis en place enfin de ne pas atteindre le niveau de débit de crise renforcée ;
- Niveau de crise renforcée : ce niveau est associé au Débit de Crise Renforcée qui doit garantir la survie des espèces aquatiques et l'alimentation en eau potable. A ce niveau-là, l'arrêt total des prélèvements est décidé.

Le site internet PROPLUVIA⁶ a été mis en place en juin 2011 et recense en temps réel des restrictions mis en place. Un exemple de carte de restriction est donné dans la Figure 1.3 qui recense les restrictions arrêtées par département le 1^{er} septembre 2016. Nous remarquons ici que des départements ayant été fortement impactés par les crues de printemps sont en crise d'étiage début septembre.

⁶ <http://propluvia.developpement-durable.gouv.fr/>

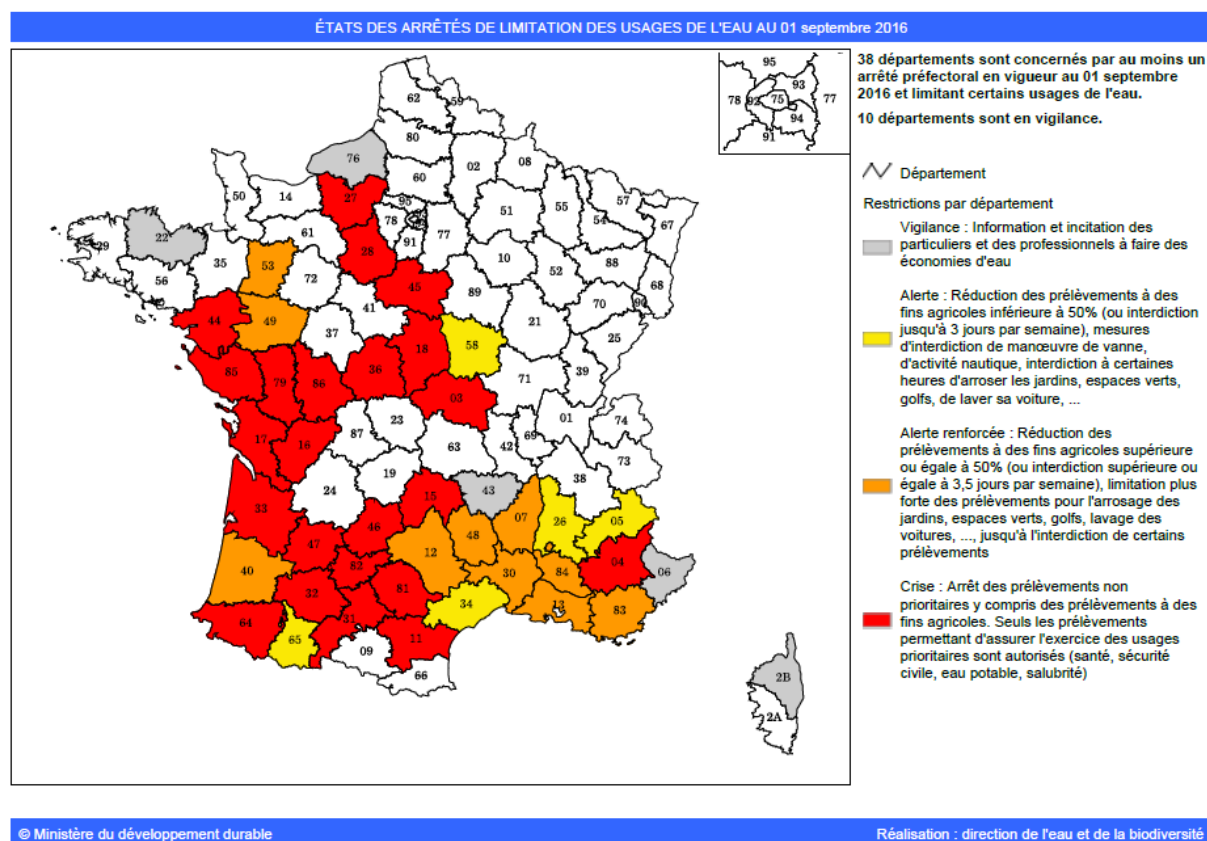


Figure 1.3 : Carte des départements concernés par des arrêtés de limitations des usages en eau au 1^{er} septembre 2016.

Ces niveaux d'intervention sont établis de manière qualitative à l'échelle nationale. Les seuils de débit utilisés pour établir ces quatre niveaux sont définis à l'échelle locale par chacun des gestionnaires de bassins versants. Lang Delus (2011) a mis en place une classification des niveaux de crise en fonction des statistiques de débits exposées précédemment (Figure 1.4).

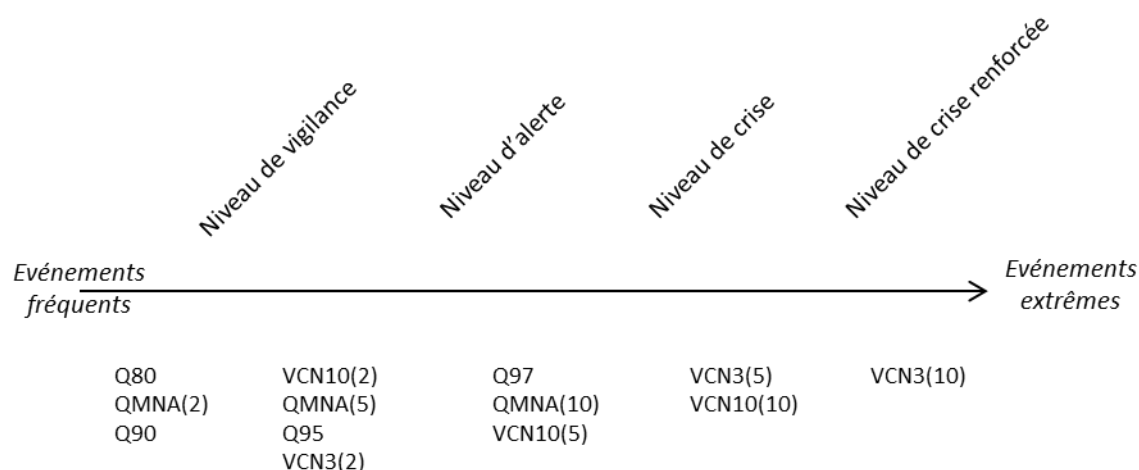


Figure 1.4 : Indices d'étiage et définition des niveaux (ou seuils) de vigilance, d'alerte, de crise et de crise renforcée (issus de Lang Delus, 2011).

1.5 Synthèse du chapitre

L'étiage, phénomène naturel et saisonnier entraînant une diminution du débit des cours d'eau, a de nombreux impacts sur les écosystèmes et les activités humaines telles que la navigation, l'irrigation ou l'alimentation en eau potable. Ce chapitre fournit une définition de l'étiage et décrit les nombreux processus qui jouent un rôle sur ce phénomène et les indices qui permettent d'en évaluer la sévérité, la durée et le déficit. Ces indices, notamment ceux liés à la sévérité, servent de seuils de débit pour les réglementations sur les rejets et les prélèvements dans les rivières. Cela suppose de pouvoir les estimer en tout point des cours d'eau ainsi que d'évaluer les impacts possibles de changements climatiques ou anthropiques. Le chapitre suivant présente un inventaire des régimes d'étiage qui existent en France et se différencient à l'aide des indices exposés précédemment. Y sont également présentées les données qui ont servi à ces travaux de recherche, en particulier les descripteurs de bassin versant qui peuvent expliquer les différents processus liés aux phénomènes de l'étiage à l'échelle des bassins versants.

2 Données et régimes d'étiage français

Préalablement à la présentation des méthodes pour simuler les indices d'étiage relatifs à la sévérité de l'étiage en contexte non jaugé, nous nous proposons de décrire dans ce chapitre les méthodes de calculs de ces indices et d'étudier leur diversité. Nous avons choisi d'inclure d'autres indices, correspondant à la saisonnalité et à l'inertie de l'étiage, pour couvrir plus largement les régimes d'étiage et mieux appréhender la grande hétérogénéité des processus liés à ce phénomène sur le territoire français. Cette revue des indices d'étiage existant n'est cependant pas exhaustive (voir à ce sujet les travaux plus complets de Smakhtin (2001) et Pryce (2004) ou encore le manuel du WMO (2008)).

Dans un premier temps, les jeux de données utilisés dans la thèse sont introduits : échantillons de bassins versants, données hydrométéorologiques et données descriptives de bassins versants. Dans un second temps, le calcul des indices d'étiage utilisés pour analyser les régimes d'étiage français et leurs liens sont présentés.

2.1 Echantillons de bassins versants

Andréassian *et al.* (2006) ont mis en avant que, pour améliorer des modèles hydrologiques ou pour ne pas limiter leur performance à une région ou à certains processus hydrologiques, il est important de travailler sur un large échantillon de bassins versants. Dans ce souci de généralisation, il a d'abord été choisi de constituer un échantillon de bassins de référence à partir des 900 bassins versants français issus des travaux de Catalogne et Sauquet (2012) et de Folton et Arnaud (2012), réalisés lors de la synthèse nationale des débits de référence, ainsi que ceux de Giuntoli et Renard (2010) qui ont servi à définir un réseau de référence pour la surveillance des étiages. La sélection a ensuite été affinée suivant trois critères :

- la longueur des chroniques journalières de débit disponibles,
- le caractère naturel ou peu anthropisé des bassins versants,
- une représentativité spatiale et hydro-climatique de l'échantillon de référence.

En ce qui concerne la longueur des chroniques, Tallaksen et Van Lanen (2004) préconisent des longueurs de chroniques journalières entre 20 et 30 ans pour contourner la sensibilité de l'étiage à la variabilité hydro-climatique sur des périodes courtes. Ces durées peuvent différer en fonction des statistiques hydrologiques souhaitées. Ainsi, Aschwanden et

Kan (1999) ont déterminé que 10 années suffisaient pour calculer le Q347 (statistique de référence en Suisse correspondant au débit dépassé 347 jours par an). Catalogne (2012) considère qu'il faut 18 ans de données pour calculer le module interannuel, 26 ans pour le Q95 (débit dépassé 95% du temps) et moins de 5 ans pour le BFI (« Base-Flow Index »). Prenant en compte les diverses recommandations, la première condition a donc été de retenir les bassins versants pour lesquels au minimum 25 ans de données étaient disponibles sur notre période de référence du 01/01/1970 au 31/12/2013, amenant l'échantillon à 832 bassins. Dans un second temps, pour la procédure de calage-validation qui permet l'évaluation des méthodes, seuls ont été retenus les bassins pour lesquels 15 années étaient disponibles sur les deux sous-périodes, du 01/01/1970 au 31/12/1991 et du 01/01/1992 au 31/12/2013, avec un seuil de 10% de lacunes autorisées par année.

L'influence anthropique (prélèvements en eau, rejets, présence d'ouvrages hydrauliques, ...) sur les bassins versants a d'abord été estimée à partir de l'enquête menée auprès des gestionnaires par Nathalie Folton pour l'étude de 2012 et des travaux de Catalogne (2012) et Giuntoli *et al.* (2013). Une vérification supplémentaire a été effectuée vis-à-vis de l'irrigation, à partir des données de la BNPE (Banque Nationale des Prélèvements en Eau⁷). Celles-ci regroupent les données géolocalisées des volumes annuels prélevés déclarés aux agences de l'eau suivant le type d'eau (superficiel, souterrain ou littoral) et suivant l'usage (alimentation en eau potable, agriculture hors irrigation, industrie, irrigation, loisirs, ...). Au moment de la consultation du site, seules les données pour l'année 2012 étaient disponibles. Le volume prélevé en 2012 pour l'irrigation a été calculé par bassin versant puis comparé au volume d'eau estival écoulé dans la rivière, entre mai et août. Ce ratio peut en théorie prendre des valeurs supérieures à 100% si le volume prélevé dépasse celui qui s'est écoulé dans la rivière. En prenant en compte uniquement le prélèvement superficiel, seuls deux bassins, O1634010 correspondant à la Vixiège à Belpech dans l'Aude et O2215010 à la Saune à Quint-Fonsegrives en Haute-Garonne, ont un ratio $V_{\text{prélevé}}/V_{\text{écoulé}}$ supérieur à 50% avec des valeurs respectivement de 98% et 59%. Ces deux bassins sont cependant marqués comme non influencés dans la banque HYDRO et la qualité globale de leurs mesures en basses eaux est jugée bonne. En prenant en compte les prélèvements superficiels et souterrains, deux bassins viennent s'ajouter, H1503910 (l'Herbissonne à Allibaudières dans l'Aube) et H3203310 (Puisseaux à Saint-Hilaire-sur-Puisseaux), avec des ratios respectivement à 100% et 52%. De la

⁷ www.bnpe.eaufrance.fr

même manière, ces bassins sont jugés non influencés et possédant des mesures en basses eaux de bonne qualité. Les chroniques de ces bassins ont été analysées visuellement et n'ont pas permis de conclure à une influence de ces bassins. Cette vérification de l'influence de l'irrigation a cependant une limite. Seules les données des volumes annuels déclarées en 2012 et géolocalisées au niveau des communes étaient disponibles et ont ainsi pu être comparées. En outre, seuls 69% des bassins de l'échantillon disposaient de chroniques journalières de débit mesurées cette année-là. En l'absence d'autres arguments et en raison de l'avancée des travaux au moment de cette analyse, les quatre bassins ont été gardés dans l'échantillon de référence mais ont fait l'objet d'une attention particulière lors de l'analyse des résultats.

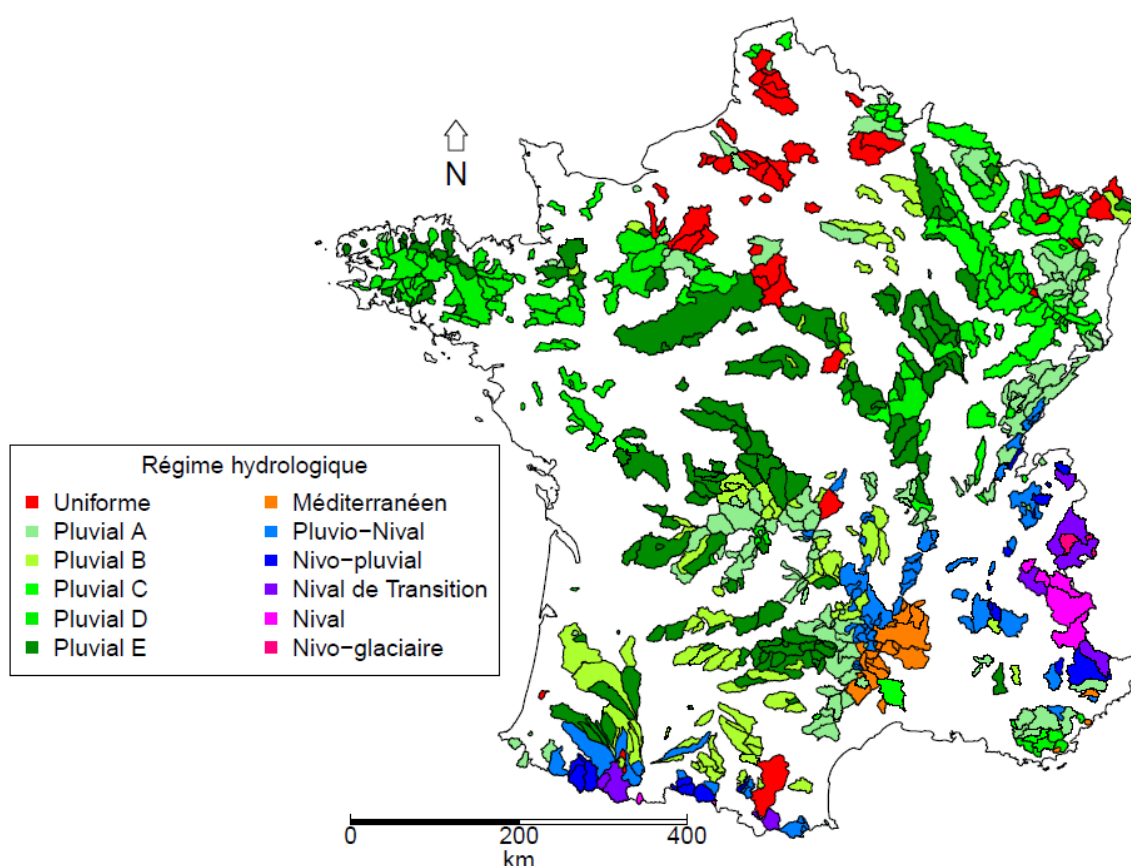


Figure 2.1 : Représentativité spatiale et hydro-climatique de l'échantillon de référence. Les régimes hydrologiques sont basés sur la classification des régimes mensuels français de Sauquet *et al.* (2008).

L'échantillon de référence ainsi obtenu contient 691 bassins, répartis sur toute la France (Annexe 1.1). Un échantillon de validation de 141 bassins a aussi été constitué (Annexe 1.2), ne servant pas au développement du modèle et répondant au premier critère sur la longueur des chroniques mais pas au second. Il servira à valider les méthodes développées. Les Figure 2.1 et Figure 2.2 illustrent la répartition spatiale des deux échantillons de bassin versant. La

répartition spatiale de l'échantillon de référence est assez homogène, avec tout de même des zones non couvertes comme la Charente ou l'aval du Rhône. En effet, le choix des bassins versants de l'échantillon repose en partie sur le caractère non influencé de ces bassins. La sélection est par conséquent majoritairement constituée de bassins de petites et moyennes surfaces (voir Tableau 2.1) et tous les grands bassins contenant des aménagements hydrauliques ont été éliminés (bassins de la Loire, de l'Isère, bassins avals de la Dordogne, ...). La représentativité hydro-climatique de l'échantillon de référence est évaluée à l'aide de la classification des régimes mensuels français établie par Sauquet *et al.* (2008) et est illustrée par la Figure 2.1. Les trois-quarts des bassins (75%) ont un régime pluvial. La différence entre les régimes pluviaux correspond à des étiages estivaux et des hautes eaux hivernales plus ou moins marqués suivant les régions et le climat (océanique, tempéré ou continental). Le quart restant est constitué de 15% de bassins nivaux, 7% de bassins uniformes et 3% de bassins méditerranéens. Les bassins nivaux ont des étiages hivernaux ou au début du printemps et des hautes eaux à la fin du printemps ou en été (bassins nivo-glaciaires). Les bassins uniformes et méditerranéens sont deux sous-classes de bassins à régime pluvial. Les premiers, majoritairement situés au Nord de la France, ont des régimes mensuels peu différenciés et les seconds ont des étiages et des hautes eaux précoces, respectivement en juin et fin septembre.

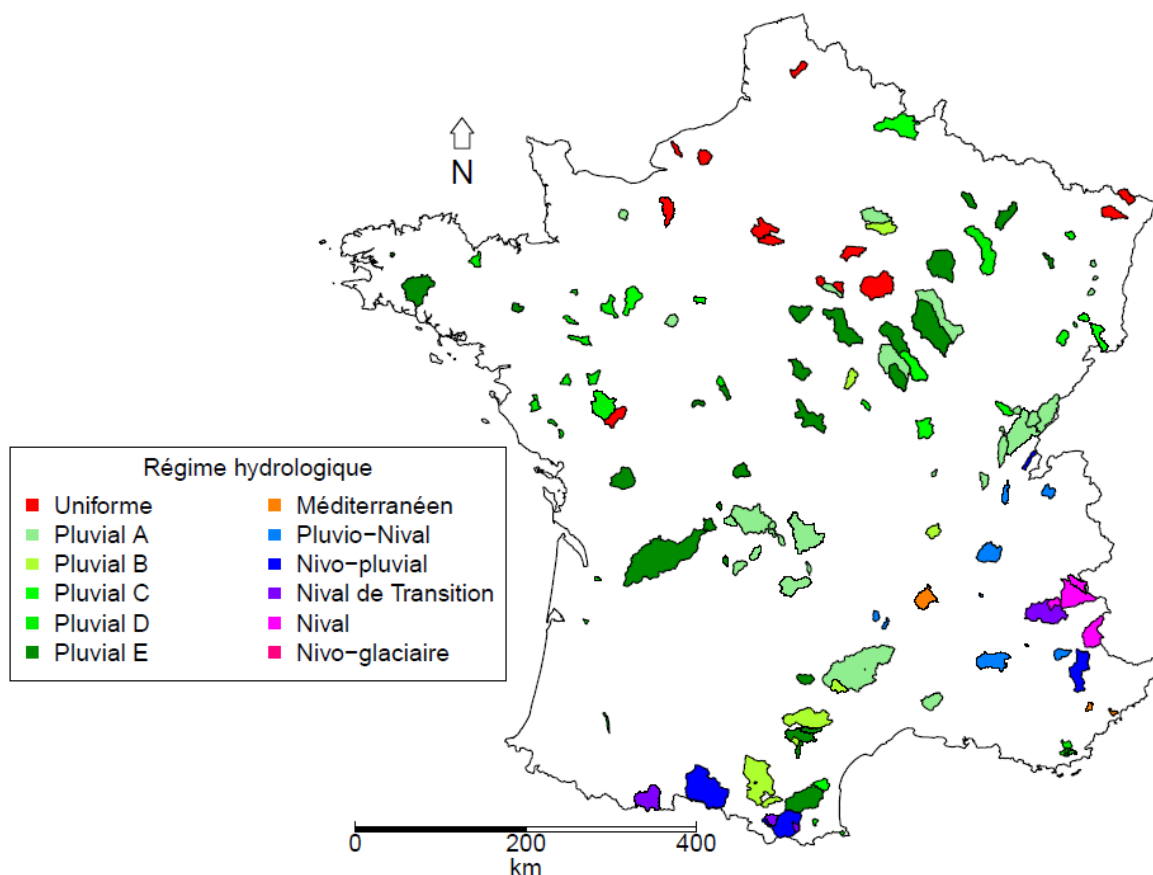


Figure 2.2 : Représentativité spatiale et hydro-climatique de l'échantillon de validation. Les régimes hydrologiques sont basés sur la classification des régimes mensuels français de Sauquet *et al.* (2008).

L'échantillon de validation possède un effectif plus restreint (141 bassins) et, par conséquent, est un peu moins représentatif spatialement avec des zones non couvertes, notamment dans le sud-ouest de la France. Il est composé de bassins dont la superficie est faible à moyenne majoritairement et représente tous les régimes hydro-climatiques de France : 74% de bassins pluviaux, 15% de bassins nivaux, 9% de bassins uniformes et 2% de bassins méditerranéens.

2.2 Données

Les données utilisées dans le cadre de ces travaux de thèse se divisent en deux grandes catégories : les données hydrométéorologiques et les données descriptives de bassins versants. Les premières sont issues de deux banques de données et sont constituées de chroniques de données météorologiques utilisées en entrée des modèles pluie-débit et de chroniques de débits utilisées en comparaison des débits simulés en sortie des modèles pluie-débit. Les secondes sont issues de plusieurs banques de données et permettent de décrire les bassins versants et leurs différents processus hydrologiques au travers de cinq grandes sous-catégories : morphologie et réseau hydrographique, climat, géologie, occupation des sols et pédologie. Les différentes données sont détaillées dans les deux paragraphes suivants.

2.2.1 Données hydrométéorologiques

Pour ces travaux de recherche, les données hydrométriques se présentent sous la forme de chroniques de débits moyens journaliers et sont issues de la Banque Hydro (Banque nationale de données pour l'hydrométrie et l'hydrologie⁸). Les durées des chroniques sont variables suivant les bassins sur la période de référence choisie du 01/01/1970 au 31/12/2013. Cette période a été retenue car elle est suffisamment étendue avec des années humides, comme 1977, et des années sèches telles que 1976, 1989, 2003 et 2011.

Etant donné la taille des échantillons de bassins de référence et de validation, une analyse visuelle des chroniques a été effectuée mais pas une étude approfondie de la qualité des chroniques de débit. Nous retiendrons cependant que les sources d'imprécisions des mesures de débit en période d'étéage sont nombreuses :

- la modification de la section de mesure due par exemple à un envasement ou un développement saisonnier de la végétation, notamment en période d'étéage,
- l'utilisation de sections de mesure adaptées aux crues et non aux étéages,
- la modification de la courbe de tarage liant la hauteur d'eau mesurée au débit du cours d'eau, avec le temps ou des jaugeages qui permettent son réajustement,

⁸ www.hydro.eaufrance.fr

- l'imprécision de la courbe de tarage pour la mesure des débits extrêmes.

Dans la banque HYDRO, il n'existe pas de données sur l'incertitude de mesures de débit ou la fiabilité des mesures. Néanmoins, une analyse critique des données a été effectuée par Catalogne (2012) sur son échantillon, résultats sur lesquels nous nous sommes basés, et une enquête auprès des gestionnaires a été effectuée en 2011 par Nathalie Folton et a permis de valider la moitié de notre échantillon de bassins. Il est à noter que cette problématique d'incertitudes de mesures des débits extrêmes fait l'objet de nombreux travaux en cours.

Les données météorologiques utilisées pour ces travaux de recherche sont issues de la réanalyse SAFRAN développée par Météo France. Celle-ci fournit des chroniques journalières, disponibles sur une grille régulière de 8 km x 8 km pour toute la France, de précipitations liquides et solides et de températures, ainsi que d'autres variables climatiques comme le rayonnement solaire que nous n'utiliserons pas dans le cadre de cette étude (Quintana-Seguí *et al.*, 2008 ; Vidal *et al.*, 2010a). Ces données sont disponibles sur la période de 1958 à 2013 au moment de ces travaux. L'évapotranspiration potentielle est calculée à partir de la formule établie par Oudin (Oudin *et al.*, 2005) et ne dépend que de la température de l'air. Ces données sont sources de nombreuses incertitudes qui n'ont pas été étudiées lors de ces travaux de thèse. Nous retiendrons que les précipitations de SAFRAN tendent à être sous-estimées en milieu montagneux. L'échelle spatiale n'est de plus pas assez adaptée pour représenter la variabilité spatiale d'un quart de notre échantillon de référence dont la surface est inférieure à celle d'une maille de SAFRAN de 64 km².

Le Tableau 2.1 résume la diversité de notre échantillon de bassins versants.

Tableau 2.1 : Percentiles de la distribution de caractéristiques hydro-climatiques des échantillons de bassins versants (en noir pour l'échantillon de référence et en bleu pour l'échantillon de validation).

	Min	25%	50%	75%	Max
Débits moyens annuels (mm/an)	44 58	256 247	390 366	609 651	2 211 1 430
Précipitations moyennes annuelles (mm/an)	634 659	867 837	988 956	1 181 1 172	2 094 2 051
Fraction Solide des Précipitations (%)	0 0	2 2	4 4	10 9	73 57
ETP moyenne annuelle (mm/an)	237 342	623 633	660 674	703 712	864 884
Index d'Aridité (ETP/P) (%)	21 25	54 53	68 72	80 86	117 124
Coefficient de ruissellement (Q/P) (%)	4 5	30 29	39 35	53 53	155 92
Surface (km ²)	4 1	98 68	211 159	478 401	7 935 2 796
Altitude moyenne (m NGF)	29 44	188 175	362 349	743 737	2 866 2 216

2.2.2 Données descriptives de bassin versant

Le choix des variables pour décrire les caractéristiques de bassins versants et résumer les différents processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant est vaste et dépend des applications. Plusieurs descripteurs ont néanmoins été identifiés par Blöschl *et al.* (2013) et sont regroupés dans les grandes catégories suivantes.

- Climat : cette catégorie regroupe toutes les données météorologiques caractérisant les composantes du bilan hydrologique (précipitations liquides et solides, température, évapotranspiration, humidité des sols, ...).
- Morphologie : surface des bassins versants, leur altitude, leur pente, ...
- Occupation du sol : pourcentage de la surface du bassin versant couvert par des forêts, des prairies, ...
- Géologie et pédologie : épaisseur des sols, perméabilité, ...

Les variables disponibles et utilisées ici rentrent dans cette classification et sont détaillées dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Liste des données descriptives de bassin versant utilisées pour ces travaux de recherche.

Catégorie	Variable	Notation et Unité
Morphologie et réseau hydrographique	Surface du bassin versant	S (km ²)
	Densité de drainage	DD (km ²)
	Altitude	Z (m NGF)
	Pente	SL (%)
	Hauteur au-dessus du drain le plus proche (Nobre <i>et al.</i> , 2011)	$HAND$ (m)
Climat	Pluies moyennes interannuelles	PA (mm)
	Pluies hivernales moyennes interannuelles	P_{winter} (mm)
	Pluies printanières moyennes interannuelles	P_{spring} (mm)
	Pluies estivales moyennes interannuelles	P_{summer} (mm)
	Pluies automnales moyennes interannuelles	P_{autumn} (mm)
	Variabilité (écart-type) des précipitations moyennes mensuelles	$VarP$ (mm)
	Nombre de jours sans pluie moyen interannuel	nP_0 (jour)
	Précipitations solides moyennes interannuelles	P_sA (mm)
	Températures moyennes interannuelles	TA (°C)
	Températures hivernales moyennes interannuelles	T_{winter} (°C)
	Températures printanières moyennes interannuelles	T_{spring} (°C)
	Températures estivales moyennes interannuelles	T_{summer} (°C)
	Températures automnales moyennes interannuelles	T_{autumn} (°C)
	Variabilité (écart-type) des températures moyennes mensuelles	$VarT$ (°C)
	Evapotranspiration potentielle moyenne sur juillet et août (Oudin)	ETP_{summer} (mm)
	Evapotranspiration réelle interannuelle (Turc)	$ETRA$ (mm)
	Indice d'aridité	AI (-)
	Evapotranspiration potentielle moyenne interannuelle (Oudin)	$ETPA$ (mm)
Géologie	Pourcentage du bassin versant couvrant une surface imperméable	$\%imp$ (%)
Occupation des sols	Pourcentage du bassin versant occupé par la forêt	$\%forest$ (%)
	Pourcentage du bassin versant occupé par la prairie et/ou de la végétation basse	$\%grass$ (%)
	Pourcentage du bassin versant occupé par les surfaces agricoles	$\%agro$ (%)
Pédologie	Profondeur des sols	DR (m)
	Réserve utile potentielle	AWC (mm)

Le choix de ces variables a d'abord porté sur la disponibilité de celles-ci et sur le lien déjà établi avec divers processus hydrologiques, notamment les processus influant sur l'étiage. Elles proviennent de diverses sources.

- Les données climatiques sont déduites des réanalyses SAFRAN.
- L'évapotranspiration réelle a été calculée selon la formule de Turc (1954) en fonction des pluies et des températures moyennes interannuelles.
- Les données relatives à la pédologie et à la géologie proviennent de la base de données européenne sur les sols, « European Soil Data Base, ESDB » (Panagos, 2006).
- Les données d'occupation du sol proviennent de la base de données Corine Land Cover 2012. Les données issues de la base de 2012 ont été comparées à celles issues de la base de 1990 pour notre échantillon de référence. Peu de différences ont été observées, l'évolution de l'occupation des sols pour cet échantillon étant faible en 20 ans.
- Les données relatives à la morphologie sont issues de la base de données BD TOPO de l'IGN.
- La densité de drainage a été calculée à partir de l'analyse du réseau hydrographique de la BD Carthage (Aubert, 2012).

Nous remarquons que la base de données des descripteurs de bassin versant est majoritairement constituée de descripteurs relatifs au climat, qui sont les premiers facteurs influant sur les débits et l'étiage. De nombreux descripteurs sont corrélés entre eux (par exemple la pluie et l'altitude ou la température et l'altitude). Il nous a semblé important dans un premier temps d'être le plus exhaustif possible dans la constitution de cette base de données. Un travail de filtre de cette base ainsi que l'agrégation possible de ces descripteurs à l'échelle du bassin versant ont été effectués au moment de la régionalisation des paramètres des modèles (chapitre 5). Nous remarquons enfin que les caractéristiques relatives au sous-sol, notamment à la géologie, sont très peu représentées dans cette base de données alors qu'elles jouent un rôle important sur les débits et notamment sur l'étiage (voir paragraphe 1.2).

Cette base de données a été complétée par la typologie en hydro-écorégions (HER) définie par Wasson *et al.* (2001) et Wasson *et al.* (2002) dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive Cadre européenne sur l'Eau pour le « bon état écologique des milieux aquatiques ». Cette typologie, disponible en deux niveaux emboîtés de respectivement 22 et 114 classes (Figure 2.3), permet le découpage d'entités homogènes en termes de géologie, de relief et de climat. Cette donnée qualitative permet d'intégrer des informations complémentaires et permettra de définir des zones homogènes et similaires des bassins versants.

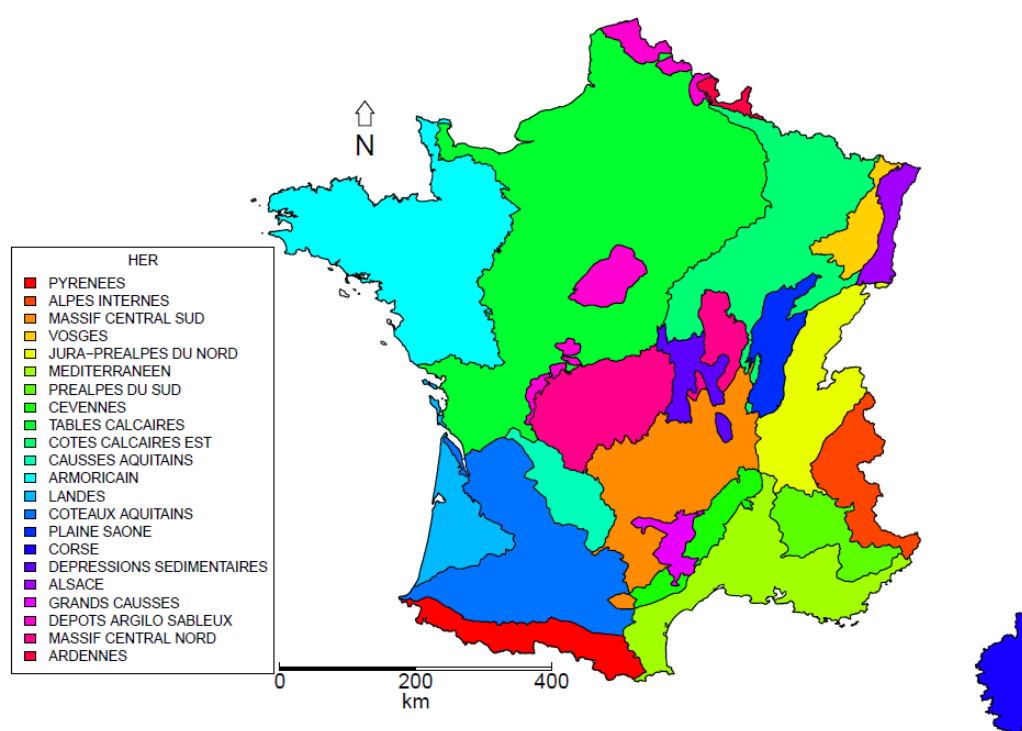


Figure 2.3 : Délimitation des HER de niveau 1 (22 classes) définies par Wasson *et al.* (2001).

2.3 Indices d'étiage

La définition des nombreux indices d'étiage a déjà été détaillée au paragraphe 1.3. Dans cette partie, nous nous proposons d'exposer le calcul des indices utilisés dans la suite et qui permettent d'étudier les régimes d'étiage en France. Dans la littérature scientifique et opérationnelle, aucune règle de gestion des lacunes dans les chroniques n'a été trouvée à notre connaissance. Dans les données issues de la banque HYDRO, si deux ou trois jours sont manquants, ils sont estimés pour le calcul des indices, sinon l'année est supprimée. Nous avons établi des règles pour ne pas « perdre » trop d'années de calcul. Elles reposent sur le calcul du débit moyen annuel et seront explicitées pour chaque indice. Pour le calcul des différents indices, nous choisissons l'utilisation des années civiles qui semblent plus adaptées pour l'étiage que les années hydrologiques, sauf pour les bassins nivaux qui représentent seulement 15% de l'échantillon.

2.3.1 Module interannuel

Ce premier indice n'est pas un indice d'étiage à proprement parler. Il est cependant très utilisé pour la gestion de la ressource en eau. Par exemple, il intervient dans les études préliminaires pour le dimensionnement de réservoirs pour l'alimentation en eau (McMahon *et al.*, 2007). Le module interannuel sert aussi dans des études sur l'impact du changement climatique sur la ressource en eau (Milly *et al.*, 2005). En France, 10% du module interannuel est un indice d'étiage employé dans la réglementation pour la définition des débits réservés (paragraphe 1.4).

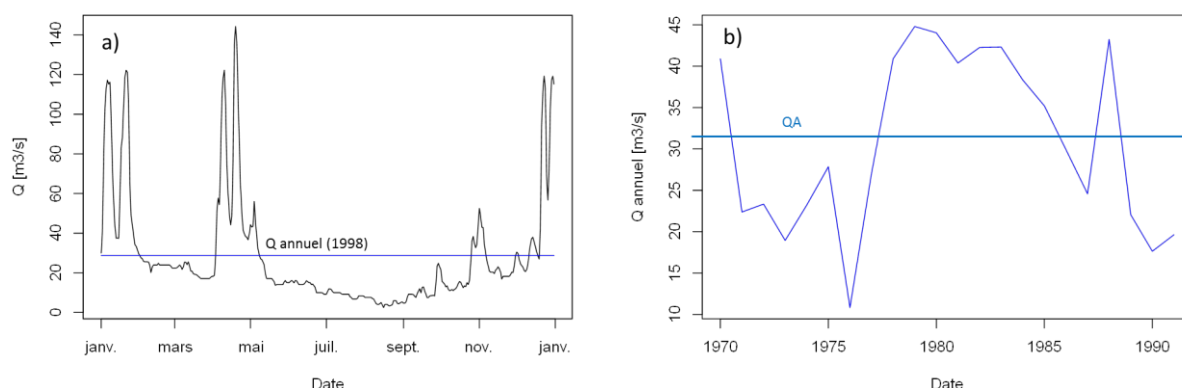


Figure 2.4 : a) Exemple de la chronique de débit journalier de l'année 1998 et du calcul du débit moyen annuel (Q annuel) associé à cette année sur le Loir à Durtal. b) Exemple d'une chronique de débits moyens annuels (Q annuel) sur la période de 1970 à 1991 et du calcul du module interannuel (QA) associé à cette période sur le Loir à Durtal.

Le module interannuel (QA) correspond au débit moyen interannuel. Le débit moyen annuel d'une année est calculé si le taux de lacunes dans la chronique journalière de cette année est inférieur à 10%. Le module interannuel est ensuite la moyenne de ces débits annuels. Un exemple de ces deux calculs, débit moyen annuel et module interannuel, est donné par la Figure 2.4 pour le Loir à Durtal.

La Figure 2.5 illustre la répartition du module interannuel pour notre échantillon de référence. Nous remarquons une forte disparité en France avec des bassins versants très productifs ($QA > 22$ l/s/km²), correspondant à des bassins nivaux situés dans les massifs montagneux (Alpes, Pyrénées, ...), des bassins peu productifs ($QA < 7$ l/s/km²), principalement situés dans le bassin Parisien et plutôt uniformes, et des bassins intermédiaires situés en climat océanique ou dans des zones où le relief est plus modéré. D'une façon générale, la répartition spatiale des écoulements peut s'expliquer assez bien par la répartition spatiale des précipitations et des températures, ce qui met en lumière l'impact fort du climat sur le module interannuel.

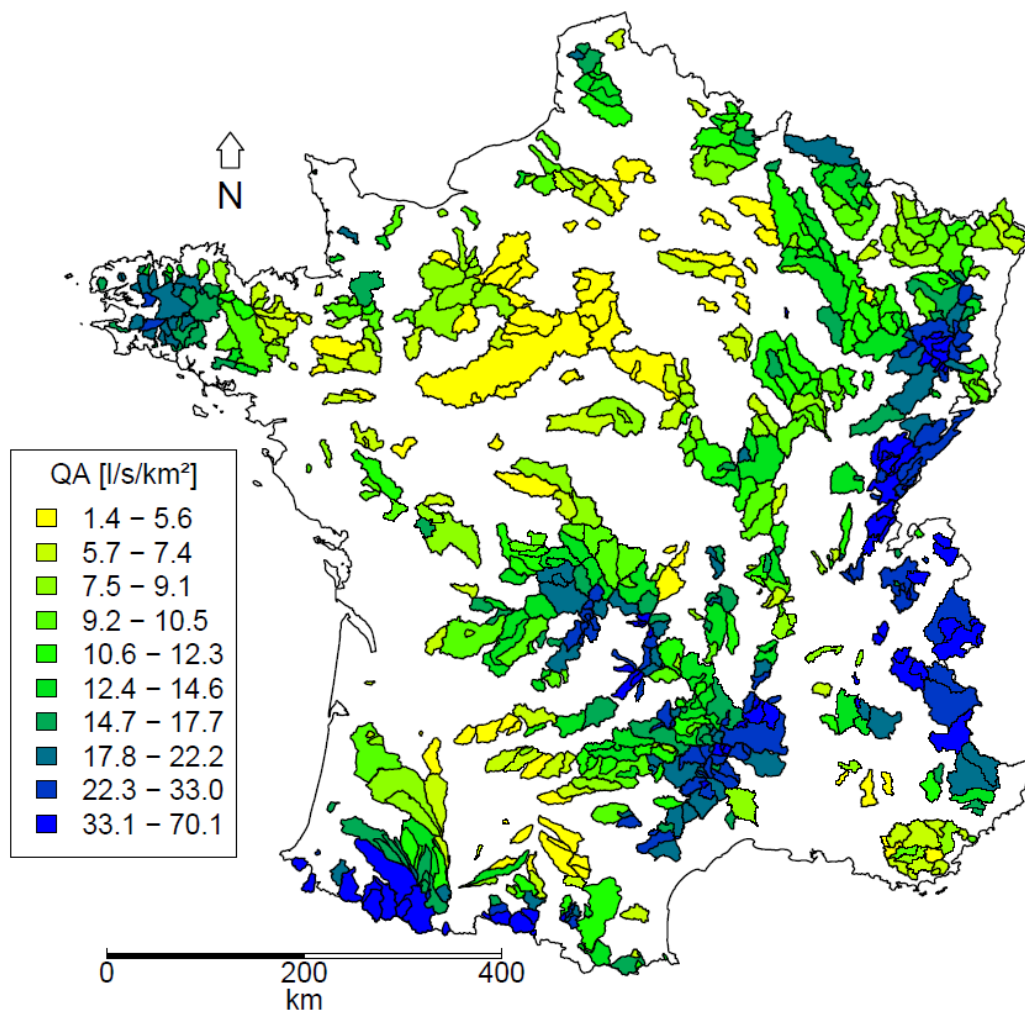


Figure 2.5 : Cartographie du module interannuel (QA) aux stations de l'échantillon de référence.

2.3.2 Sévérité de l'étiage

Débits minimaux annuels

Les débits minimaux annuels observés sur une certaine durée sont les indicateurs les plus utilisés pour caractériser la sévérité d'un étiage. Le VCNd (Volume Consécutif Minimal pour d jours) ou MAMd (en anglais pour Mean Annual d-day Minimum flow) correspond au débit moyen minimal annuel non dépassé pendant d jours consécutifs. Dans la littérature, nous trouvons différentes durées, selon l'étude et le pays. Les plus courantes sont 1, 7, 10 ou 30 jours, néanmoins des durées plus longues sont appropriées pour l'étude des périodes d'étiage longues et sévères. Nous choisissons pour notre étude en France les VCN de durées de 3 et 10 jours. Pour le calcul des VCNd annuels, un premier taux de 33% de lacunes autorisées a été défini pour le calcul de la moyenne glissante. Ensuite, pour le calcul du minimum annuel de la série des moyennes glissantes, seules ont été prises en compte les valeurs des moyennes glissantes inférieures au débit moyen annuel et un taux de 10% de lacunes sur ces valeurs a été autorisé. Un exemple du calcul des VCN30, VCN10 et VCN3 est donné par la Figure 2.6 sur le Loir à Durtal.

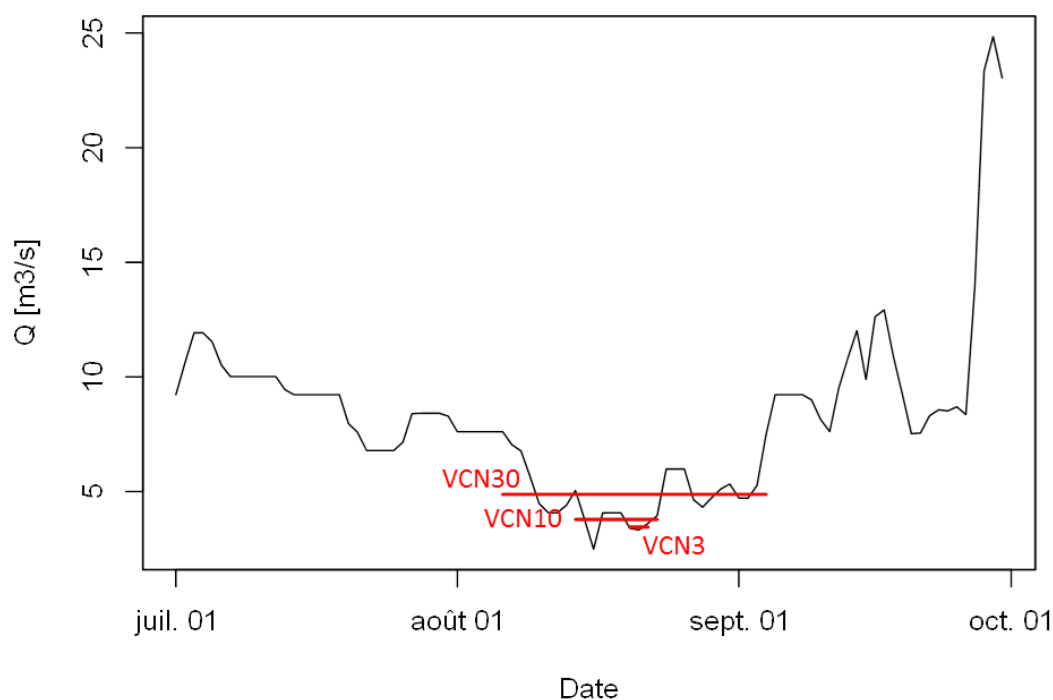


Figure 2.6 : Exemple de calcul des VCN30, VCN10 et VCN3 en 1998 sur le Loir à Durtal.

Le QMNA, caractéristique spécifique à la gestion de l'eau en France, se classe dans cette catégorie. Il correspond au débit mensuel minimal annuel. Très proche du VCN30, il est privilégié dans la législation française. Cependant, si l'étiage est à cheval sur deux mois, cet indice aura tendance à surestimer le débit mensuel minimal annuel, ce qui n'est pas le cas avec le VCN30 (Figure 2.7). Pour le calcul des débits mensuels, le taux de lacunes autorisées a été défini à 10% par mois. Pour le calcul du QMNA annuel, seuls ont été retenus les débits mensuels dont la valeur est inférieure au débit moyen annuel et aucune lacune n'a été autorisée pour le calcul du minimum annuel.

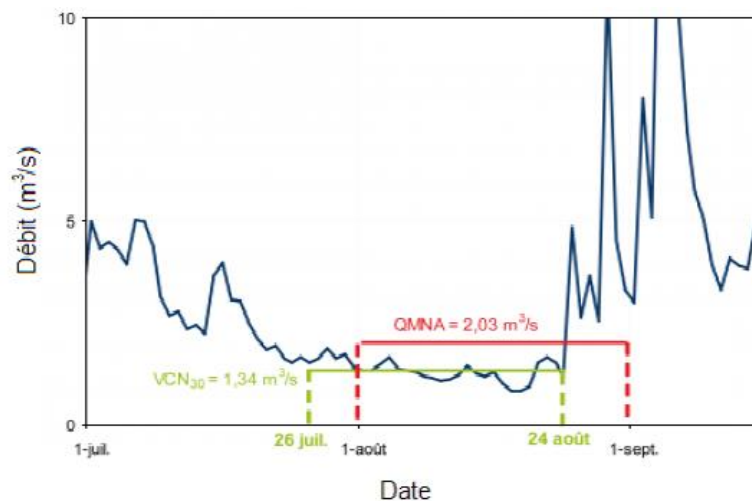


Figure 2.7 : Illustration du problème de calcul calendaire du QMNA sur la Moselotte à Vagny en 1988 (issus de Lang Delus, 2011).

Dans la littérature mais aussi dans la législation les séries annuelles des débits minimaux annuels sont le plus souvent intégrées dans une analyse fréquentielle pour estimer un quantile de période de retour souhaité à partir d'une loi statistique ajustée sur les observations. Par exemple, le VCN7, associé à la période de retour 10 ans, est très étudié dans la littérature américaine. En étiage, contrairement aux crues, les périodes de retour choisies sont relativement faibles, entre 2 et 10 ans. Le choix de la loi statistique a donc peu d'impacts sur le calcul des quantiles associés. La loi retenue pour le calcul des quantiles correspondant aux VCN et au QMNA est la loi log-normale (Vogel et Kroll, 1991 ; Meigh *et al.*, 2002) et ses paramètres sont estimés à l'aide de la méthode du maximum de vraisemblance (Catalogne, 2012). Pour certains bassins versants, le cours d'eau est entièrement sec sur plusieurs années et un modèle de probabilité conditionnelle est alors utilisé (Stedinger *et al.*, 1993). Nous nous intéressons aux périodes de retour de 2, 5 et 10 ans. Un exemple du calcul du QMNA(5) est donné par la Figure 2.8.

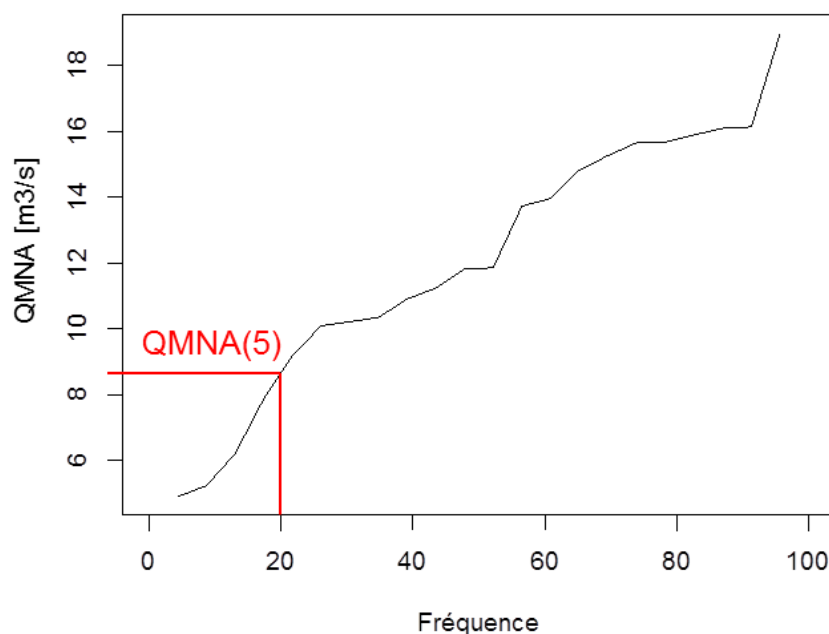


Figure 2.8 : Exemple de calcul du QMNA(5) sur la période de 1970 à 1991 sur le Loir à Durtal.

La Figure 2.9 illustre la répartition du QMNA(5) pour l'échantillon de référence. Nous observons une hétérogénéité de la répartition du QMNA(5) en France. Les bassins versants nivaux ont de fortes valeurs de QMNA(5) ($\text{QMNA}(5) > 5 \text{ l/s/km}^2$). De même, les bassins uniformes du Nord de la France ont des étiages soutenus et des fortes valeurs de QMNA(5). D'autres bassins ont des valeurs de QMNA(5) extrêmement faibles voir nulles. C'est le cas de rivières intermittentes, notamment en région méditerranéenne. Il est intéressant de remarquer que pour de nombreux bassins, nous n'observons pas une même répartition que pour le QA, ce qui indique l'importance des descripteurs non climatiques dans l'exploration de la variabilité spatiale du QMNA(5), contrairement au QA. Ainsi des bassins productifs peuvent avoir des faibles valeurs de QMNA(5) comme par exemple dans le Massif Central avec des bassins d'altitude modérée. A l'inverse, il existe des bassins peu productifs avec de fortes valeurs de QMNA(5) qui possèdent un soutien d'étiage, notamment par la nappe comme les bassins du Bassin Parisien. La même répartition a été observée pour les VCN3(5) et VCN10(5).

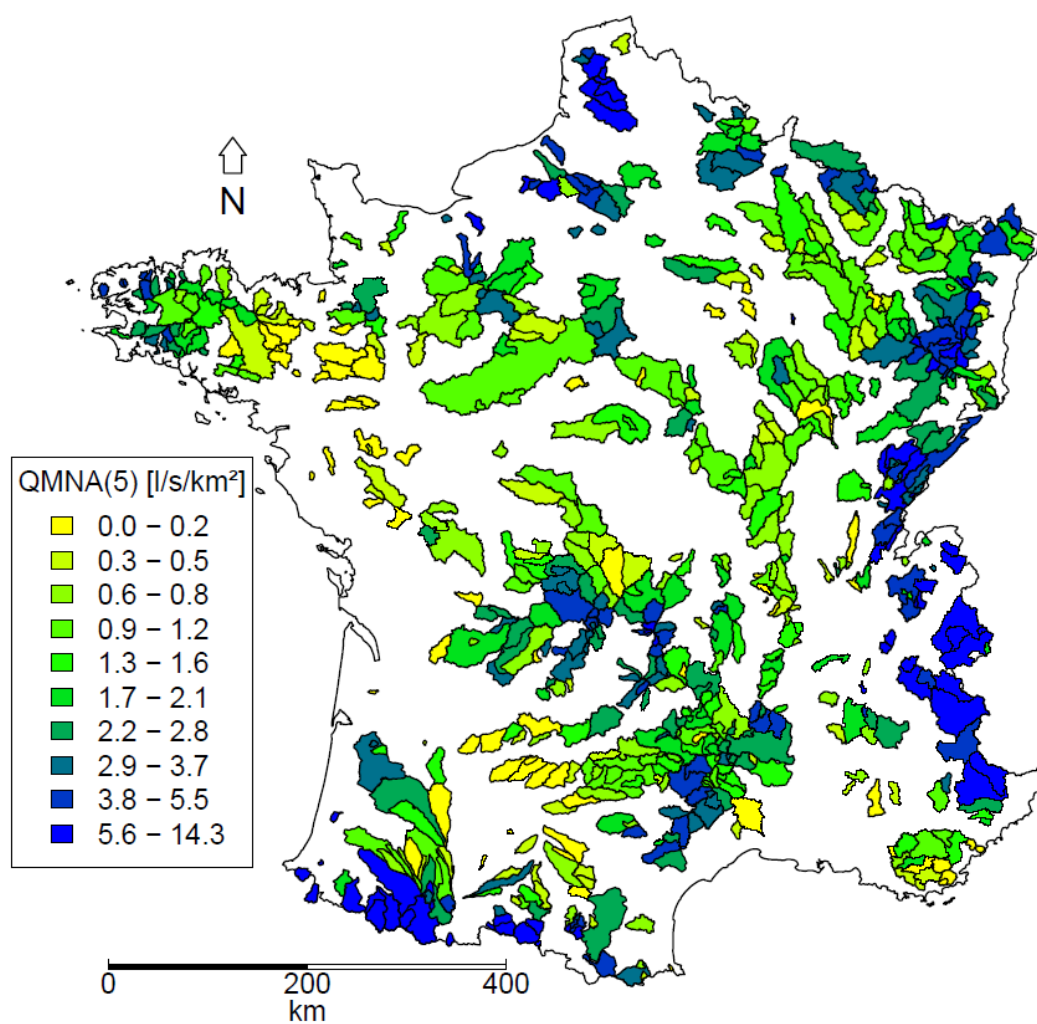


Figure 2.9 : Cartographie du QMNA(5) aux stations de l'échantillon de référence.

Débits caractéristiques issus de la courbe des débits classés

La courbe des débits classés (CDC) est une signature hydrologique importante. Elle permet de représenter sur un seul graphique l'ensemble des valeurs pouvant être prise par le débit à un exutoire, de la plus forte en crue à la plus faible en étiage. En outre, elle renseigne sur la fréquence de dépassement associée à chaque valeur de débit. Cette signature est donc très souvent utilisée dans le cadre de la gestion de la ressource en eau, notamment en ingénierie hydroélectrique.

Deux méthodes de construction des courbes de débits classés existent (se référer aux publications de Vogel et Fennessey (1994 ; 1995) pour plus de détails) : une fondée sur l'échantillon entier et une qui permet la construction de courbes annuelles de débits classés à partir desquelles des statistiques peuvent être estimées. La première méthode permet de calculer différentes caractéristiques d'étiage. Elle est plus sensible aux années sèches et humides (Hughes et Smakhtin, 1996) et pour cette raison sera utilisée par la suite. De la même manière que pour le calcul du QA, les années pour lesquelles le taux de lacune est supérieur à 10% sont écartées pour le calcul de la courbe des débits classées.

Différents débits caractéristiques d'étiage sont déduits de cette courbe.

- DCE : Débit Caractéristique d'Etiage. Il correspond au débit égal ou non dépassé 10 jours de l'année, soit environ le quantile 97%.
- Q95 : débit classé de quantile 95%, correspondant à un dépassement environ 347 jours par an.
- Q90 : débit classé de quantile 90%, correspondant à un dépassement environ 329 jours par an.
- Q80 : débit classé de quantile 80%, correspondant à un dépassement environ 292 jours par an.
- Q75 : débit classé de quantile 75%, correspondant à un dépassement environ 274 jours par an.
- Q50 : débit classé médian de quantile 50%, correspondant à un dépassement environ 183 jours par an. Il indique la séparation entre les conditions de basses eaux et de hautes eaux de l'écoulement du cours d'eau (Smakhtin, 2001).

La Figure 2.10 donne un exemple de la construction d'une courbe des débits classés et du calcul de deux quantiles associés, le Q95 et le Q75.

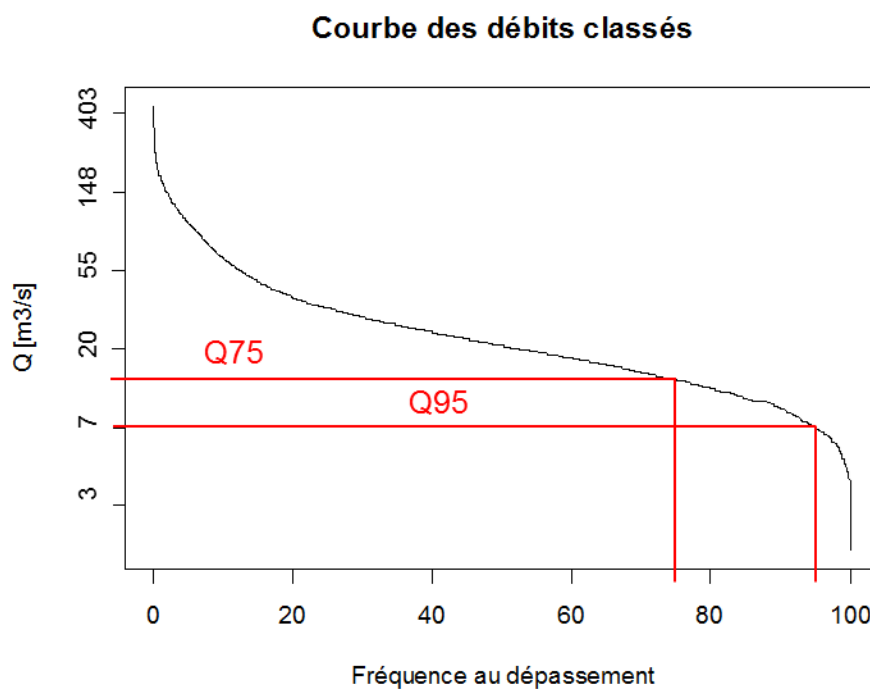


Figure 2.10 : Courbe des débits classés construite sur la période du 01/01/1970 au 31/12/1991 et calculs du Q95 et du Q75 associés sur le Loir à Durtal.

La Figure 2.11 illustre la répartition du Q75, indice d'étéage moins sévère mais qui permet de mettre en lumière les rivières intermittentes ou possédant des étéages très importants. Nous observons une répartition spatiale très similaire à celle obtenue pour le QMNA(5).

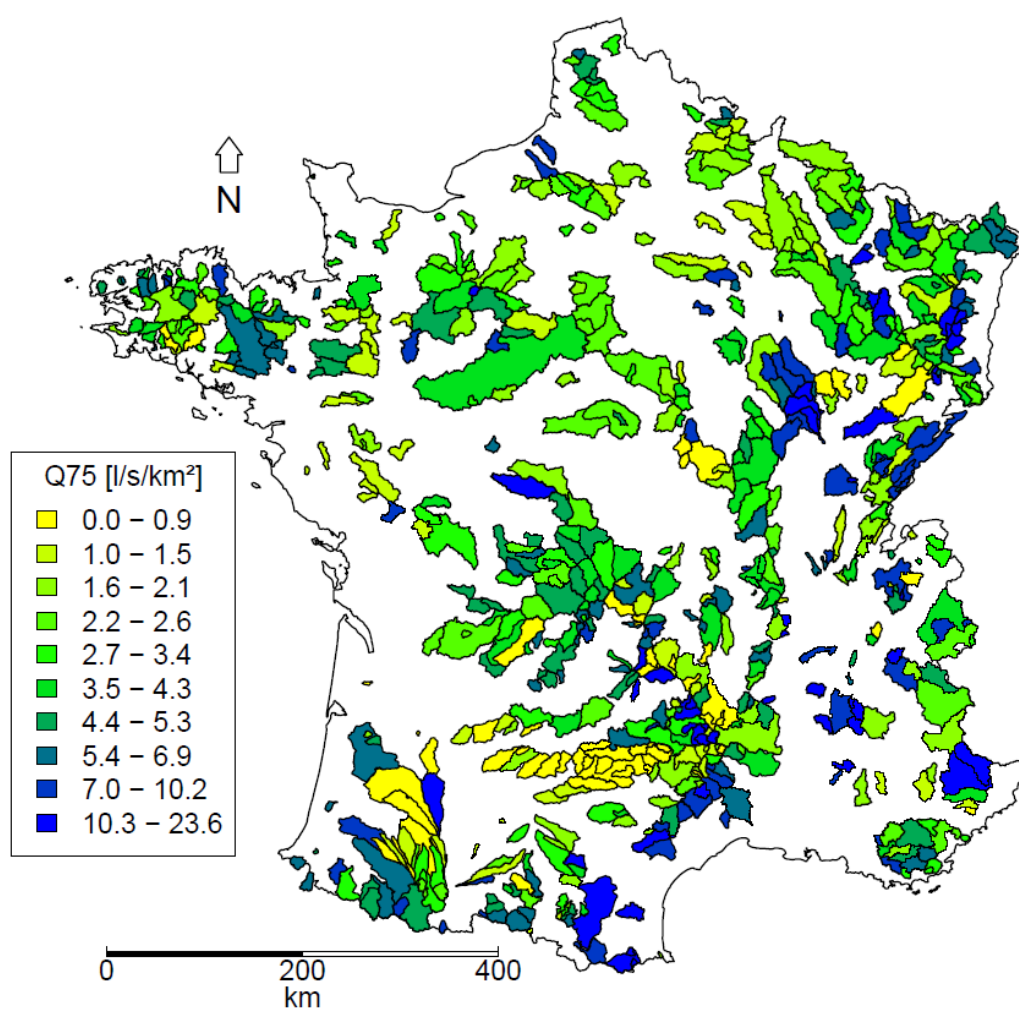


Figure 2.11 : Cartographie du Q75 aux stations de l'échantillon de référence.

2.3.3 Saisonnalité de l'étiage

Ratio Saisonnier

Un premier indicateur pour étudier la saisonnalité est le Ratio Saisonnier (SR) proposé par Laaha et Blöschl (2006b). Il est défini par le rapport entre le quantile 95 des débits classés moyens journaliers sur la période estivale (du 1er avril au 30 novembre) et le quantile 95 des débits classés moyens journaliers sur la période hivernale (du 1er décembre au 31 mars) :

$$SR = \frac{Q95_{été}}{Q95_{hiver}} \quad (2.1)$$

La Figure 2.12 montre la répartition spatiale de cet indicateur.

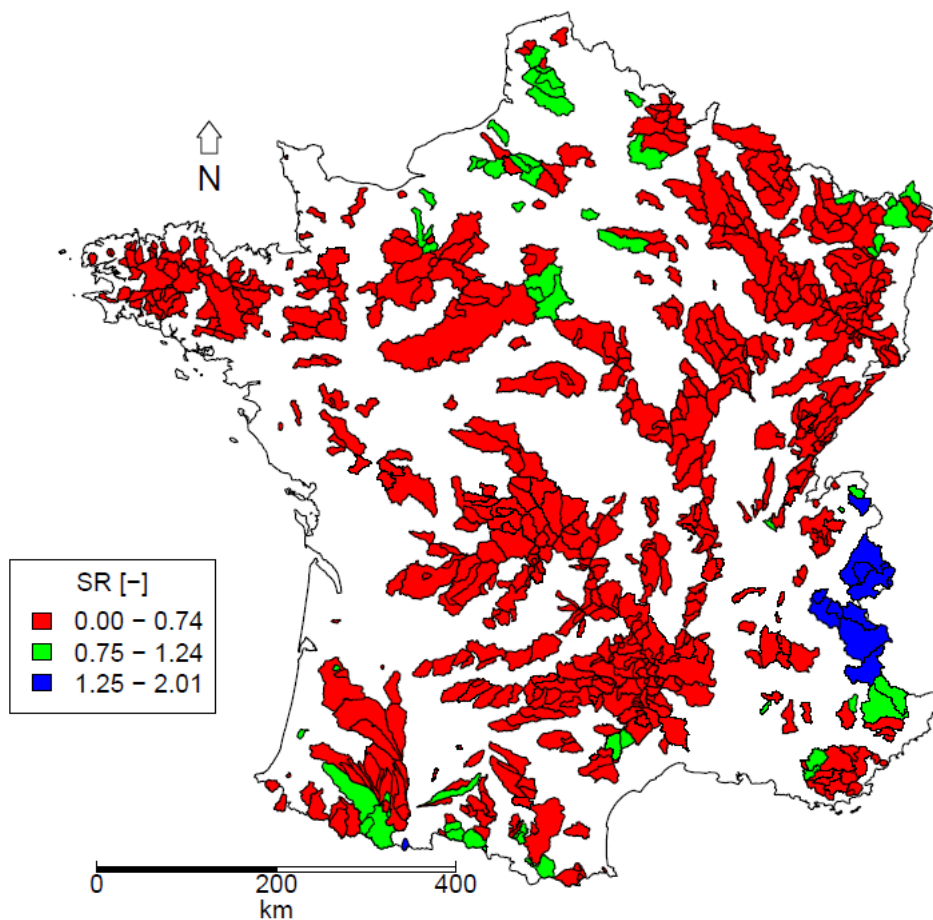


Figure 2.12 : Cartographie Ratio Saisonnier (SR) aux stations de l'échantillon de référence.

Un Ratio Saisonnier inférieur à 1 correspond à un étiage qui a lieu en période estivale, ce qui est majoritairement le cas pour l'échantillon de bassins. Les bassins nivaux ont un Ratio Saisonnier généralement supérieur à 1, ce qui correspond à un étiage principalement en période hivernale dû au stockage des précipitations sous forme de neige. Un groupe de bassins ressort avec un Ratio Saisonnier proche de 1. Ils sont situés surtout dans la région Seine Aval, un peu en Alsace, dans les Pyrénées et dans les Alpes. Ce sont donc des bassins qui ont des variations de débits peu marquées entre l'hiver et l'été, ou des bassins pluvio-nivaux dont les étiages sont importants en hiver et en été.

Mois de prédilection

Pour compléter cette étude de la saisonnalité des étiages, il convient de voir quel est le mois d'occurrence de l'étiage en fonction des bassins versants. La Figure 2.13 montre la répartition mensuelle des mois les plus secs par bassin en se basant sur le mois pendant lequel le QMNA(5) est majoritairement calculé.

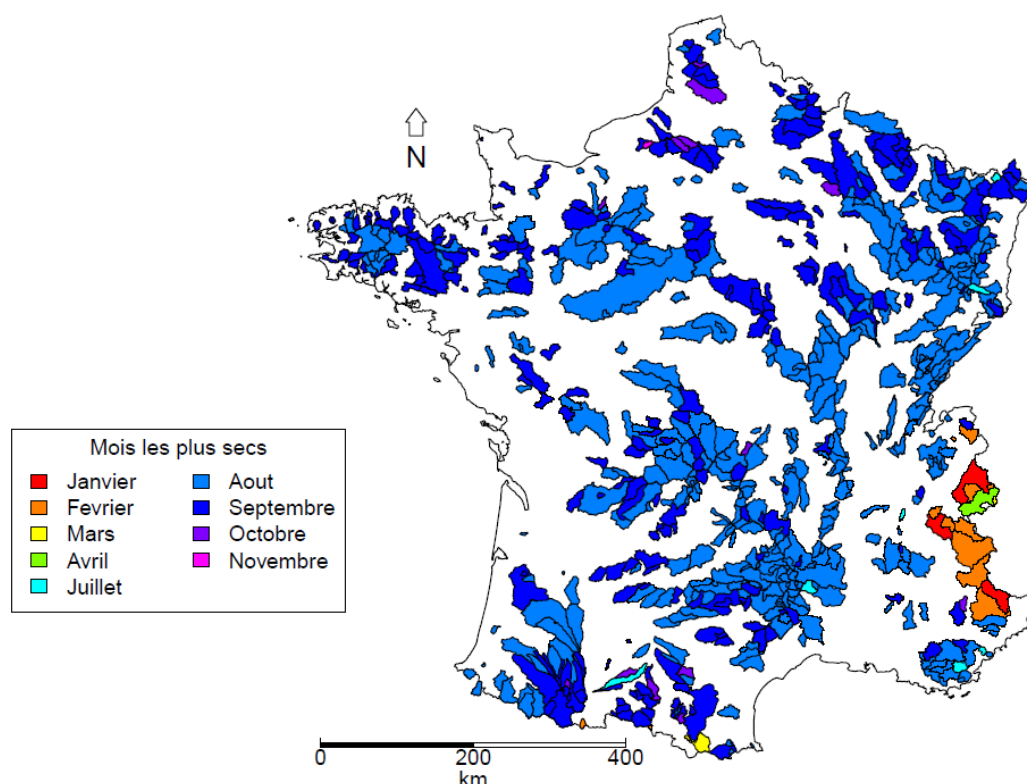


Figure 2.13 : Répartition mensuelle et spatiale des QMNA(5).

Nous observons de nouveau la répartition été/hiver entre les bassins. Le mois le plus sec est en février pour les bassins nivaux. Pour les autres, ce mois tombe majoritairement en août,

58% des bassins, puis en septembre, 36% des bassins et un peu en juillet, en grande partie pour les bassins méditerranéens.

Variabilité temporelle de l'étiage

Nous nous intéressons maintenant à la variabilité annuelle de l'étiage. La Figure 2.14 illustre la répartition des QMNA sur l'ensemble des bassins par année sur la période de 1970 à 2013.

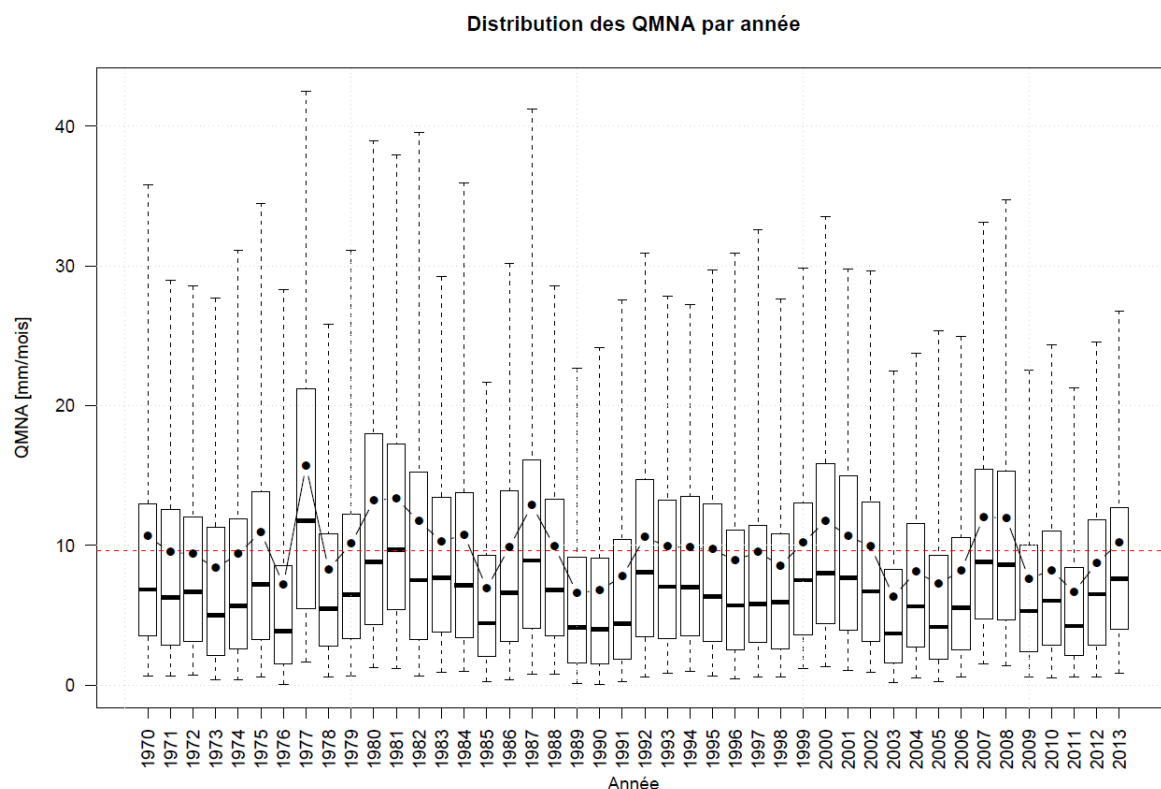


Figure 2.14 : Répartition annuelle des QMNA. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 des distributions, du bas vers le haut. Les points correspondent à la moyenne de chaque distribution. La ligne rouge en pointillée correspond à la moyenne interannuelle.

Nous remarquons que la distribution des QMNA est assez variable suivant les années. Nous retrouvons les grandes années humides 1977, 1992 ou 2007 et 2008 ainsi que les grandes années sèches 1976, 1989, 1990, 1991 et 2003. Nous observons une tendance dans le sens où la première sous-période, de 1970 à 1991, semble plus humide que la seconde, de 1992 à 2013.

2.3.4 Inertie de l'étiage

Ratio Q_{90}/Q_{50}

L'inertie de l'étiage est évaluée à l'aide du Q_b , indice défini par Nathan et McMahon (1990). Celui-ci correspond au ratio des quantiles 90 et 50 des débits classés :

$$Q_b = \frac{Q_{90}}{Q_{50}} \quad (2.2)$$

La Figure 2.15 illustre la répartition spatiale de ce ratio.

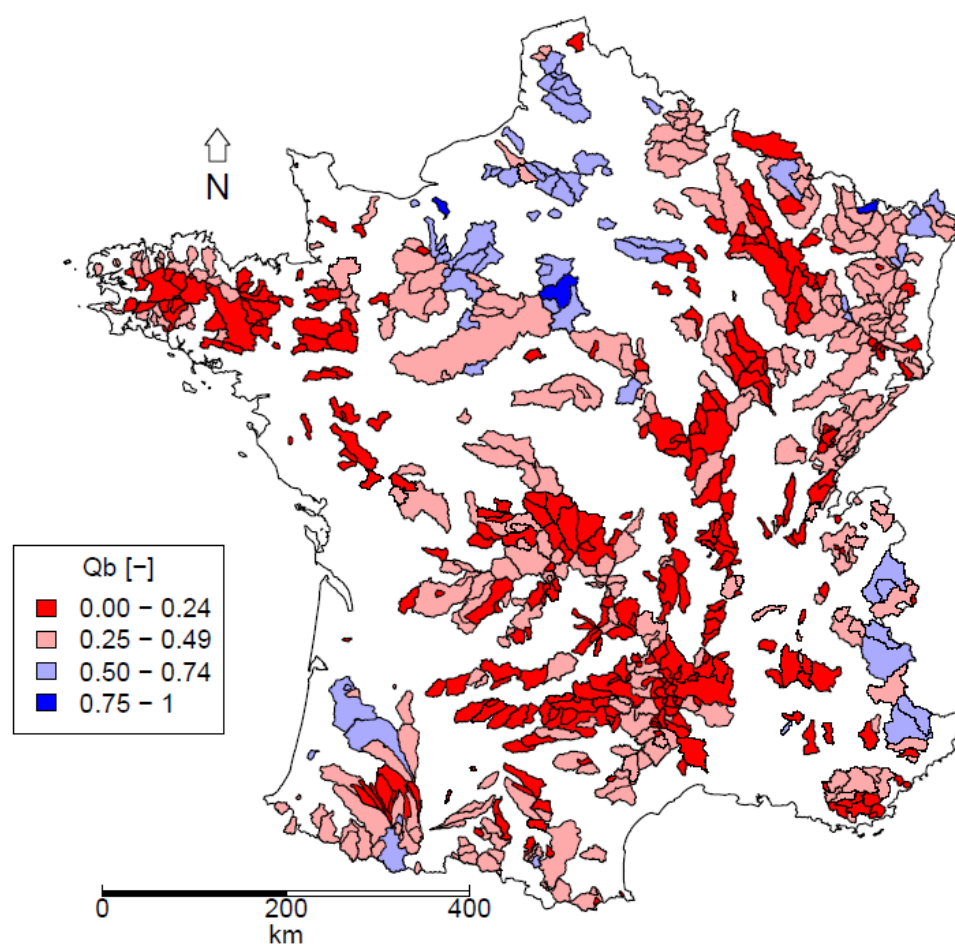


Figure 2.15 : Répartition spatiale du Q_b .

Cet indicateur permet d'évaluer la dynamique de l'écoulement souterrain sur les bassins et notamment si cette dynamique joue un rôle de soutien lors des périodes d'étiage. Nous remarquons que pour la plupart des bassins, notamment en Alsace, en région méditerranéenne

et en région Centre, l'étiage est très important alors que pour les bassins situés en Seine-Amont, les bassins nivaux alpins, quelques bassins pyrénéens ainsi que quelques bassins alsaciens, l'étiage est soutenu.

Base-Flow Index

L'écoulement dans les cours d'eau peut être divisé en deux grandes composantes : un écoulement rapide et un écoulement de base. Cette seconde composante est majoritaire lors des périodes d'étiage et permet d'évaluer la capacité de stockage d'un bassin versant. Les indices qui renseignent sur l'écoulement de base sont très corrélés à la géologie et à des descripteurs relatifs à la capacité de stockage d'un bassin versant, comme le pourcentage de lac, le type d'aquifère ou le stockage sous forme des précipitations sous forme de neige ou de glace. L'un des indices le plus répandu pour décrire cet écoulement de base est le « Base-Flow Index » (BFI). Il a été initialement développé au Royaume-Uni (Gustard, 1983) pour classifier les sols en fonction de leur réponse hydrologique dans des études sur les étiages mais aussi sur les crues. De nombreuses méthodes existent pour calculer la séparation entre l'écoulement rapide et l'écoulement de base (Nathan et McMahon, 1990 ; Piggott *et al.*, 2005 ; Schwartz, 2007 ; Longobardi et Villani, 2008). Le BFI a été calculé ici à l'aide de la méthode dite « smoothed minima technique » (WMO, 2008) qui est proposés dans le package *lfstat*⁹ développé sous R par Daniel Koffler, Tobias Gauster et Gregor Laaha.

⁹ <https://cran.r-project.org/package=lfstat>

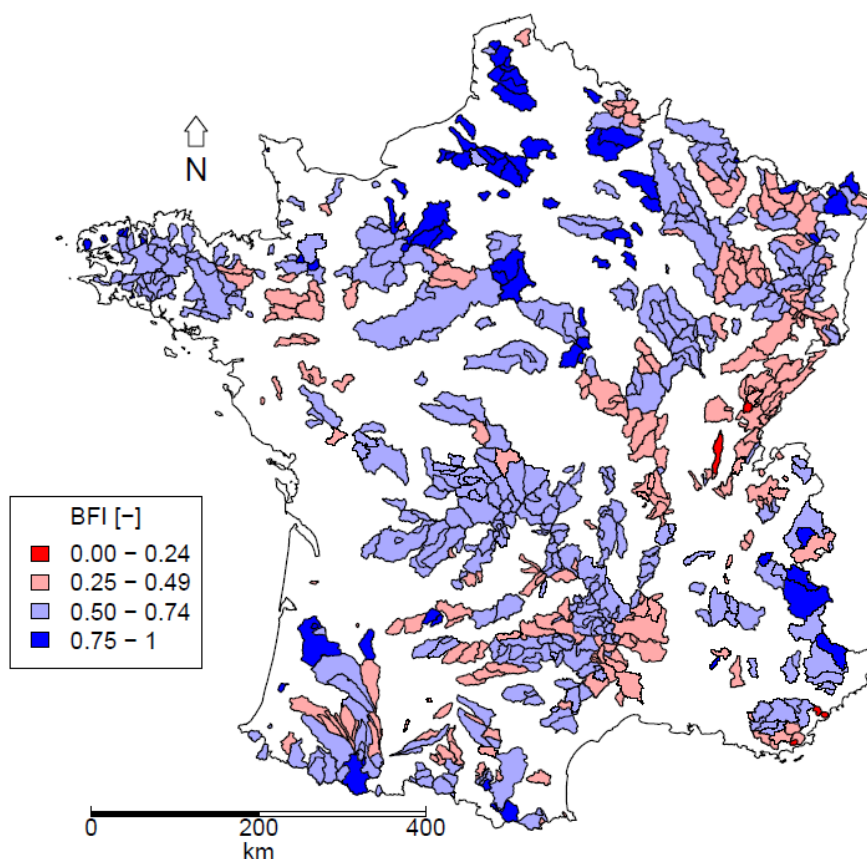


Figure 2.16 : Répartition spatiale du BFI.

La Figure 2.16 illustre la répartition du BFI en France. Cette répartition ressemble fortement à celle du Q_b . Nous remarquons que la majorité des bassins ont des valeurs de BFI entre 0,50 et 0,74. Nous distinguons des bassins avec de fortes valeurs de BFI ($BFI > 0,80$). Ils correspondent à des bassins dont l'écoulement est fortement soutenu par la nappe, c'est-à-dire les bassins uniformes présents notamment dans le Bassin Parisien. Quelques bassins ont des valeurs de BFI faibles ($BFI < 0,2$) et coïncident aux bassins situés en milieu karstique.

2.4 Liens entre les différents indices d'étiage

Les différents indices d'étiage et de bilan exposés dans ce chapitre sont résumés dans le Tableau 2.3 :

Tableau 2.3 : Résumé des indices d'étiage et de bilan présentés dans cette étude.

Catégorie	Indice	Notation
Bilan	Module interannuel	QA
Sévérité	Volume Consécutif Minimal pour 3 jours de période de retour 2 ans	VCN3(2)
	Volume Consécutif Minimal pour 3 jours de période de retour 5 ans	VCN3(5)
	Volume Consécutif Minimal pour 3 jours de période de retour 10 ans	VCN3(10)
	Volume Consécutif Minimal pour 10 jours de période de retour 2 ans	VCN10(2)
	Volume Consécutif Minimal pour 10 jours de période de retour 5 ans	VCN10(5)
	Volume Consécutif Minimal pour 10 jours de période de retour 10 ans	VCN10(10)
	Volume Consécutif Minimal pour 30 jours de période de retour 2 ans	VCN30(2)
	Volume Consécutif Minimal pour 30 jours de période de retour 5 ans	VCN30(5)
	Volume Consécutif Minimal pour 30 jours de période de retour 10 ans	VCN30(10)
	Débit Mensuel Minimal Annuel de période de retour 2 ans	QMNA(2)
	Débit Mensuel Minimal Annuel de période de retour 5 ans	QMNA(5)
	Débit Mensuel Minimal Annuel de période de retour 10 ans	QMNA(10)
	Quantile de fréquence au dépassement 97 issu de la CDC	Q97
	Quantile de fréquence au dépassement 95 issu de la CDC	Q95
	Quantile de fréquence au dépassement 90 issu de la CDC	Q90
	Quantile de fréquence au dépassement 85 issu de la CDC	Q80
	Quantile de fréquence au dépassement 75 issu de la CDC	Q75
	Quantile de fréquence au dépassement 50 issu de la CDC	Q50
Saisonnalité	Ratio Saisonnier	SR
Inertie	Ratio Q90/Q50	Q _b
	Base-Flow Index	BFI

Nous cherchons maintenant à déterminer l'existence de corrélations entre les indices afin de diminuer la redondance de l'information contenue dans chacun de ces indices. Dans un premier temps, la corrélation linéaire a été analysée à l'aide du coefficient de corrélation de Pearson (voir matrice de corrélation au Tableau 2.4). Nous remarquons que tous les indices relatifs à la sévérité de l'étiage sont fortement liés entre eux avec des coefficients de corrélation de Pearson entre 0,71 et 1. Par construction, il était attendu que les VCN avec leur période de retour et les QMNA avec leur période de retour soient liés entre eux, de même pour les quantiles issus de la courbe des débits classés. Il est à noter que le Q50, indice représentant la séparation entre hautes et basses eaux, est peu liés aux indicateurs d'étiage sévère (VCN et QMNA de période de retour 5 et 10 ans) mais est lié au QA. Aucune

corrélation n'est sinon observée entre les catégories à savoir entre les indices représentant la sévérité, ceux représentant l'inertie et celui représentant la saisonnalité de l'étiage. L'analyse sur la corrélation non linéaire, corrélation d'ordre et corrélation de Spearman, entre ces indices n'a rien apporté à ces travaux de recherche et n'est pas présentée ici.

Pour la suite, nous choisissons de garder l'indice représentant le bilan (QA), les indices VCN3(5), VCN10(5) et QMNA(5) ainsi que les indices Q95 et Q75. Le choix s'est basé sur les indices les plus couramment utilisés. Pour rappel, le QA et le QMNA(5) sont les indices utilisés pour la gestion réglementaire de la ressource en eau en France. Les VCN3(5) et VCN10(5), indices calculés sur des intervalles de temps plus fins, sont aussi utiles pour la gestion de la ressource. Le quantile Q95 est un indicateur d'étiage très utilisé dans la littérature, notamment en Italie (Vezza *et al.*, 2010), en Autriche (Laaha et Blöschl, 2005 ; 2006b ; 2007), en Suisse (Aschwenden et Kan, 1999), au Royaume-Uni (Holmes *et al.*, 2002) ou encore au Népal (Chalise *et al.*, 2003). Le Q75 est souvent employé notamment en milieu semi-aride, pour des rivières intermittentes.

Même si ces indices peuvent être déduits les uns des autres, il sera intéressant d'analyser la capacité des différents modèles à pouvoir les simuler.

Tableau 2.4 : Matrice de corrélation de Pearson entre les différents indices étudiés.

	QA	VCN3 (2)	VCN3 (5)	VCN3 (10)	VCN10 (2)	VCN10 (5)	VCN10 (10)	VCN30 (2)	VCN30 (5)	VCN30 (10)	QMNA (2)	QMNA (5)	QMNA (10)	Q97	Q95	Q90	Q80	Q75	Q50	SR	Qb	BFI
QA	1,00																					
VCN3(2)	0,63	1,00																				
VCN3(5)	0,59	0,99	1,00																			
VCN3(10)	0,57	0,99	1,00	1,00																		
VCN10(2)	0,66	0,99	0,98	0,97	1,00																	
VCN10(5)	0,62	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00																
VCN10(10)	0,59	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00															
VCN30(2)	0,71	0,98	0,95	0,94	0,99	0,98	0,96	1,00														
VCN30(5)	0,66	0,98	0,97	0,97	1,00	0,99	0,99	0,99	1,00													
VCN30(10)	0,64	0,98	0,98	0,97	0,99	1,00	0,99	0,99	1,00	1,00												
QMNA(2)	0,76	0,96	0,93	0,91	0,97	0,95	0,94	0,99	0,98	0,97	1,00											
QMNA(5)	0,70	0,97	0,96	0,95	0,99	0,98	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00										
QMNA(10)	0,67	0,98	0,97	0,96	0,99	0,99	0,98	0,99	1,00	0,99	0,98	1,00	1,00									
Q97	0,66	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,97	0,98	0,99	1,00								
Q95	0,69	0,99	0,98	0,97	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00							
Q90	0,74	0,97	0,95	0,94	0,99	0,97	0,96	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,98	0,98	0,99	1,00						
Q80	0,81	0,93	0,90	0,88	0,95	0,93	0,91	0,98	0,96	0,94	0,99	0,97	0,95	0,95	0,96	0,99	1,00					
Q75	0,85	0,91	0,87	0,85	0,93	0,90	0,88	0,96	0,93	0,92	0,98	0,95	0,93	0,92	0,94	0,97	1,00	1,00				
Q50	0,94	0,78	0,73	0,71	0,80	0,76	0,74	0,85	0,81	0,78	0,88	0,84	0,81	0,80	0,83	0,87	0,93	0,95	1,00			
SR	0,27	0,69	0,70	0,70	0,69	0,70	0,71	0,67	0,69	0,70	0,63	0,67	0,68	0,69	0,67	0,64	0,57	0,53	0,36	1,00		
Qb	0,01	0,62	0,63	0,63	0,60	0,62	0,62	0,55	0,58	0,59	0,50	0,55	0,57	0,59	0,56	0,52	0,43	0,38	0,16	0,75	1,00	
BFI	-0,11	0,45	0,45	0,45	0,43	0,43	0,44	0,37	0,39	0,41	0,32	0,36	0,38	0,40	0,39	0,35	0,28	0,25	0,11	0,46	0,64	1,00

2.5 Illustrations sur quatre bassins versants

Par la suite, étant donné la taille de l'échantillon de bassins versants, les résultats ne pourront pas être exposés bassin par bassin mais sur l'échantillon entier. Nous nous attacherons seulement à quatre bassins qui serviront de fil rouge pour tous les travaux. Ce choix s'est porté sur des bassins qui illustrent la diversité des régimes mis en évidence (nival, uniforme, pluvial et méditerranéen) et la diversité de l'échantillon sur différentes caractéristiques de bassins versants et de débits (indice d'aridité, surface, ...).

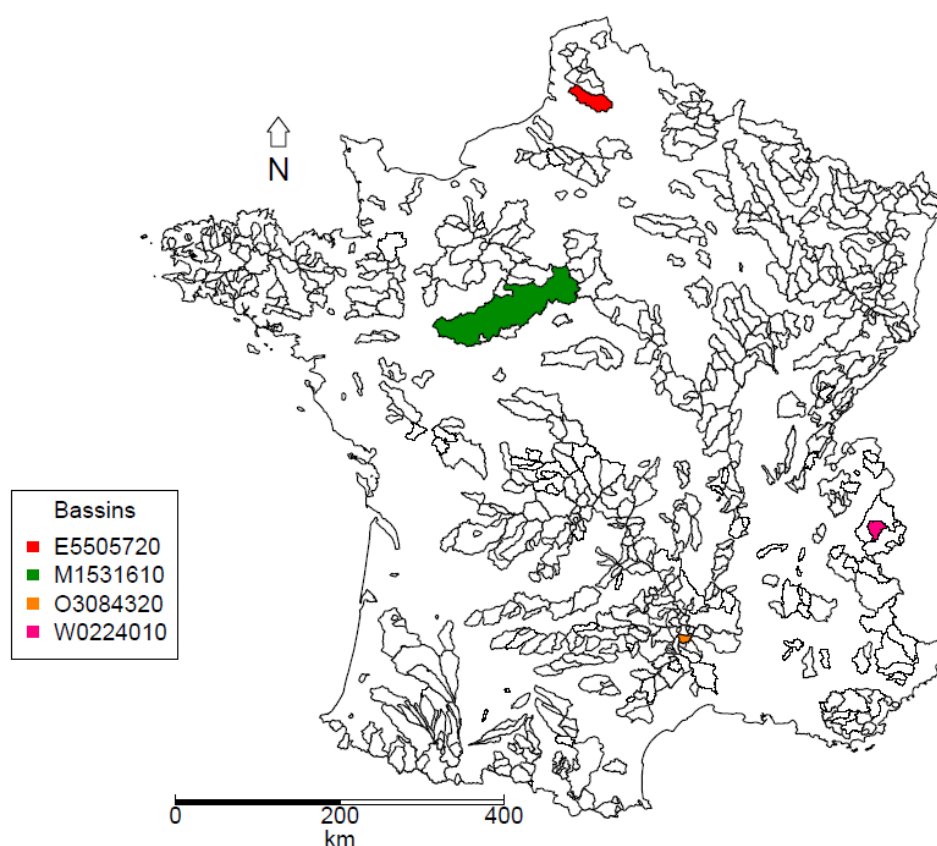


Figure 2.17 : Localisation des quatre bassins versants choisis pour illustrer l'échantillon de référence.

Les quatre bassins versants sont localisés sur la Figure 2.17 et leurs caractéristiques sont regroupées dans le Tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Caractéristiques de quatre bassins versants illustrant l'échantillon de référence.

Code	E5505720	M1531610	O3084320	W0224010
Cours d'eau	L'Authie	Le Loir	La Mimente	Le Doron de Bozel
Exutoire	Dompierre-sur-Authie	Durtal	Florac	La Perrière
Régime hydrographique	Uniforme	Pluvial E	Méditerranéen	Nivo-Glacial
Surface (km ²)	797	7 935	128	334
Altitude moyenne (m NGF)	115	131	938	2 195
Précipitations moyennes annuelles (mm/an)	869	677	1 557	1 278
ETP moyenne annuelle (mm/an)	624	692	638	364
Index d'Aridité (ETP/P) (%)	72	102	41	28
QA (mm/an)	338	126	821	1 244
Q95 (mm/j)	0,53	0,08	0,12	1,20
Q75 (mm/j)	0,70	0,15	0,35	1,57
VCN3(5) (mm/j)	0,53	0,06	0,08	1,10
VCN10(5) (mm/j)	0,54	0,06	0,09	1,13
QMNA(5) (mm/mois)	17,71	2,43	3,60	35,70
SR (-)	0,90	0,43	0,26	1,46
Mois le plus sec	Octobre	Août	Août	Février
Q _b (-)	0,70	0,45	0,16	0,55
BFI (-)	0,97	0,68	0,43	0,85

2.6 Synthèse du chapitre

L'analyse des indices d'étiage relatifs à la sévérité, la saisonnalité et l'inertie de l'étiage, ainsi qu'un indice représentant le bilan hydrologique d'un bassin ont permis d'analyser la diversité des processus liés à l'étiage en France et les liens entre les différents indices d'étiage. Cette première analyse a conduit à mettre en lumière trois grandes catégories de bassins versants. La première comprend les bassins montagneux et influencés par la neige avec des étiages qui sont hivernaux et assez soutenus. La seconde porte sur les bassins uniformes qui sont plutôt situés dans le Bassin Parisien et ne possèdent pas de saisonnalité marquée. Les débits d'étiage y sont très soutenus par la nappe (valeurs de BFI élevées) et sont peu productifs (valeurs de QA faibles). La dernière catégorie regroupe tous les bassins dont le régime est majoritairement influencé par la pluie. Cette catégorie est très hétérogène avec des bassins plus ou moins productifs, des étiages plus ou moins sévères (régions bretonnes et méditerranéennes comparées aux régions d'altitude modérée) et des étiages majoritairement estivaux. Ces différents regroupements apporteront une aide à l'analyse des différentes méthodes développées par la suite et seront exploités en particulier dans les chapitres 5 et 6.

3 Which objective function to calibrate rainfall–runoff models for low–flow index simulations?

Ce chapitre correspond à un article soumis à la revue Hydrological Sciences Journal.

Which objective function to calibrate rainfall–runoff models for low–flow index simulations?

Florine Garcia¹, Nathalie Folton¹, Ludovic Oudin²

(1) RH Research Unit, Irstea, Aix-en-Provence, France

(2) UMR 7619 METIS, Sorbonne Université, UPMC Université Paris 6, Paris, France

Introduction du chapitre et compléments à l'article

La plupart des modèles pluie-débit sont des modèles numériques qui dépendent de paramètres que l'utilisateur ne peut mesurer. Ces paramètres ont alors besoin d'être calés. La fonction objectif utilisée pour le calage et donc les valeurs des paramètres calés vont dépendre de l'objectif de simulation. Dans cette première partie, nous nous sommes proposés de définir une fonction objectif adaptée à la simulation de différents indices d'étiage. Cette étape a été réalisée préalablement au développement du modèle pluie-débit pour la simulation de ces indices d'étiage. Un modèle pluie-débit de référence, GR4J (Perrin, 2000 ; Perrin *et al.*, 2003), a donc été choisi pour mener ces premiers travaux. Nous aurions pu choisir le modèle GR6J (Pushpalatha *et al.*, 2011 ; Pushpalatha, 2013) qui a été développé pour une meilleure simulation des étiages. Cependant, GR4J a été préféré pour son nombre faible de paramètres libres (quatre), contrainte que nous nous sommes imposée pendant ces travaux de thèse. Le modèle GR4J est présenté au paragraphe 3.2.2 et une description plus détaillée du modèle est disponible à l'Annexe 2.1.

Différents critères d'évaluation ont été définis pour évaluer et comparer les débits simulés à l'aide des paramètres calés par les différentes fonctions objectif. Ces mêmes critères ont été utilisés pour analyser les résultats des chapitres 4, 5 et 6 et sont expliqués ci-dessous.

L'objectif de ces travaux est l'estimation de différents indices d'étiage. Nous avons choisi d'évaluer la simulation de six indices d'étiage qui ont été présentés dans le chapitre 2 : le VCN3(5), le VCN10(5) qui sont respectivement notés MAM3(5) et MAM10(5) en anglais dans ce chapitre, le QMNA(5), le Q95, le Q75 et le QA qui est noté MAR en anglais dans ce

chapitre. Pour chacun de ces indices et pour une simulation par une fonction objectif ou un modèle pluie-débit, nous obtenons 691 valeurs observées et 691 valeurs simulées, i.e. une valeur observée et une valeur simulée par bassin. Nous pouvons calculer entre ces valeurs observées et simulées un critère d'erreur appelé Spatial Error Index (SIE) qui est présenté plus en détails dans le paragraphe 3.2.3.2. Ce critère peut prendre des valeurs entre $-\infty$ et 1, 1 étant la valeur optimale. La Figure 3.1 présente un exemple fictif de bonne simulation et de mauvaise simulation d'un indice d'étiage avec une valeur de SIE associée.

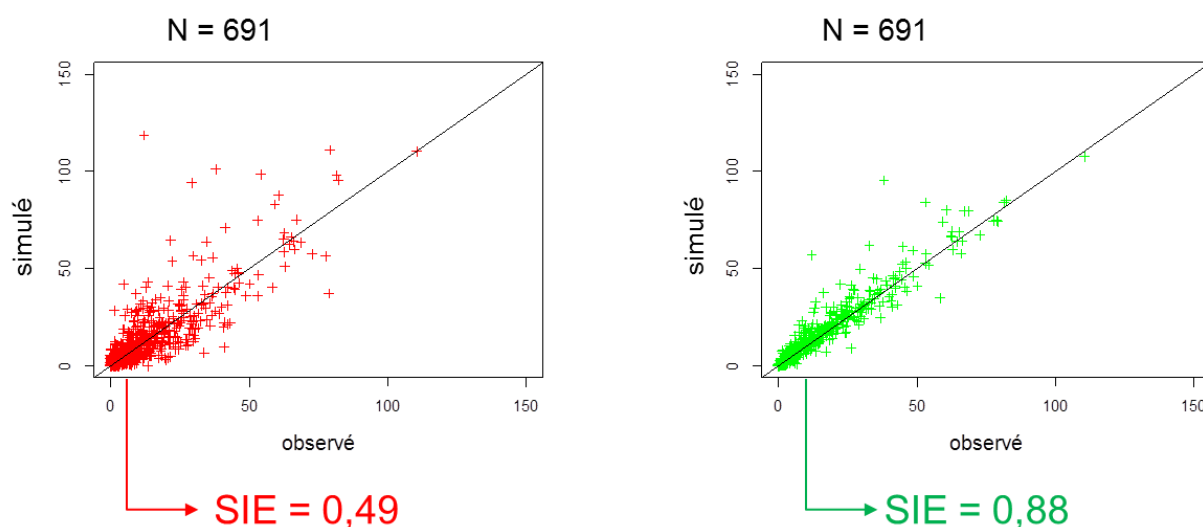


Figure 3.1 : Exemple d'évaluation d'une bonne simulation et d'une mauvaise simulation d'un indice d'étiage.

A l'évaluation de ces indices d'étiage, nous avons choisi d'ajouter celle d'une autre signature hydrologique, la saisonnalité, notée QMM, dont l'estimation est aussi importante pour une bonne gestion de la ressource en eau. La saisonnalité correspond aux 12 débits moyens mensuels : le débit moyen de janvier, le débit moyen de février jusqu'au débit moyen de décembre (Figure 3.2).

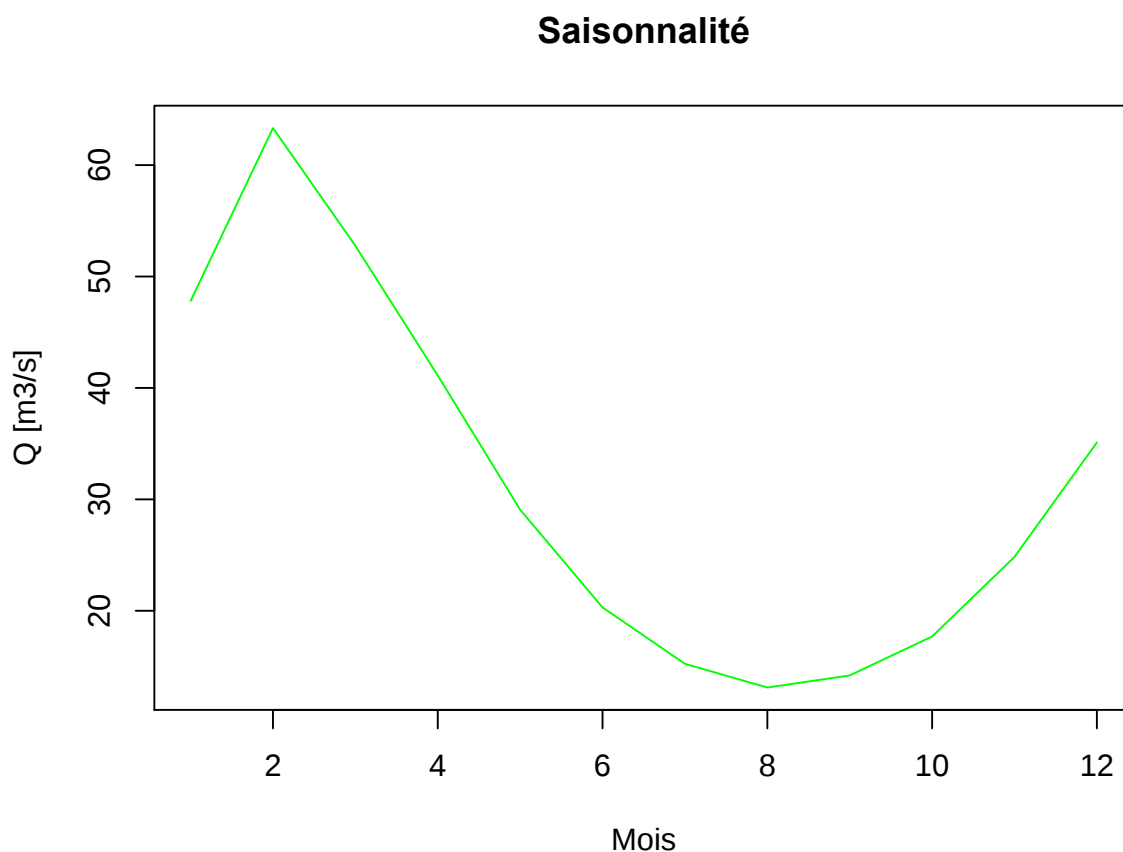


Figure 3.2 : Illustration de la saisonnalité sur la période du 01/01/1970 au 31/12/2013 sur le Loir à Durtal.

Pour chaque simulation, nous calculons 12 débits moyens mensuels observés et 12 débits moyens mensuels simulés pour chaque bassin versant. Nous pouvons alors calculer un critère d'erreur par bassin, le critère de Nash-Sutcliffe (NSE) qui est détaillé dans le paragraphe 3.2.3.2. Ce critère peut prendre des valeurs entre $-\infty$ et 1, 1 étant la valeur optimale. Nous pouvons ensuite calculer la valeur médiane de la distribution des 691 valeurs de NSE. La Figure 3.3 donne un exemple fictif d'une bonne simulation et d'une mauvaise simulation de la saisonnalité, d'une part pour un seul bassin versant ($i = 1$) et d'autre part pour l'échantillon complet de bassin versant (M , valeur médiane de la distribution).

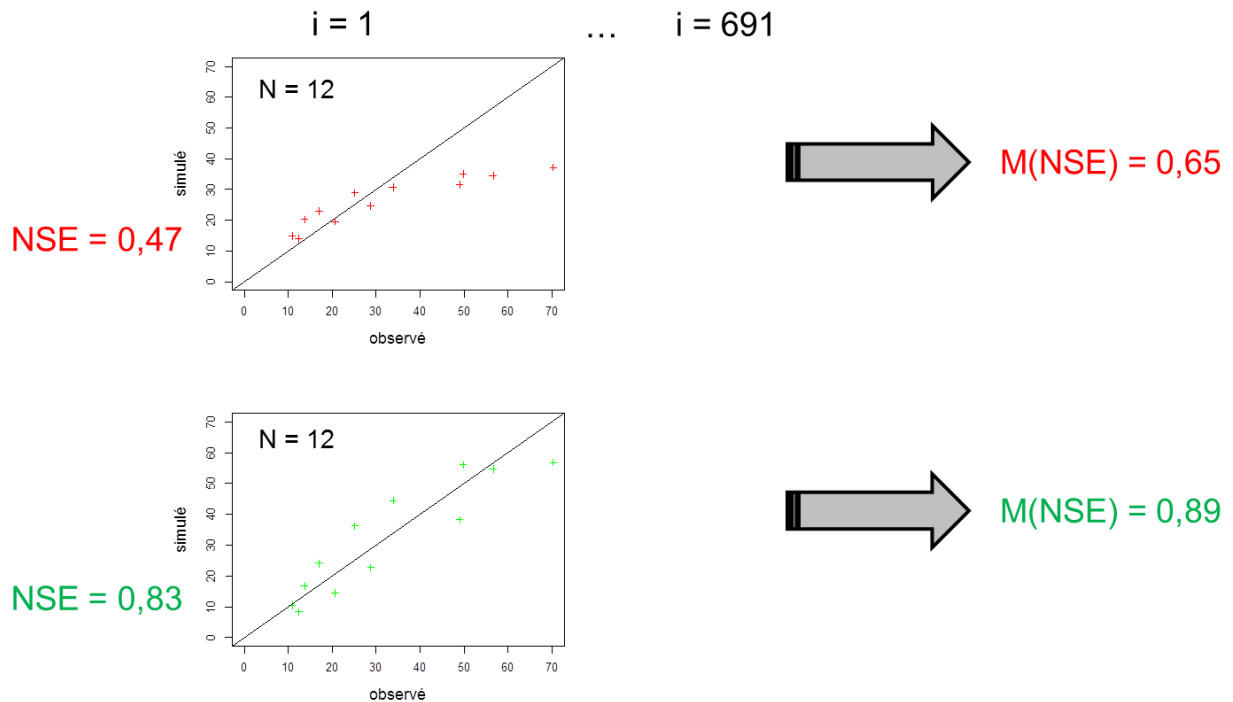


Figure 3.3 : Exemple d'évaluation d'une bonne simulation et d'une mauvaise simulation de la saisonnalité.

Aux objectifs de bonnes simulations des indices d'étiage et de la saisonnalité, nous ajoutons trois critères pour évaluer la chronique de débit : (i) un critère sur la chronique de débits sans transformation, notée Q , pour évaluer la simulation des hautes eaux, (ii) un critère sur la chronique de la racine-carrée des débits, notée $\sqrt{Q}$, pour évaluer la simulation des eaux intermédiaires et (iii) un critère sur la chronique de l'inverse des débits, notée $1/Q$, pour évaluer la simulation des faibles débits. Pour chacun de ces critères d'évaluation et pour chaque simulation, nous disposons de 22 x 365 débits journaliers observés et 22 x 365 débits journaliers simulés pour chaque bassin versant. Nous pouvons alors calculer un critère d'erreur par bassin, le critère de Nash-Sutcliffe borné, noté NSE^* en anglais dans ce chapitre et C2M en français dans les chapitres 4 à 6. Ce critère est détaillé dans le paragraphe 3.2.3.2 et peut prendre des valeurs entre $-\infty$ et 1, 1 étant la valeur optimale. Nous pouvons alors calculer la valeur médiane de la distribution des 691 valeurs de NSE^* . La Figure 3.4 donne un exemple fictif d'une bonne simulation et d'une mauvaise simulation de cette dernière catégorie de critère d'évaluation, d'une part pour un seul bassin versant ($i = 1$) et d'autre part pour l'échantillon complet de bassin versant (M , valeur médiane de la distribution).

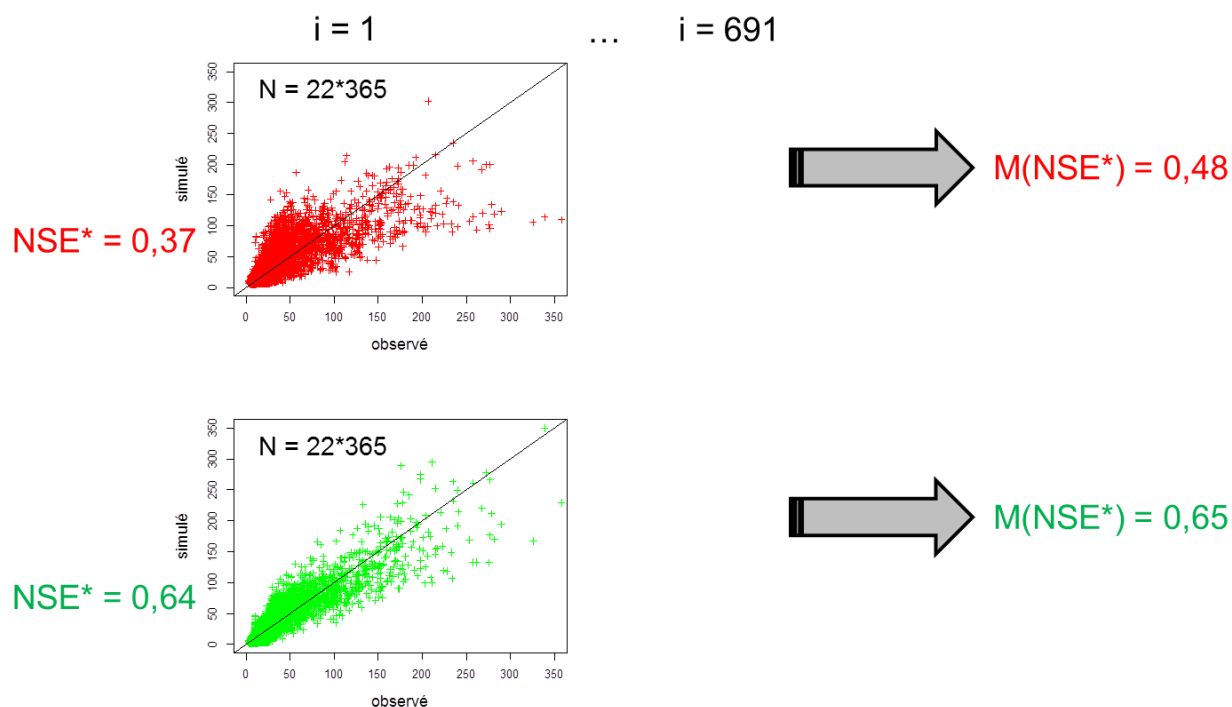


Figure 3.4 : Exemple d'évaluation d'une bonne simulation et d'une mauvaise simulation de la chronique de débits.

Nous calculons ainsi dix critères d'évaluation, avec leur critère d'erreur respectif par simulation. Pour analyser les résultats pour une simulation, par exemple pour une fonction objectif, et pour comparer les simulations entre elles, obtenues par exemple à l'aide de différentes fonctions objectif, les résultats sont présentés sous la forme d'un radial plot. La Figure 3.5 donne un exemple fictif de ce type de graphique. Dans cet exemple, la simulation en vert est qualifiée de bonne avec tous les critères d'évaluation proches de 1 alors que la simulation en rouge est qualifiée de mauvaise. Nous pourrions ici conclure que la simulation verte est meilleure que la rouge et permet de bien simuler tous les critères d'évaluation souhaités.

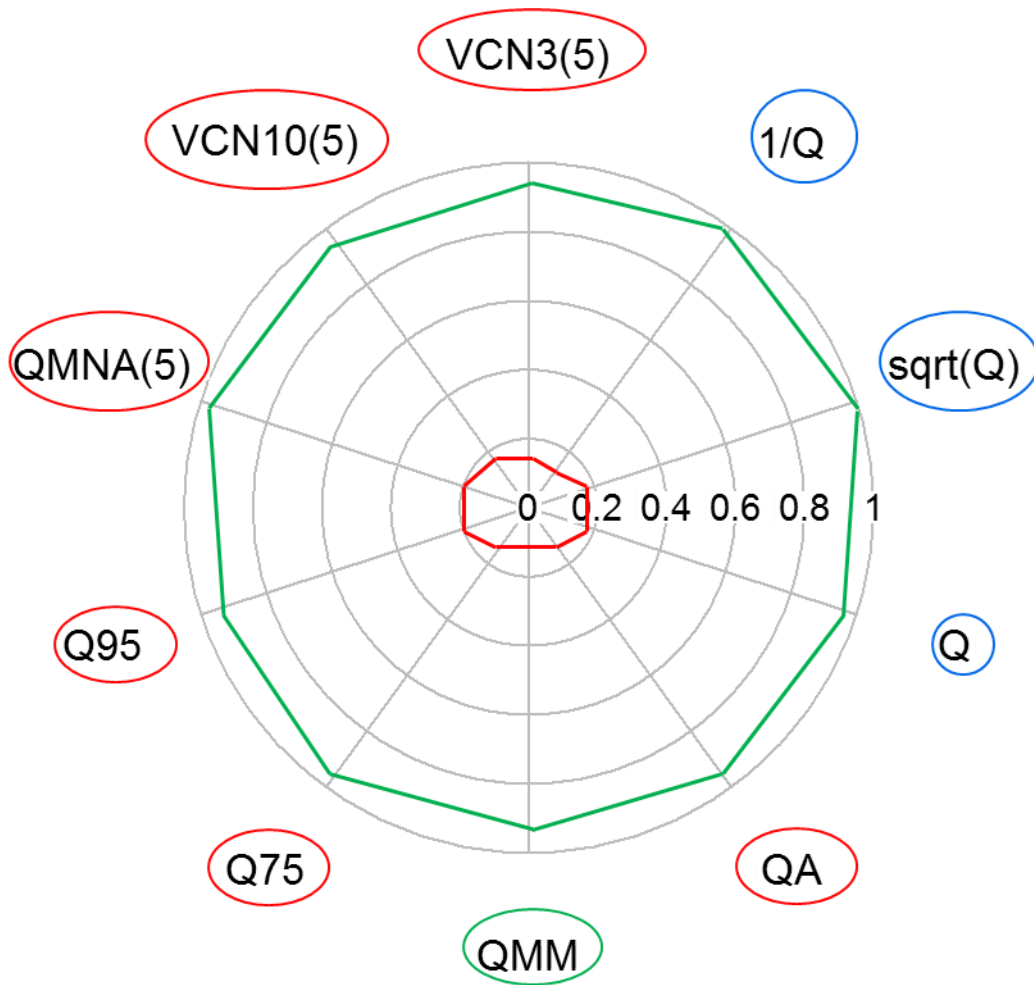


Figure 3.5 : Exemple de représentation des résultats pour analyser les simulations des dix critères d'évaluation. Les critères entourés en rouge représentent les six indices d'étiage, le critère entouré en vert représente la saisonnalité et les critères entourés en bleu représentent la chronique de débits avec différentes transformation.

Résumé

De nombreuses études se sont intéressées aux fonctions objectif pour caler des modèles pluie-débit. Parmi elles, un grand nombre se focalise sur le meilleur choix pour la simulation de l'étiage ou différents buts multi-objectif. Cependant, peu d'études s'intéressent au choix d'une fonction objectif pour optimiser la simulation d'indices d'étiage nécessaires pour la bonne gestion de la ressource en eau en période d'étiage. Dans cet article, nous testons différentes fonctions objectif en partant de fonction objectif simple utilisée avec différentes transformations du débit ou utilisant les indices d'étiage jusqu'aux combinaisons de différentes fonctions objectif simples. Nous évaluons ensuite leur robustesse et leur sensibilité au modèle pluie-débit utilisé. Nous trouvons que le KGE appliqué à une transformation du débit n'est pas approprié pour remplir toutes les conditions d'évaluation alors qu'une combinaison comme la moyenne entre le KGE appliqué au débit et le KGE appliqué à l'inverse du débit est suffisante. La robustesse des simulations est moins dépendante du choix de la fonction objectif que de la variabilité climatique au sein des bassins versants et les résultats sont peu sensibles au choix du modèle pluie-débit.

Abstract

Much has been written on the subject of objective functions to calibrate rainfall-runoff models. Many studies focus on the best choice for low-flow simulations or different multi-objective purposes. Only a few studies, however, investigate objective functions to optimise the simulations of low-flow indices that are important for water management. Here, we test different objective functions, from single objective functions with different discharge transformations or using low-flow indices to combinations of single objective functions and we evaluate their robustness and sensitivity to the rainfall-runoff model. We found that the Kling and Gupta efficiency (KGE) applied to a transformation of discharge was inadequate to fulfil all assessment criteria, whereas the mean of the KGE applied to the discharge and the KGE applied to the inverse of the discharge was sufficient. The robustness was dependent on the climate variability rather than the objective function and the results were not sensitive to the model.

3.1 Introduction

Studying low flows is of paramount importance to manage water resources, for water uses such as irrigation, water supply, navigation and hydroelectricity (Engeland et Hisdal, 2009 ; Lang Delus, 2011). Low flows can be characterised by different indices (Smakhtin, 2001 ; WMO, 2008) such as the mean annual minimum discharge or a percentile from the flow duration curve. When sites are gauged for long record periods, these indices can easily be calculated from river discharge values. Other strategies, however, are needed in the context of spatial or temporal extrapolation studies for which discharge data are not available. In these cases, the use of a rainfall–runoff model, taking into account climate variability and which parameters can be regionalised is a possible answer. Using a rainfall–runoff model to simulate long discharge records in order to derive low–flow indices is an uncertain task and raises questions about (i) the type of model and (ii) the calibration procedure. While the choice of the model to be used is often driven by data availability and/or the expert knowledge of the model user, the calibration procedure might be tricky since simulating low flows is not a common usage of the rainfall–runoff model. This point is discussed in detail hereafter.

The calibration step can make use of a visual comparison between observed and simulated hydrographs, but this technique is subjective, dependent on expert judgement and difficult to reproduce (Chiew et McMahon, 1993 ; Houghton-Carr, 1999 ; Crochemore *et al.*, 2015). Since numerical criteria are more objective because they are reproducible and are more easily explained (Krause *et al.*, 2005), the calibration step usually involves choosing an optimisation algorithm, an objective function and one or several criteria to assess the model's goodness of fit. The criteria used to assess the model's goodness of fit are often used as objective functions. However, if the target variables are low–flow indices, this potentially leads to difficulties in finding a robust set of parameters. Consequently, objective functions based on the goodness of fit of hydrographs are often preferred.

The relevance of an objective function depends on the aim of the study or a simulation but also on the time step of hydrological modelling. Most existing objective functions based on least–square errors generally favour the goodness of fit of the hydrograph for high flows. For low–flow simulations, many authors have suggested alternative objective functions or alternative optimization strategies and the three main types of approaches are listed below.

- More often than not, it is suggested using common objective functions with an appropriate transformation applied to the discharge in order to put more emphasis on low-flow goodness of fit. Oudin *et al.* (2006) used a modified Nash and Sutcliffe efficiency (NSE) criterion applied to logarithmic transformed discharge and Pushpalatha *et al.* (2012) suggested using the inverse of the discharge as a criteria of efficiency. Another option consists in calculating model errors under a certain threshold discharge (Deckers *et al.*, 2010) or weighting the errors depending on their flow ranges (Krause *et al.*, 2005 ; Le Moine, 2008).
- Other studies (Westerberg *et al.*, 2011) use an objective function, based on the flow-duration curve (FDC). The rationale underlying this usage in the case of low-flow index simulations is that these indices are derived in the frequency domain and the temporal goodness of fit of the hydrographs is not a prerequisite of good low-flow index simulations (see e.g. the results obtained by Price *et al.*, 2012). Putting this idea further, Olsen *et al.* (2013) suggested calibrating the model using directly the flow indices that are targeted by the model user. They obtained interesting results on a set of 49 catchments in Denmark but here the choice of the low-flow indices used in the objective function can also be a thorny issue.
- Some authors advocate the use of multi-objective techniques. Multi-objective techniques provide the key advantage to possibly combine objective functions in a tailor-made framework. Multi-objective technique can be implemented in the theoretical framework of multi-objective optimization such as a Pareto front (Khu et Madsen, 2005 ; Fenicia *et al.*, 2007), or more simply by deriving aggregated (combined) objective function (Madsen, 2003 ; Merz et Blöschl, 2004 ; Oudin *et al.*, 2006 ; Booij et Krol, 2010 ; Nicolle *et al.*, 2014). Vis *et al.* (2015) assessed the ability of seven objective functions to simulate flow statistics at 27 catchments in the United States. They showed that combined objective functions generally gave the best results for flow statistics but the choice of the combined objective varied according to the desired flow statistic.

This study intends first to define an appropriate objective function for the simulations of low–flow indices at the scale of the French territory, but also the simulations of flow seasonality and mean annual runoff. Second, we wish to evaluate the robustness of the calibrated set of parameters.

To meet these objectives, we will test a large panel of existing approaches and objective functions, including objective functions with different discharge transformations, objective functions based on the FDC, objective functions directly using low–flow indices and combined objective functions. The validation criteria to assess the relative merits of these objective functions are based on low–flow indices, seasonality and the mean annual runoff, most of them being used by national water management agencies.

The next section presents the data and the catchment set, the rainfall–runoff models used in this study and the methodology. Then the results are presented and discussed before the conclusions.

3.2 Study area, models and methodology

This section presents the dataset, the hydrological models used for this study and the methodology to test different objective functions.

3.2.1 Dataset

3.2.1.1 Catchment set

A set of 691 catchments throughout France was collected for this study (see Figure 3.6 for the catchment locations). They were chosen following different criteria: the type of catchment, the availability of flow time series and the diversity of hydro–meteorological regimes.

Therefore, we first retained natural catchments with limited human influence, and therefore small in size (less than 8 000 km²). Then we intended to have long series of data from gauging stations, at least 25 years available between 1970 and 2013 for the cross–validation and the calculation of the low–flow indices. These data were deemed good by the station managers and a threshold of 10% missing data per year was allowed. Finally, we

evaluated the diversity of the set so that it would be representative of all hydrological regimes in France (Sauquet *et al.*, 2008): pluvial (77% of the catchment set), Mediterranean (9%) and snowmelt-fed (14%) hydrological regimes.

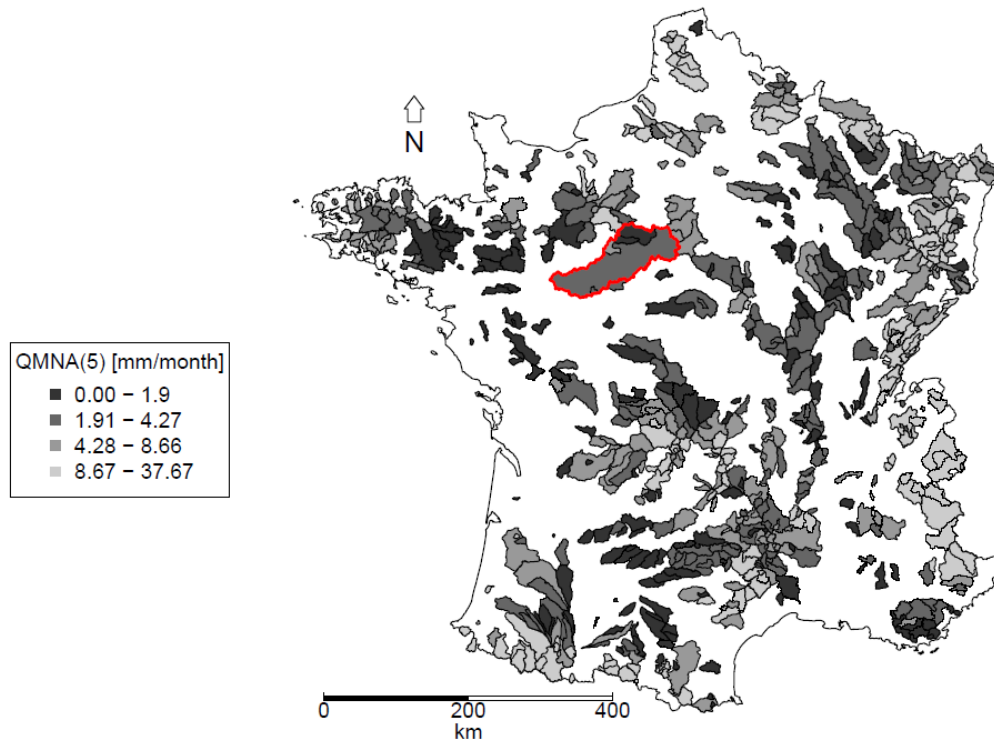


Figure 3.6: Spatial distribution of the QMNA(5) over the set of 691 French catchments. The red contour line delimits the catchment of the Loire River at Durtal.

3.2.1.2 Data

Meteorological data came from the distributed mesoscale atmospheric analysis system SAFRAN developed by Météo-France (Quintana-Seguí *et al.*, 2008 ; Vidal *et al.*, 2010a), which provides daily solid and liquid precipitation and temperature data throughout France. Daily potential evapotranspiration (PE) was estimated using a temperature-based formula (Oudin *et al.*, 2005). These data were available on the 1959–2013 period over France.

Daily discharge data came from the French Hydro database (www.hydro.eaufrance.fr). For the catchment set of interest in this study, the length of the discharge records for each catchment varied but they were generally available for the 1970–2013 period, which includes very humid years (e.g. 1977) and very dry years (e.g. summers 1976, 1989, 2003 and 2005).

Tableau 3.1 summarises the hydro–meteorological diversity of our set and some catchment characteristics.

Tableau 3.1: Percentiles of the distributions of climatic and catchment characteristics on the set of 691 study catchments.

	Min	25%	Median	75%	Max
Mean annual runoff (mm/year)	44	256	390	609	2 211
Mean annual precipitations (mm/year)	634	867	988	1 181	2 094
Mean annual PE (mm/year)	237	623	660	703	864
Catchment area (km ²)	4	98	211	478	7 935
Mean elevation (m a.s.l.)	29	188	362	743	2 866
Base-Flow Index (–)	0.12	0.47	0.57	0.67	0.98

3.2.1.3 Low–flow indices

Low flows in France mostly occur in summer and at the beginning of autumn, due to a lack of precipitation and an increased evaporative demand, except over the mountainous area where they occur in winter. A multitude of low–flow indices can be estimated (Smakhtin, 2001 ; Laaha et Blöschl, 2006b ; WMO, 2008 ; Lang Delus, 2011). Since our focus was on low–flow severity, at different time steps, and low–flow indices used by water management agencies, the following indices were selected: Q95 and Q75, MAM3, MAM10 and QMNA at the recurrence interval of 5 years (called MAM3(5), MAM10(5) and QMNA(5)).

Q95 and Q75 are derived from the flow–duration curve (Vogel et Fennessey, 1994 ; 1995), calculated over all the available years. Q95 is the discharge exceeded 95% of the time and Q75, the discharge exceeded 75% of the time.

MAM3 and MAM10 are the mean annual 3– and 10–day minimum discharge, respectively, and QMNA is the annual minimum monthly discharge. The latter is widely used in France for low–flow management and drought management plans.

Since these three indices were estimated for each year, we calculated the 5–year return period of these three indices. Therefore, for each catchment, the distribution of each index was fitted to a log–normal distribution. The parameters of the log–normal distribution were estimated by the maximum likelihood method since Catalogne (2012) showed that this distribution and this estimation method are the most appropriate for low flows in France. For some catchments, the rivers dry up for several years; a conditional probability model is used in this case (Stedinger *et al.*, 1993). In Figure 3.6, the different catchments are represented

with their QMNA(5) value and Tableau 3.2 summarises the diversity of these low-flow indices for the dataset.

Tableau 3.2: Percentiles of the distribution of low-flow characteristics on the set of 691 study catchments.

	Min	25%	Median	75%	Max
Q95 (mm/d)	0	0.06	0.13	0.26	1.32
Q75 (mm/d)	0	0.15	0.29	0.51	2.14
MAM3(5) (mm/d)	0	0.03	0.09	0.18	1.14
MAM10(5) (mm/d)	0	0.04	0.1	0.21	1.16
QMNA(5) (mm/month)	0	1.83	3.96	8.22	37.67

3.2.2 Hydrological models

The rainfall-runoff model used for this study was GR4J (Perrin *et al.*, 2003), a continuous lumped model with four parameters. This model has been used in many studies, especially in France for management and operational purposes. Figure 3.7 shows the structure of the model. Effective rainfall and actual evapotranspiration are calculated as functions of the soil moisture store level (S), the net rainfall ($P-PE$) and the parameter $X1$ (mm), the maximum capacity of the soil moisture store. The percolation of the store is also a function of the store filling rate.

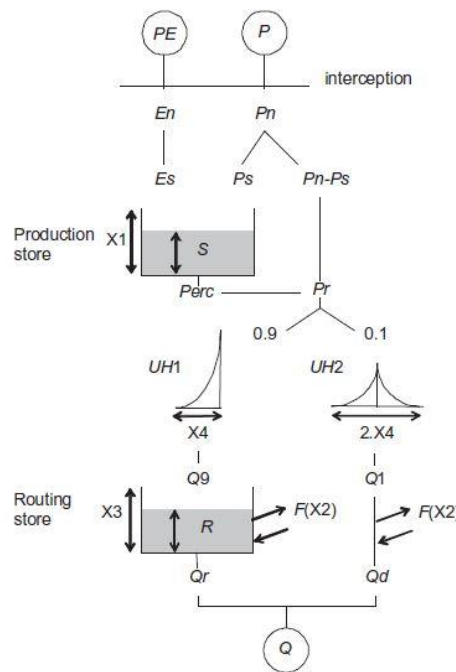


Figure 3.7: Schematic diagram of the GR4J model structure (PE: potential evapotranspiration, P: rainfall, Q: streamflow, X_i : parameter i , other notations correspond to internal state variables).

Inter–basin groundwater flows are controlled by a second parameter (X_2 , mm/d). If X_2 is positive, the catchment gains water and if X_2 is negative, there is a water loss.

Effective rainfall is then divided into two flow components in the routine function: 90% are routed by a unit hydrograph, whose time–base parameter is X_4 (d), and a nonlinear routing store, and the remaining 10% are routed through a unit hydrograph. The last parameter, X_3 (mm), is the maximum level of the routing store. The simulated discharge is the sum of these two components.

Since our catchment set includes mountainous catchments, GR4J was used with a two–parameter snow module called CemaNeige (Valéry, 2010 ; Valéry *et al.*, 2014), using the regionalised parameters for each French mountain massif that were established by Brigode *et al.* (2014).

To assess whether the results depend on the model structure, a six–parameter version of TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979), named TOPMO, was also used. This version differs from the original TOPMODEL structure since it is a lumped version of the model with a parameterized expression of the soil–topographic distribution (see Edijatno *et al.*, 1999 and Michel *et al.*, 2003 for more details). This model was also used with the snow module CemaNeige.

3.2.3 Calibration and validation methodologies

3.2.3.1 Cross-validation and calibration algorithm

The calibration algorithm used for this study is a two-step search procedure. First, the parameter space is screened and then a local search algorithm is performed. This approach will not be discussed here but has been proved efficient for parsimonious models like GR4J (Edijatno *et al.*, 1999 ; Mathevet, 2005).

The evaluation of the different objective functions was based on classical split-sample-test scheme (Klemeš, 1986). The discharge records were divided into two independent sub-periods of equivalent lengths (P1: 1970–1991 and P2: 1992–2013). We first calibrated the model parameters on P1 and validated it on P2, then exchanged the two sub-periods, i.e. we calibrated on P2 and validated it on P1. Five years before each period (1965–1969 for P1 and 1987–1991 for P2) were used to initialise the model and to avoid any problem with catchments with long-term memory. Then we evaluated the model's performance on the two validation periods.

3.2.3.2 Assessment criteria

The objective was to evaluate the quality of the simulation of low-flow indices, mean annual runoff and seasonality. The low-flow indices selected were Q95, Q75, MAM3(5), MAM10(5) and QMNA(5). We obtained one observed and one simulated value of these five indices and also for mean annual runoff (MAR) for each catchment and for each simulation. To obtain a general assessment of each simulation over the entire set of catchments, we calculated for each index a spatial criteria based on the NSE as a transposition of the NSE from a temporal to a spatial analysis, called “Spatial Index Efficiency” (SIE):

$$SIE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (FI_i^{obs} - FI_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (FI_i^{obs} - m_{obs})^2} \quad (3.1)$$

where FI_i^{obs} and FI_i^{sim} are the observed and simulated indices for the catchment i , n the number of catchments (here 691) and m_{obs} the mean of the observed indices. A SIE close to unity means that the indices are well simulated over France.

To assess the goodness of fit of flow seasonality, we computed a NSE (Nash et Sutcliffe, 1970) over the 12 observed and simulated mean monthly discharges and then we calculated the median of the 691 NSE values. To assess the impact of the different objective functions on the continuous simulations, we computed a bounded–version of the NSE (Mathevet *et al.*, 2006), called NSE*:

$$\text{NSE}^* = \frac{\text{NSE}}{2 - \text{NSE}} \quad (3.2)$$

$$\text{with NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M (Q_i^{\text{obs}} - Q_i^{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^M (Q_i^{\text{obs}} - \mu_{\text{obs}})^2} \quad (3.3)$$

where μ_{obs} is the mean of the observed and simulated discharge series.

We computed this criterion on the discharge, the square–root of the discharge and the inverse of the discharge and then calculated the median of each distribution. This provides assessment criteria on seven indices and three continuous simulations to evaluate each simulation; radial plots were used to present the different results and ease the comparisons. The larger the polygon is, the better the simulations are.

Tableau 3.3 summarises the list of criteria for the test evaluation.

Tableau 3.3: Selection of the assessment criteria.

Name	Description
Low–flow indices	
SIE(Q95)	SIE calculated on Q95, discharge exceeded 95% of the time
SIE(MAM3(5))	SIE calculated on MAM3(5), mean annual 3–day minimum at T = 5 years
SIE(MAM10(5))	SIE calculated on MAM10(5), mean annual 10–day minimum at T = 5 years
SIE(QMNA(5))	SIE calculated on QMNA(5), annual minimum monthly flow at T = 5 years
SIE(Q75)	SIE calculated on Q75, discharge exceeded 75% of the time
Seasonality	
q ₅₀ (NSE(QMM))	Median of the distribution of the 691 NSE on the mean monthly flows (QMM)
Mean annual runoff	
SIE(MAR)	SIE calculated on MAR, mean annual runoff
Continuous simulations	
q ₅₀ (NSE*(Q))	Bounded version of the NSE calculated on discharges
q ₅₀ (NSE*(Q ^{0.5}))	Bounded version of the NSE calculated on root–squared transformed discharges
q ₅₀ (NSE*(1/Q))	Bounded version of the NSE calculated on inverse transformed discharges

3.2.3.3 Objective functions analysed

First, this study evaluated the impact of choosing the assessment criteria on the seven indices as an objective function. To this aim, an objective function derived from the RMSE was computed on the seven assessment criteria and used as the objective function. This objective function is noted OF_{AC} hereafter:

$$OF_{AC} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(1 - \frac{AC_k^{sim} + \varepsilon}{AC_k^{obs} + \varepsilon} \right)^2 \quad (3.4)$$

where AC_k^{obs} and AC_k^{sim} are the observed and simulated values of the assessment criterion k , respectively, N is the number of assessment criteria and ε is a small quantity in case AC_k^{obs} equals zero (taken equal to one one-hundredth of the median value over the catchment set). The assessment criteria are the five low-flow indices, Q95, MAM3(5), MAM10(5), QMNA(5) and Q75, the twelve mean monthly flows, QMM, and the mean annual discharge, MAR. All indices are calculated in mm/d. An OF_{AC} close to zero means that all assessment criteria are well simulated for the catchment.

Then, this study focused on the Kling and Gupta efficiency, KGE (Gupta *et al.*, 2009), since it has been analysed and recommended in many studies (Lobligeois, 2014 ; Magand, 2014 ; Osuch *et al.*, 2015). KGE is given by:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (3.5)$$

$$\text{with } \begin{cases} r = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{(Q_j^{obs} - \mu_{obs})(Q_j^{sim} - \mu_{sim})}{\sigma_{obs}\sigma_{sim}} \\ \alpha = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} \\ \beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} \end{cases} \quad (3.6)$$

where r is the Pearson product-moment correlation coefficient, μ and σ are the mean and the standard deviation of the observed and simulated discharge series, respectively, α is the ratio between the simulated and observed standard deviation values and β is the ratio between the simulated and observed mean values. The objective was to tend towards the ideal value of r , α and β , which is 1, so that the Euclidean distance tends towards 0 and the KGE criterion is maximised.

The first part of this study evaluated if a single objective function provided fair results to simulate low flow, mean annual runoff and seasonality. Since the simplest objective function that can be used for all catchments was sought, we decided to evaluate the KGE with discharge transformations, choosing the following:

- $KGE(Q)$, which puts more weight on high flow,
- $KGE(Q^{0.5})$, which does not favour high flow nor low flow,
- $KGE(1/Q)$, which puts more weight on low flow.

For the third discharge transformation, to avoid any problems with zero discharge, a small constant, ε , was added, which was one one–hundredth of the mean observed discharge as advised by Pushpalatha *et al.* (2012). Since the objective here was primarily to simulate low–flow indices, we chose to evaluate the KGE on the FDC, with the same discharge transformations, leading to the three following objective functions:

- $KGE(Q_{\text{sort}})$, which puts more weight on high flow,
- $KGE(Q_{\text{sort}}^{0.5})$, which does not favour high flow nor low flow,
- $KGE(1/Q_{\text{sort}})$, which puts more weight on low flow.

Tableau 3.4 summarises these six objective functions and their specificities.

Tableau 3.4: Selection of the objective functions tested.

	Criterion	Names	Weights on
Temporal criteria	$KGE(Q)$	KGE calculated on discharges	High flows
	$KGE(Q^{0.5})$	KGE calculated on root–squared transformed discharges	Neither high nor low flows
	$KGE(1/Q)$	KGE calculated on inverse transformed discharges	Low flows
Frequency criteria	$KGE(Q_{\text{sort}})$	KGE calculated on the FDC	High flows
	$KGE(Q_{\text{sort}}^{0.5})$	KGE calculated on the root–squared transformation of the FDC	Neither high nor low flows
	$KGE(1/Q_{\text{sort}})$	KGE calculated on the inverse transformation of the FDC	Low flows

The second part evaluated all the different combinations of two of these functions. The combination was the mean of these two functions and the different weights that can be applied between the two functions were evaluated.

3.2.3.4 Temporal robustness assessment

For this study, we evaluated the temporal robustness of the calibrated set of the model parameters. The robustness of the parameter sets was analysed by dividing the discharge records into two different periods: one with the 22 driest years and one with the 22 wettest years. To split these 44 years, an annual aridity index (Budyko, 1974) was calculated and the 22 lowest values of this aridity index corresponded to the 22 driest years and the 22 highest values to the 22 wettest years. Then we calibrated the model parameters on the dry period and validated it on the wet period and then exchanged the two sub-periods.

3.3 Results and discussions

This section first presents the results obtained with assessment criteria used as objective functions, then those obtained using a single objective function and in the third stage the results obtained when combining two single objective functions. Last, the general reach of the results is analysed with the best single objective function and the best combination by analysing (i) their temporal robustness and (ii) their sensitivity to the model structure.

3.3.1 Assessment criteria as objective function

Figure 3.8 shows the radial plot with the results in calibration and in validation when using the seven indices within the objective function (OF_{AC}). We observed that the seven indices are quite well simulated in calibration periods with SIE values between 0.95 for the simulation of the Q75 and 0.98 for the simulation of the MAM10(5). However, we observed a drop for the simulations of these seven indices in validation, with SIE values around 0.7. Using the seven assessment indices as an objective function seems to simulate indices that are not robust. These results differ from the ones obtained by Olsen *et al.* (2013). However, these authors used an objective function combining low-flow and high-flow indices, which can be more related to an objective function based on the FDC and lead to more robust results. Looking at the continuous simulations, we observed that this objective function did not provide good continuous simulations since it did not take into account the temporal goodness of fit of the hydrographs.

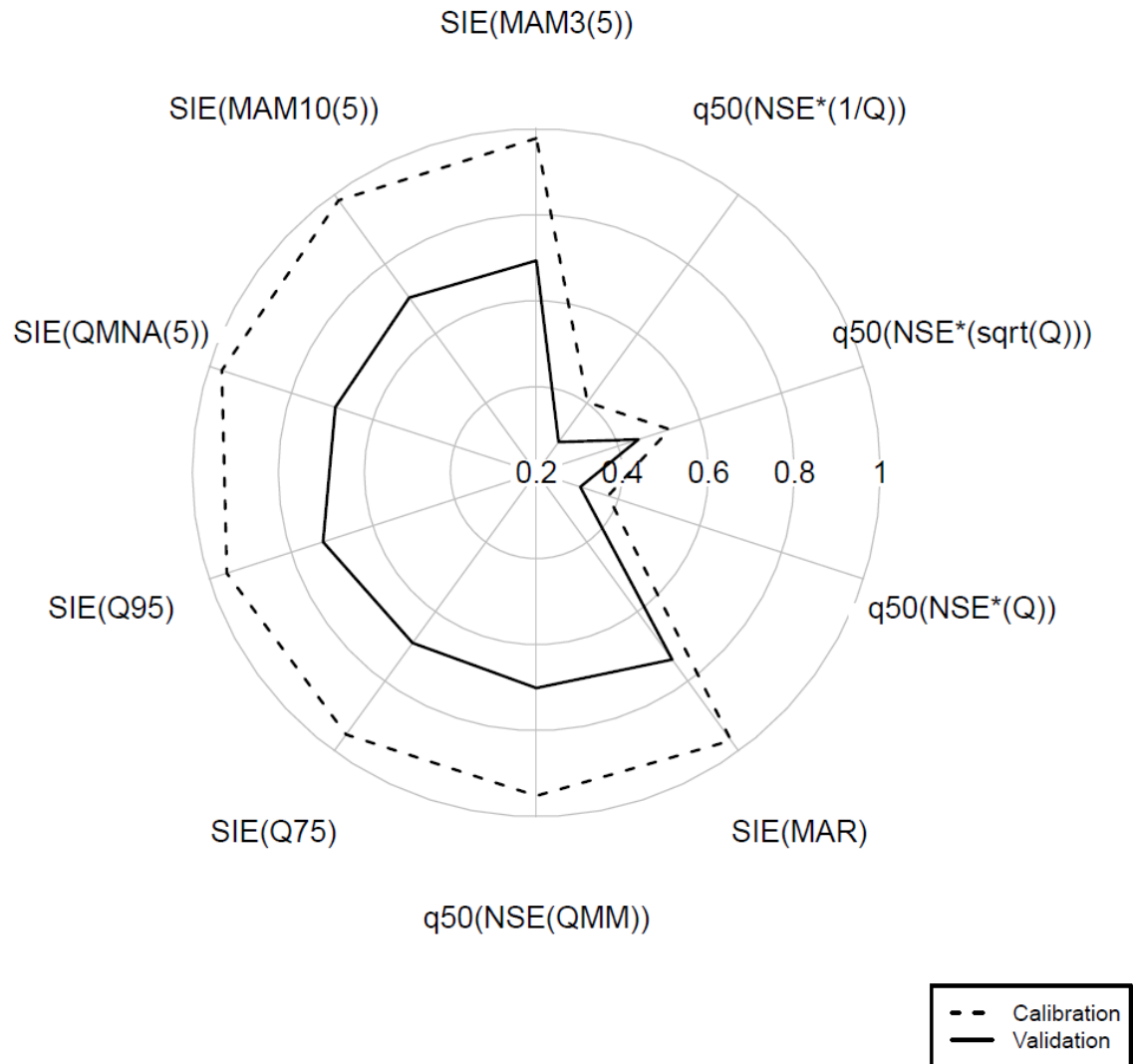


Figure 3.8: Radial plot showing the mean results in calibration and in validation for the two periods for the seven assessment criteria used as an objective function.

3.3.2 Single objective function

Figure 3.9 illustrates the impact of the choice of the objective function for one catchment, the Loir River at Durtal (7 920 km², located by the red lines in Figure 3.6) in the validation period 1970–1991. Figure 3.9 (a) shows the simulations of seasonality with the six single objective functions for one period in validation and for this catchment. The lowest discharges, in summer, were better simulated with the KGE(1/Q) function, whereas they were underestimated with the other functions, especially with those applied to the discharge. In contrast, the highest discharges, in winter for this catchment, were better simulated with KGE(Q^{0.5}), but they were underestimated with the functions applied to the inverse discharge and overestimated with the function applied to the discharge. Figure 3.9 (b) shows the simulation of the FDC, also for one period in validation. Interestingly, KGE(1/Q) and

$KGE(1/Q_{\text{sort}})$ allowed better simulations of the part of the curve depicting the low flows, whereas the part depicting the high flows was better simulated with $KGE(Q)$ and $KGE(Q_{\text{sort}})$. For the simulation of the FDC, the three objective functions based on the sorted discharge gave better results than the temporal functions. Figure 3.9 (c), (d) and (e) shows the simulations of, respectively, MAM3, MAM10 and QMNA. These three indices were better simulated with $KGE(1/Q)$ and $KGE(1/Q_{\text{sort}})$, whereas they were underestimated by the other four objective functions. Figure 3.9 (f) shows the simulation of the annual runoff, AR. This index was better simulated with the two objective functions based on the discharge or the square root of the discharge, whereas those based on the inverse of the discharge showed a tendency to underestimate the AR.

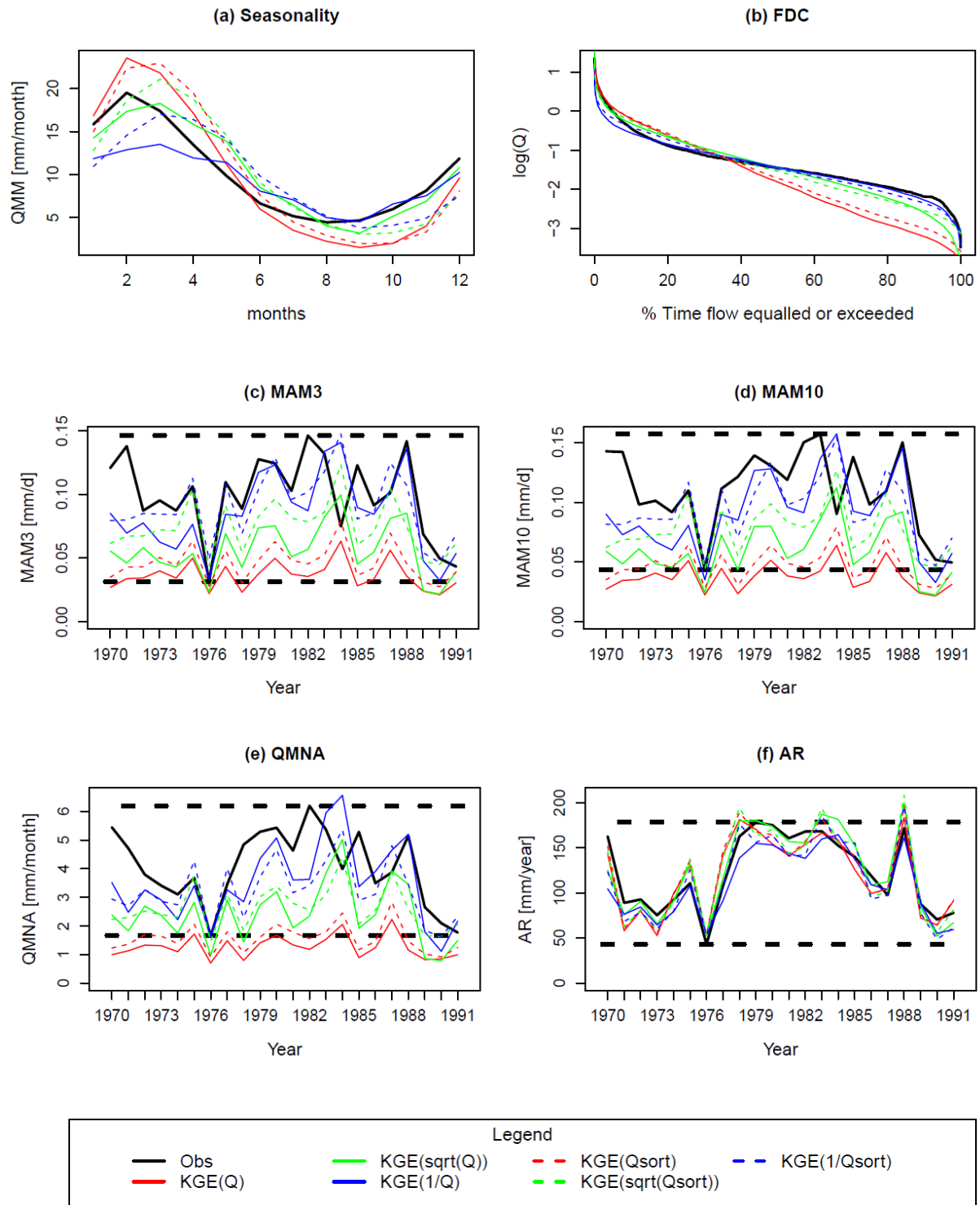


Figure 3.9: Representation of seasonality (a), the flow duration curve (b), the annual MAM3 (c), the annual MAM10 (d), the annual QMNA (e) and the annual runoff (f) observed (in black) and simulated with the six single objective functions (in colours) in the validation period 1970–1991 for the Loir River at Durtal.

Figure 3.10 shows the radial plot with the results in validation for the simulations with the six single objective functions. As for the example of the Loir River at Durtal, the two functions applied to the inverse discharge, $KGE(1/Q)$ and $KGE(1/Q_{\text{sort}})$, provided better simulations of the four low-flow indices with SIE values around 0.9, whereas the two functions applied to the discharge, $KGE(Q)$ and $KGE(Q_{\text{sort}})$, gave relatively poor results with SIE values between 0.55 and 0.65. The opposite is observed for the simulation of mean annual runoff and flow seasonality. The two functions applied to the square-root of the discharge, $KGE(Q^{0.5})$ and $KGE(Q_{\text{sort}}^{0.5})$, provided good simulations of mean annual runoff and seasonality and reasonable simulations of the low-flow indices. These results confirmed that $KGE(Q)$ and $KGE(Q_{\text{sort}})$ put more weight on high flows, $KGE(1/Q)$ and $KGE(1/Q_{\text{sort}})$ on low flows, whereas $KGE(Q^{0.5})$ and $KGE(Q_{\text{sort}}^{0.5})$ weighted neither type of flow. Looking at the continuous simulations, we observe the same trend. The objective functions with no transformation or the square-root transformation gave good results for the high and intermediate flows, whereas the inverse transformation gave better results for the low flows. As for the Loir River at Durtal study, only a few differences were observed between objective functions in the temporal and frequency domains. However, these differences increased for the continuous simulations since the three single objective functions in the frequency domain did not take into account the temporality of the hydrographs. Since the first goal was the simulation of low-flow indices, the functions on the inverse discharge seemed to provide better results, but the simulations of mean annual runoff and seasonality were overly reduced. Therefore, the function applied to the square-roots seemed to provide the best results. Since there is clearly a trade-off between low-flow indices, mean annual discharge and flow seasonality, the next section tests various combinations of the objective functions tested.

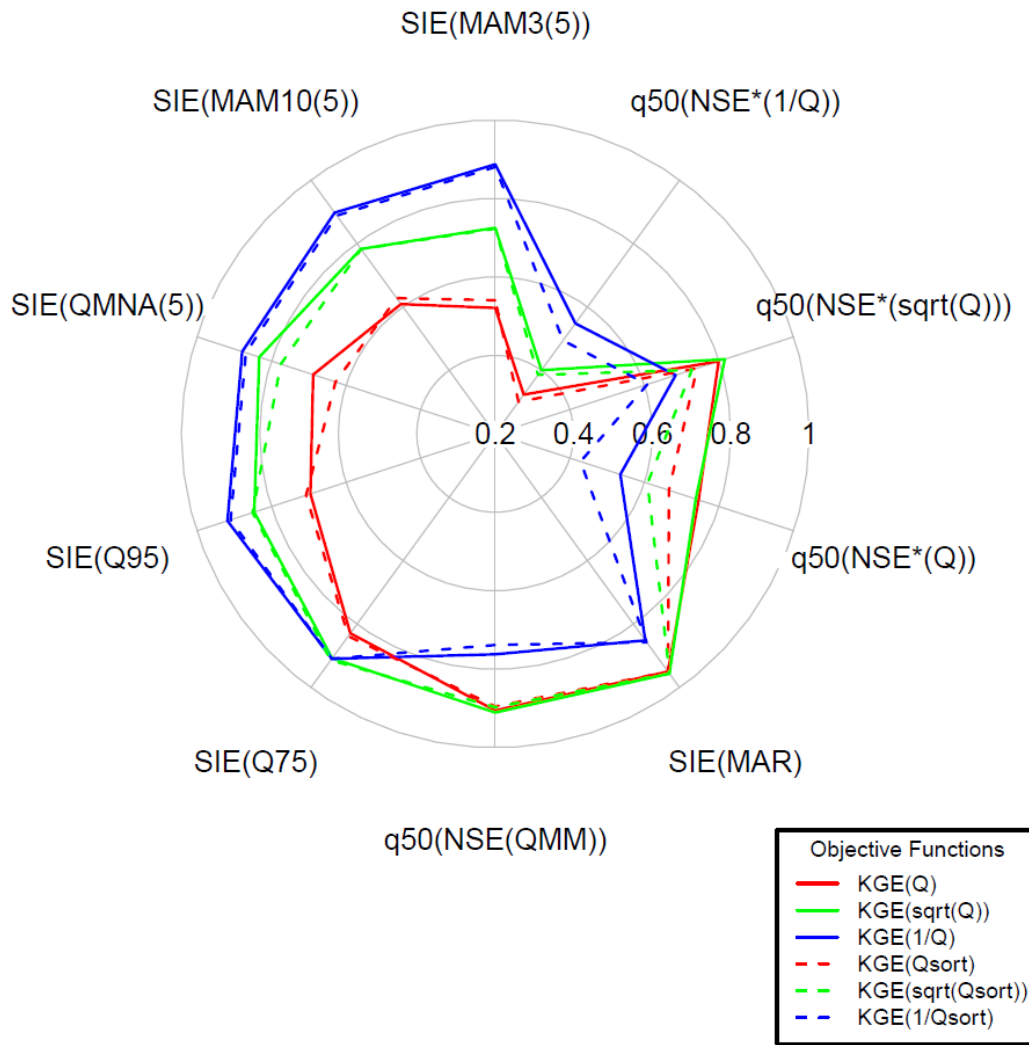


Figure 3.10: Radial plot showing the mean results in validation for the two periods for the six single objective functions.

3.3.3 Combination of two single objective functions

Figure 3.11 shows the simulation of seasonality, FDC, MAM3, MAM10, QMNA and AR in the validation period 1970–1991 for the Loir River at Durtal, for the parameters calibrated with $KGE(Q^{0.5})$, the combination of $KGE(Q)$ and $KGE(Q_{sort})$, and the combination of $KGE(Q)$ and $KGE(1/Q)$. In all the sub–figures except the last one, the combination of $KGE(Q)$ and $KGE(1/Q)$ provided good simulations of all these indices, whereas the other combination did not improve the results. For the simulation of AR, we observed a tendency to overestimate this index with the combination of $KGE(Q)$ and $KGE(1/Q)$.

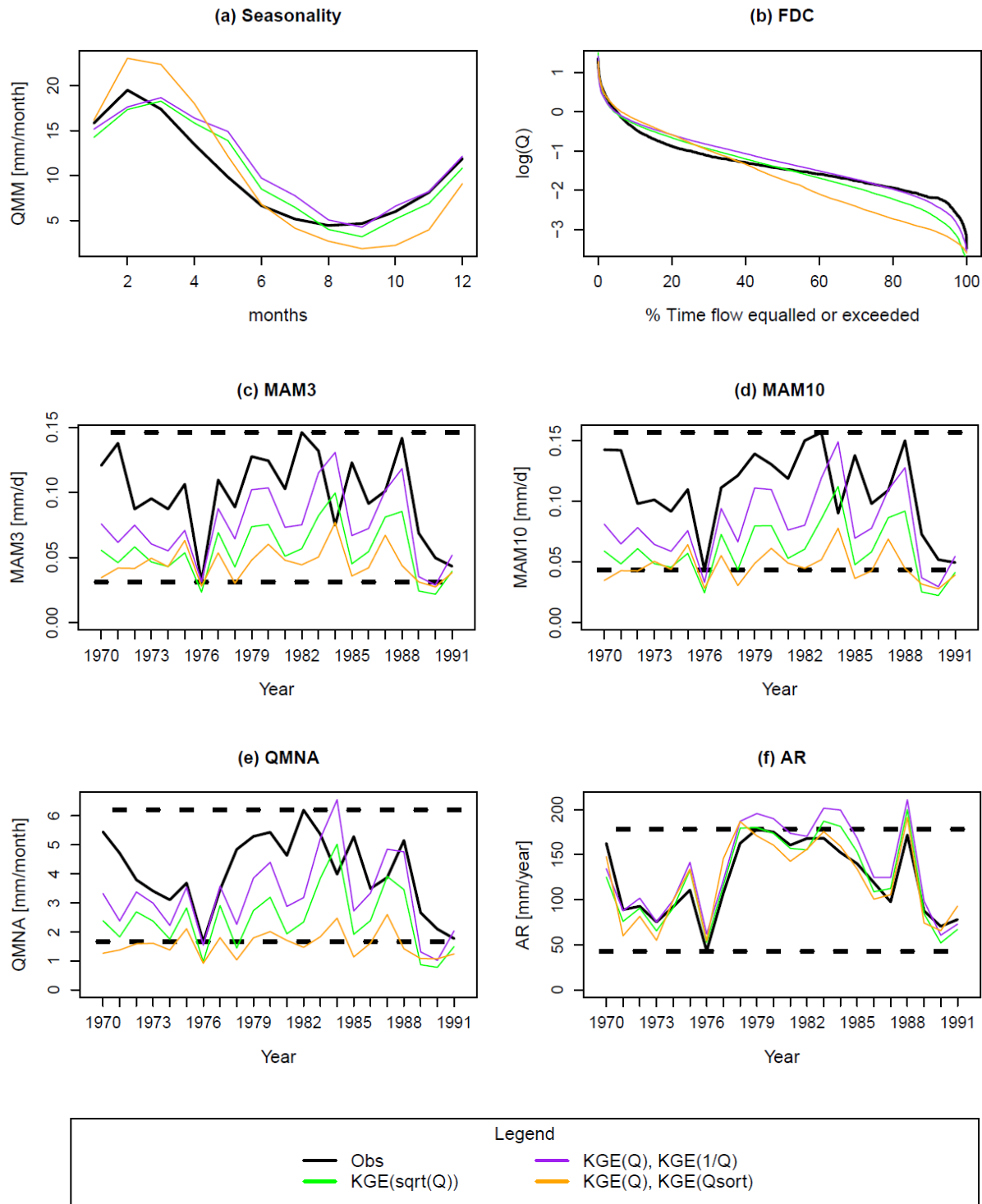


Figure 3.11: Representation of seasonality (a), the flow duration curve (b), the annual MAM3 (c), the annual MAM10 (d), the annual QMNA (e) and the annual runoff (f) observed (in black) and simulated with the three objective functions, KGE($\sqrt{Q}$) and two combinations (in colours) in the validation period 1970–1991 for the Loir River at Durtal.

All the possible combinations between two single objective functions from the pool of objective functions assessed in the preceding section were tested and the results for the seven assessment criteria are shown in Figure 3.12. The complementarity of the objective functions

taken into account demonstrates good efficiency for the several assessment criteria. In this context, mixing an objective function applied to the inverse of the discharge with an objective function applied to the discharge provided the best results, as shown by the purple curve for the simulation with KGE(Q) and KGE(1/Q). Conversely, mixing two objective functions on similar discharge transformation provided the worst results overall, such as the orange curve on the graphs, which draws the results for the simulation with the combination of KGE(Q) and KGE(Q_{sort}). The same results were observed for the continuous simulations.

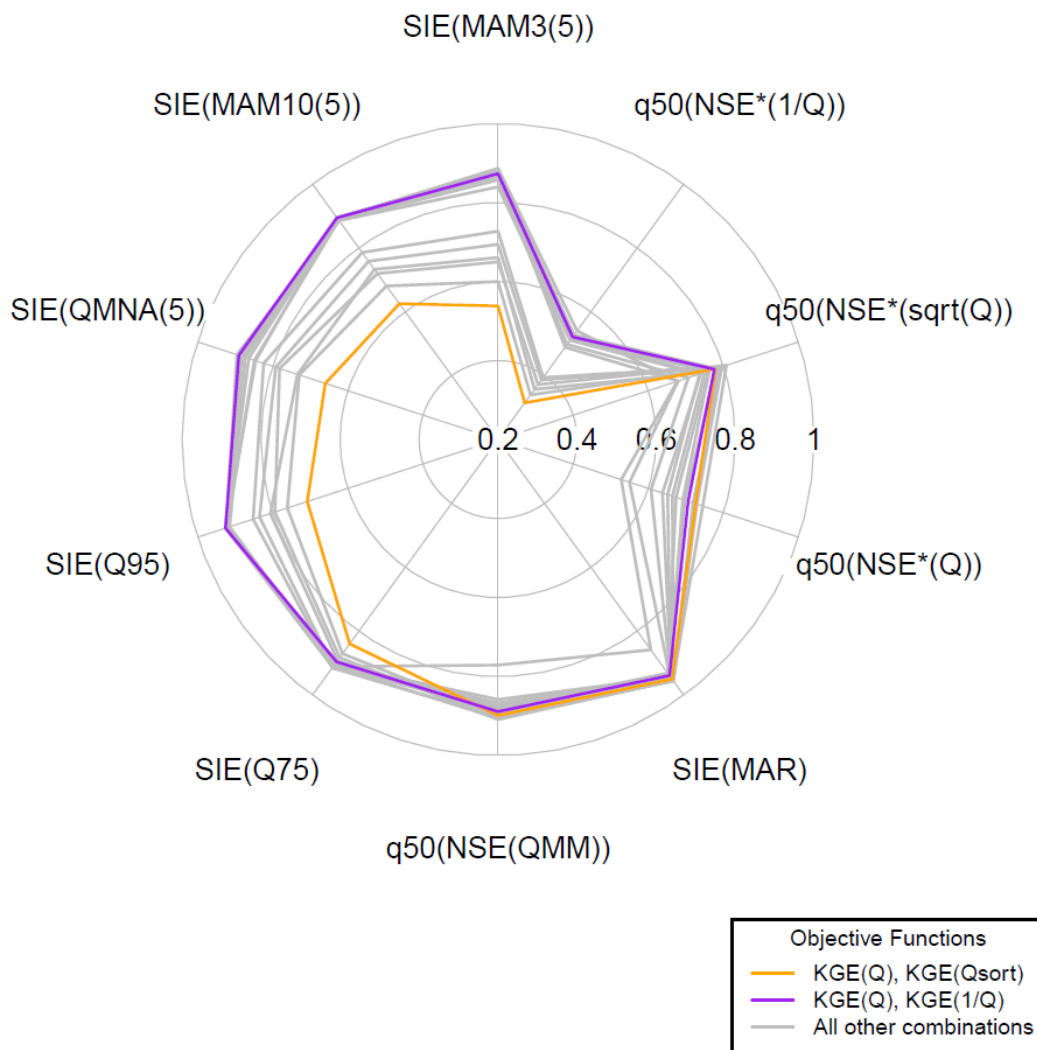


Figure 3.12: Radial plot showing the mean results in validation for the two periods for all the combinations of two single objective functions.

Tableau 3.5 summarises the values of the seven assessment criteria and the sum of these seven criteria for each objective function. As shown in Figure 3.12, combining with an objective function applied to the inverse discharge gave good results for the simulation of low–flow indices. The simulations of seasonality and mean annual runoff were improved with

these combinations, compared to the results when calibrating only with $KGE(1/Q)$ or $KGE(1/Q_{\text{sort}})$. Combining with the objective functions applied to the discharge or the square root of the discharge gave better results for the simulation of seasonality and mean annual runoff. Looking at the sum of the values of the seven assessment criteria, three objective functions gave the best performance: combining $KGE(1/Q)$ with $KGE(Q^{0.5})$, $KGE(Q)$ or $KGE(Q_{\text{sort}}^{0.5})$. Therefore, we chose the objective function that combines $KGE(Q)$, an objective function with no transformation that puts more weight on high flows with $KGE(1/Q)$, an objective function that puts more weight on low flows. This function has already been used in a study to calibrate the parameter set of the rainfall–runoff model GR6J conducted by Nicolle *et al.* (2014).

Tableau 3.5: Simulations of the seven assessment criteria in validation for the two periods for all objective functions.

KGE on	SIE on MAM3(5)	SIE on MAM10(5)	SIE on QMNA(5)	SIE on Q95	SIE on Q75	q ₅₀ of NSE(QMM)	SIE on MAR	Total
$Q^{0.5}, 1/Q$	0.877	0.895	0.886	0.924	0.896	0.894	0.937	6.309
$Q, 1/Q$	0.873	0.894	0.890	0.926	0.896	0.889	0.938	6.305
$1/Q, Q_{\text{sort}}^{0.5}$	0.865	0.893	0.882	0.926	0.909	0.884	0.945	6.305
$Q^{0.5}, 1/Q_{\text{sort}}$	0.879	0.893	0.874	0.920	0.901	0.880	0.931	6.279
$1/Q, Q_{\text{sort}}$	0.840	0.885	0.895	0.924	0.912	0.873	0.944	6.272
$Q, 1/Q_{\text{sort}}$	0.877	0.892	0.864	0.922	0.899	0.877	0.936	6.267
$Q_{\text{sort}}^{0.5}, 1/Q_{\text{sort}}$	0.876	0.894	0.845	0.925	0.905	0.867	0.940	6.252
$Q_{\text{sort}}, 1/Q_{\text{sort}}$	0.857	0.886	0.849	0.921	0.904	0.858	0.943	6.219
$1/Q, 1/Q_{\text{sort}}$	0.887	0.892	0.873	0.915	0.910	0.771	0.858	6.106
$1/Q$	0.887	0.896	0.878	0.918	0.908	0.762	0.850	6.099
$1/Q_{\text{sort}}$	0.880	0.887	0.868	0.909	0.909	0.738	0.856	6.047
$Q^{0.5}, Q_{\text{sort}}^{0.5}$	0.727	0.785	0.824	0.852	0.915	0.902	0.955	5.961
$Q^{0.5}$	0.725	0.782	0.832	0.846	0.907	0.910	0.955	5.958
$Q_{\text{sort}}^{0.5}$	0.723	0.782	0.775	0.850	0.913	0.897	0.955	5.894
$Q, Q_{\text{sort}}^{0.5}$	0.694	0.758	0.792	0.835	0.910	0.906	0.955	5.850
$Q, Q^{0.5}$	0.650	0.719	0.782	0.794	0.882	0.909	0.954	5.690
$Q_{\text{sort}}, Q_{\text{sort}}^{0.5}$	0.661	0.733	0.734	0.806	0.892	0.893	0.954	5.672
$Q^{0.5}, Q_{\text{sort}}$	0.600	0.681	0.729	0.761	0.870	0.900	0.954	5.494
Q, Q_{sort}	0.538	0.625	0.660	0.708	0.839	0.899	0.950	5.218
Q	0.521	0.609	0.688	0.695	0.828	0.905	0.949	5.194
Q_{sort}	0.540	0.627	0.628	0.707	0.837	0.895	0.949	5.184

Legend:



3.3.4 Comparison between $KGE(Q^{0.5})$ and the combination of $KGE(Q)$ with $KGE(1/Q)$

Figure 3.13 compares the distribution of the relative errors or the NSE when the parameter sets are calibrated with $KGE(Q^{0.5})$ or the combination of $KGE(Q)$ with $KGE(1/Q)$. Figure 3.13 (a), (b), (c), (d) and (e) shows the results for the relative errors of the five low–flow indices, respectively, MAM3(5), MAM10(5), QMNA(5), Q95 and Q75. For some catchments, the relative error values are very high, up to factors 10 to 20. These catchments are intermittent streams with observed low-flow indices very close to zero. When the parameters are calibrated with $KGE(Q^{0.5})$, these indices are overestimated for many basins. This trend decreases with indices that characterised less severe low flows, such as Q75. Figure 3.13 (f) compares the relative errors on the MAR. No huge trend is observed, but the results are underestimated for some basins with the combination of $KGE(Q)$ and $KGE(1/Q)$. Figure 3.13 (g) compares the simulations of seasonality. For some basins, seasonality is better simulated when the parameter sets are calibrated with $KGE(Q^{0.5})$.

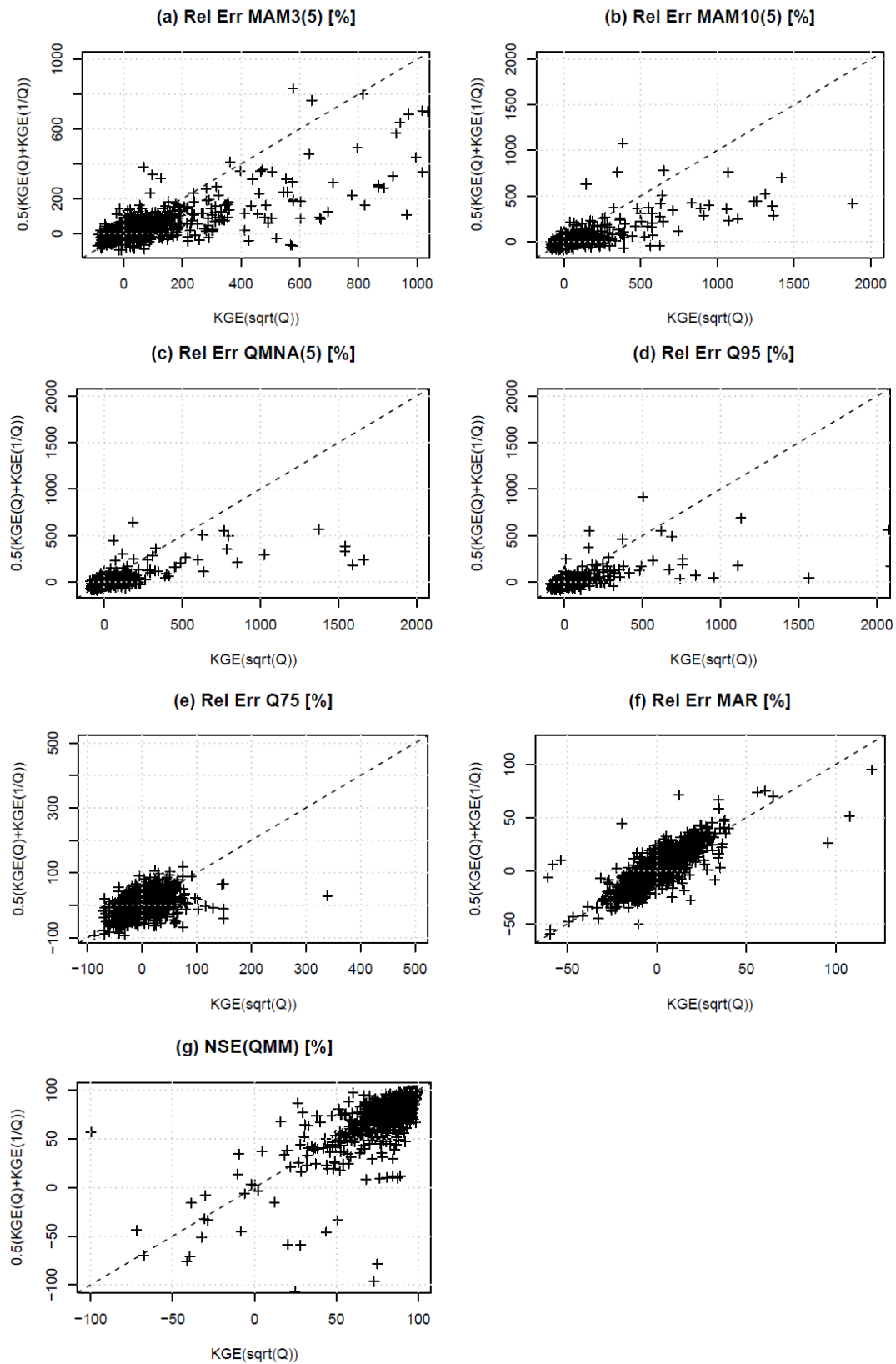


Figure 3.13: Scatter plot of relative errors on MAM3(5) (a), MAM10(5) (b), QMNA(5) (c), Q95 (d), Q75 (e) and MAR (f), and the NSE(QMM) (g) obtained in validation by $KGE(\sqrt{Q})$ and the combination of $KGE(Q)$ with $KGE(1/Q)$.

Figure 3.14 compares the parameters that are calibrated by each objective function. The values of the parameters X1 (capacity of production store) and X2 (groundwater exchange coefficient) were higher when calibrated with the objective function combining KGE(Q) with KGE(1/Q) than when calibrated by KGE(Q^{0.5}), resulting in greater losses from evapotranspiration and lower underground losses. This trend was not observed for the other two parameters. Whatever the two objective functions, we observed that some values of the parameter X4 are outliers. These points represented catchments in the Seine–Normandy region, for which BFI values are high, between 0.96 and 0.99. Their hydrographs are very influenced by groundwater runoff and are very difficult to simulate with GR4J.

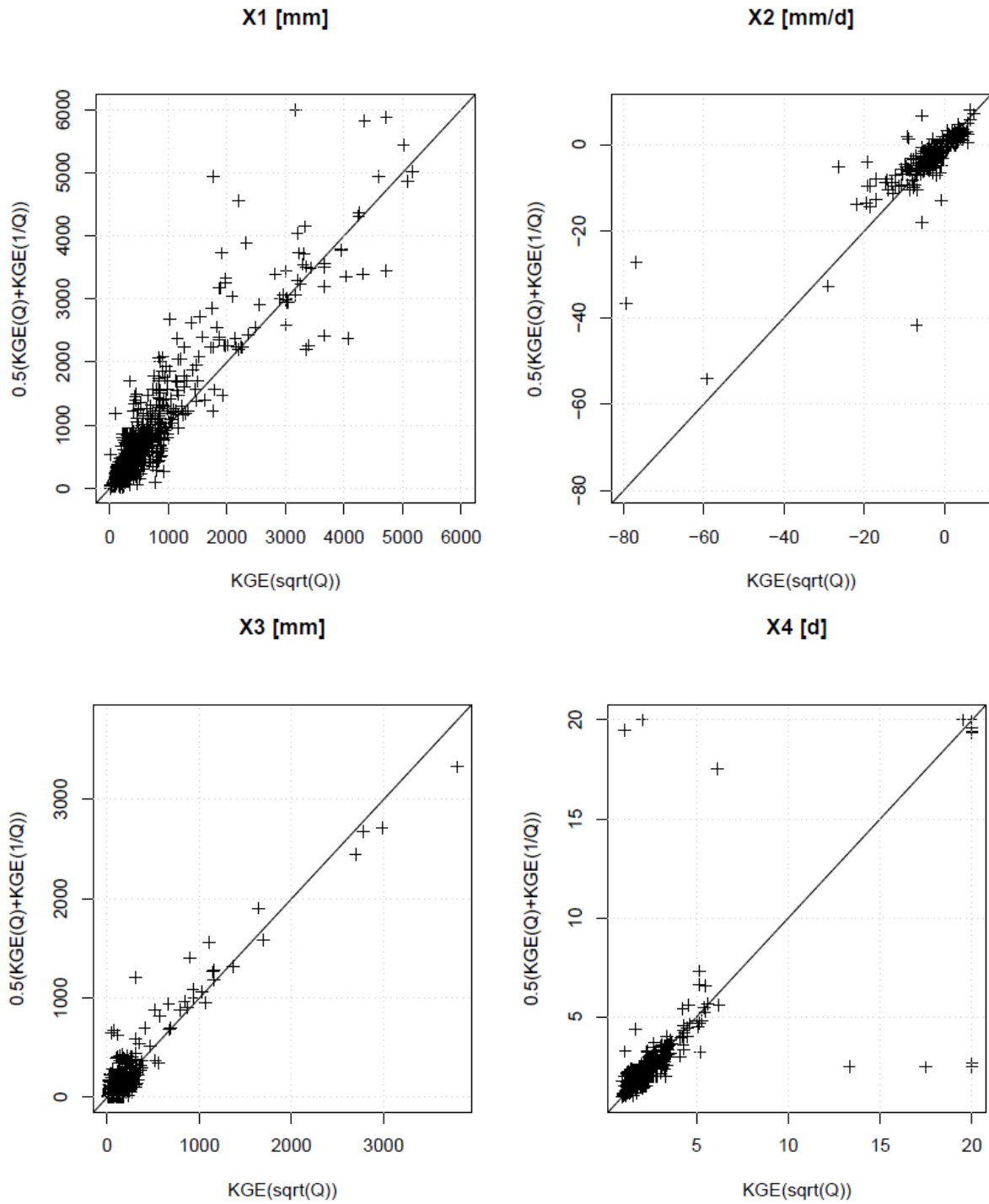


Figure 3.14: Comparison of the GR4J parameters calibrated by the objective function $KGE(\sqrt{Q})$ and the parameters calibrated with the objective function combining $KGE(Q)$ with $KGE(1/Q)$.

3.3.5 Weights in the combination of KGE(Q) with KGE(1/Q)

The results in section 3.3.3 indicate that the combination of KGE(Q) with KGE(1/Q) improved the calibration of the parameter set to estimate low–flow indices, seasonality and the mean annual runoff. This combination was chosen as the mean between the two single objective functions, putting the same weight, 50%, on the two functions. We evaluated the impact of the weights on the results. Therefore, different weights were tested, from 10% to 90%. Figure 3.15 shows the radial plot results for the different weights in validation. Interestingly, the functions that gave substantial weight to KGE(Q), 90% or 80%, did not provide good simulations of the low–flow indices. For example, when the weight was 90%, the SIE on the MAM3(5) was 0.7, whereas with the other functions, it was around 0.9. When putting 90% on KGE(1/Q), the quality of the seasonality simulations and the mean annual runoff decreased slightly. For all the other weights, the quality of the simulations was nearly the same.

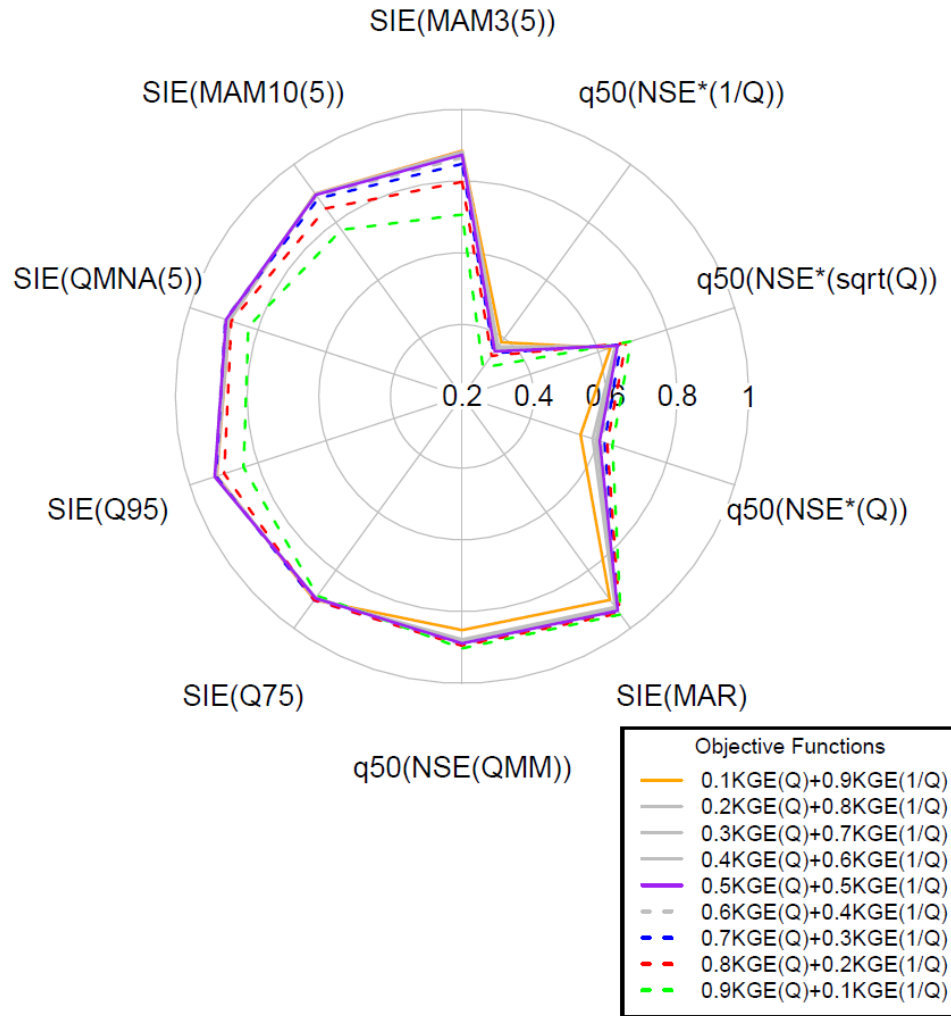


Figure 3.15: Evaluation of the weights in the combination of $KGE(Q)$ and $KGE(1/Q)$. Radial plot showing the results in validation for the two periods.

Based on the OF_{AC} calculated on the seven assessment criteria, we determined the optimal weights for each catchment. For 461 catchments, there was not one optimal weight but all weights between 20% and 70% for $KGE(Q)$ gave exactly the same calibrated parameter values and therefore the same simulations. For the other 230 catchments, we were able to find one optimal weight between 10% and 90%, depending on the catchment. We compared these optimal weights with different low-flow indices, the BFI, the hydrological regimes of each catchment but we were not able to provide a priori descriptors to determine these weights. These optimal weights could also be related to poor quality in low-flow data leading to parameter values that compensate these uncertainties. However, the data quality for the selected catchments were deemed good by the water agency managers during low flows, intermediate flows and high flows and it is not easy to find indicators related to the quality of

low–flow data. Therefore, we recommend using the mean and thus putting the same weight on $KGE(Q)$ and $KGE(1/Q)$.

3.3.6 Temporal robustness

We first evaluated the temporal robustness of the model parameters calibrated by $KGE(Q^{0.5})$ and by the combination of $KGE(Q)$ with $KGE(1/Q)$. Figure 3.16 shows the results with the simulation in calibration, for the wet and dry periods, and in validation for these two periods. The loss in performance between calibration and validation for all seven assessment criteria was a little greater with the combined objective functions – 0.01 for MAR and seasonality and 0.07 for the low–flow indices – than with $KGE(Q^{0.5})$ – between 0.01 and 0.05. However, MAM3(5), MAM10(5), QMNA(5) and Q95 were better simulated in validation with the combined objective function.

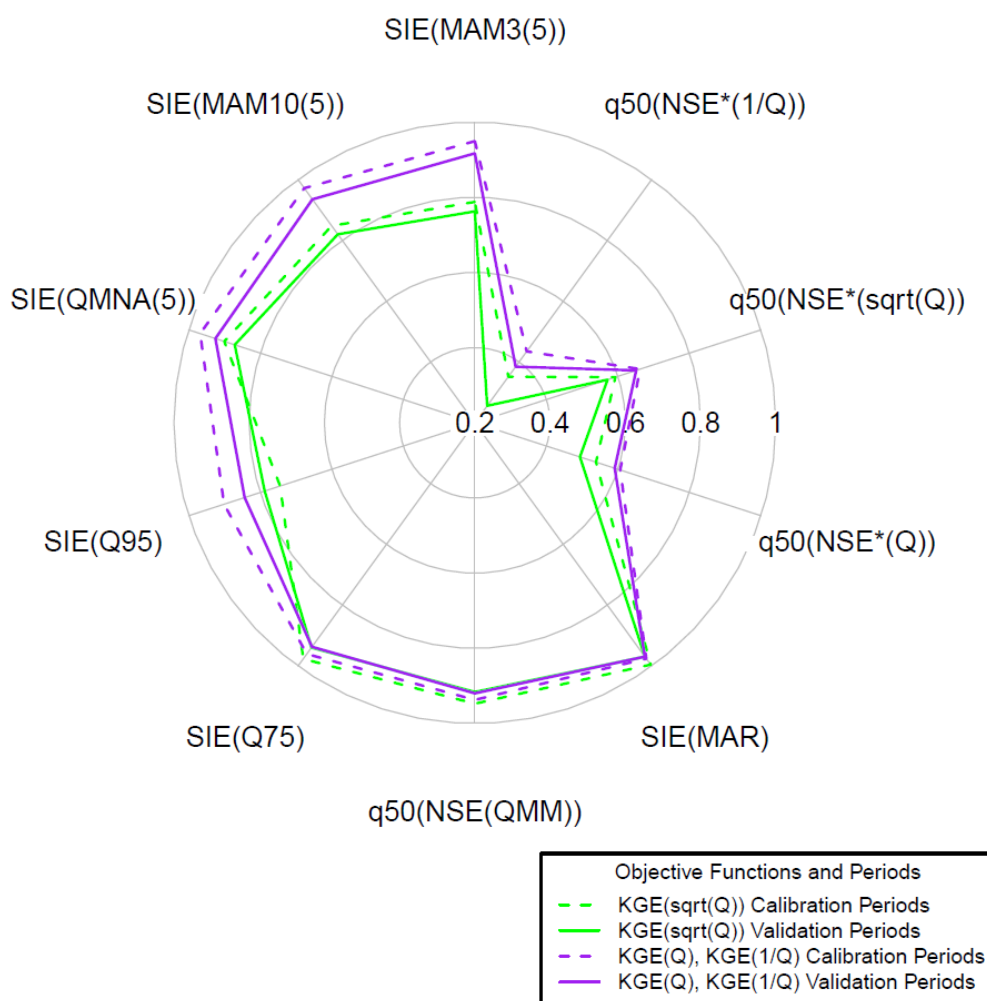


Figure 3.16: Assessment of temporal robustness. Radial plot showing the results in calibration for the two periods (dry and wet periods) and in validation for the two periods for the two objective functions, $KGE(\sqrt{Q})$ and the combination of $KGE(Q)$ and $KGE(1/Q)$.

Figure 3.17 shows the distribution of the relative errors of the MAR simulations with each objective function and for each period. We observed that when calibrating on the wet period, the MAR were overestimated on the dry validation period. The opposite was observed when calibrating on the dry period and validated on the wet period. The same trend was observed for the other assessment criteria. This lack of robustness was more important for mountainous catchments where the climate variability was higher. However, this lack of robustness is relatively independent of the objective function.

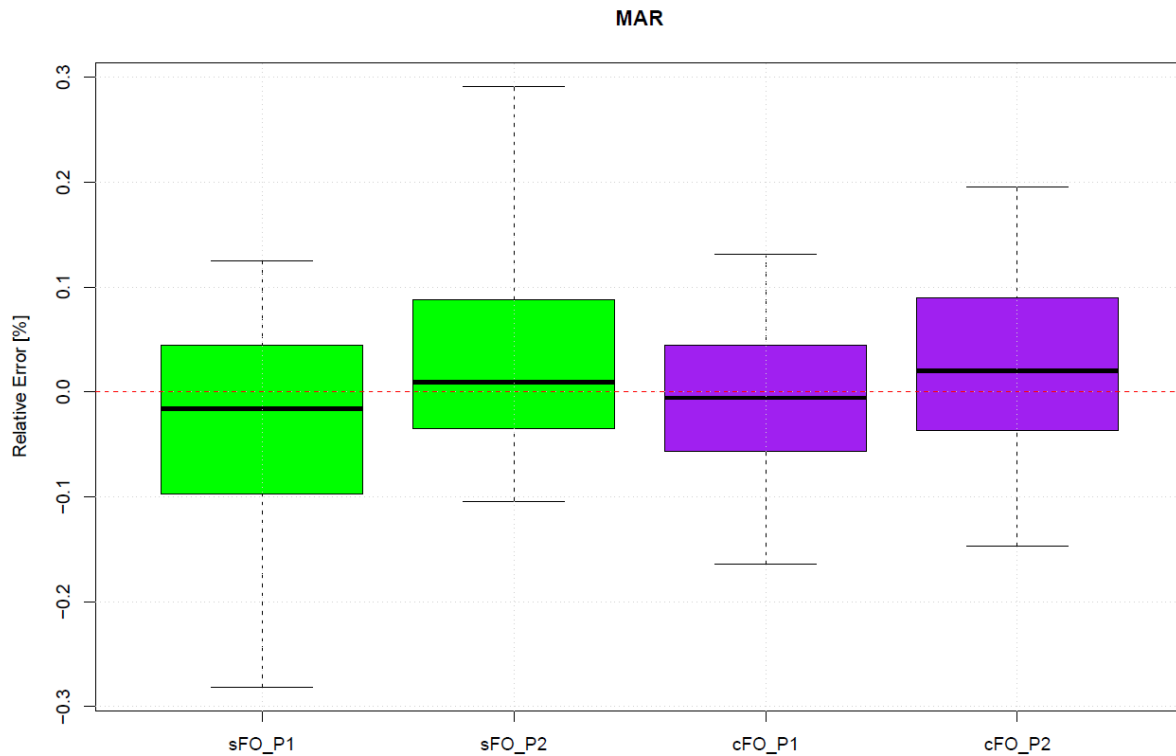


Figure 3.17: Box plot of distribution of MAR obtained in validation (P1: calibration on dry period, P2: calibration on wet period) with the two objective functions, $KGE(\sqrt{Q})$ (called sFO) and the combination of $KGE(Q)$ and $KGE(1/Q)$ (called cFO) over the entire catchment set (boxes represent the 0.25 and 0.75 percentiles, with the median value inside, and the whiskers represent the 0.05 and 0.95 percentiles).

3.3.7 Comparison with the six parameter model TOPMO

Figure 3.18 shows the radial plot results for the two objective functions, $KGE(Q^{0.5})$ and the combination between $KGE(Q)$ and $KGE(1/Q)$ for the two models, GR4J and TOPMO, in validation. We observed that the low–flow indices were better simulated when calibrating the models with the combination of $KGE(Q)$ and $KGE(1/Q)$ than with $KGE(Q^{0.5})$ and the calibration with these two objective functions gave the same results for the simulations of the seasonality and MAR. Looking at the continuous simulations, we observed that for high and intermediate flows, the medians of the distributions of $NSE^*(Q)$ and $NSE^*(Q^{0.5})$ were the same whatever the objective function. However, for low–flow simulations, the simulations were better with the objective function combining $KGE(Q)$ and $KGE(1/Q)$, especially for TOPMO. Whatever the objective functions, the low-flow indices were as good simulated by GR4J as by TOPMO. The MAR was slightly better simulated by GR4J. The hydrographs for the mountainous catchments were indeed not as well simulated with this version of TOPMO.

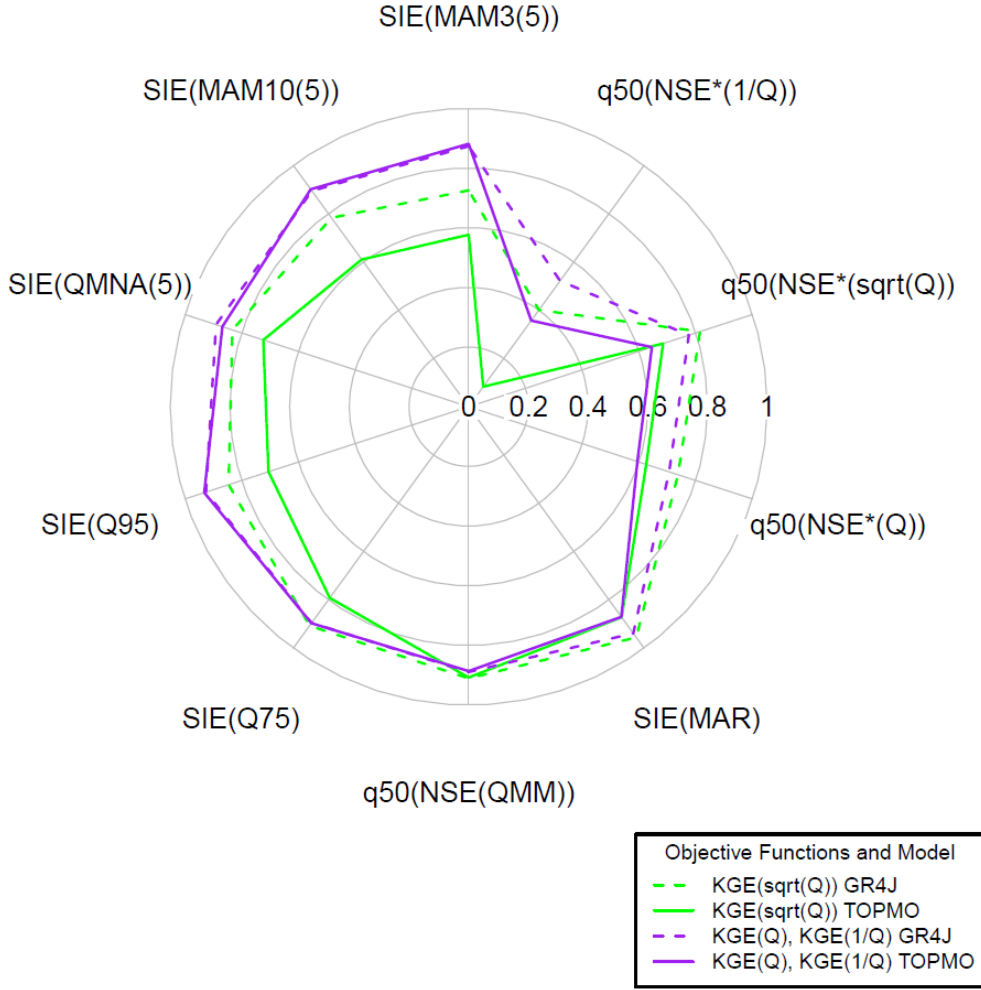


Figure 3.18: Radial plot showing the results in validation for the two objective functions, $KGE(\sqrt{Q})$ and the combination of $KGE(Q)$ and $KGE(1/Q)$ and the two models, GR4J and TOPMO.

3.4 Conclusions

This study aimed at identifying the best objective function to simulate low-flow indices in order to calibrate the parameter set of a rainfall-runoff model to estimate these statistics. First, the seven assessment criteria were used as the objective function. The results of this test suggest that this objective function was not robust, giving quite good results in calibration but relatively poor results in validation. Then, six single objective functions and 15 combinations of these single objective functions were tested on a large sample of 691 catchments of various hydro-meteorological regimes throughout France. The results of our tests suggest that a combination as the mean of two single objective functions, $KGE(Q)$ and $KGE(1/Q)$, improved the simulation of these seven assessment criteria. The quality of the simulations for very different calibration and validation periods did not decrease excessively and was dependent

on the climate variability of the catchments rather than the choice of the objective function. When testing the best single objective function and the best combination with an alternative rainfall–runoff model, the same conclusions were observed, suggesting that the results do not depend on the rainfall–runoff model used. Therefore, we recommend using the mean of $KGE(Q)$ and $KGE(1/Q)$ as an objective function to simulate low–flow indices with continuous conceptual rainfall–runoff models.

The objective function calculated on the seven assessment criteria showed results that were not robust while the combined objective functions were. A perspective of our study would be to combine the objective function calculated on the assessment criteria and on the temporal goodness-of-fit to keep the dynamic of the hydrographs.

While the results presented in this paper seem to be relatively general regarding to the model used, it should be noted that both tested rainfall–runoff models were not developed specifically for low–flow simulations and thus their structure and parametrization might not be the best suited for low–flow simulations. Olsen *et al.* (2013) showed that modifying the structure of a typical hydrological model to fit the low–flow simulations might better improve low–flow simulation than modifying the objective function.

The choice of an objective function for low–flow index simulations is strictly restricted to gauged catchments. For ungauged catchments, hydrological models are commonly used to derive streamflow indices at ungauged sites by transferring model parameters from gauged to ungauged catchments. Thus the choice of the objective function used for the gauged catchments might influence the simulation of the regionalized model on ungauged sites. However there is a high probability that the model parameter transfer from gauged to ungauged catchments will carry much more uncertainties than the choice of the objective function used in gauged catchments. A natural perspective of our study would be to test the sensitivity of the objective function in ungauged catchments.

Acknowledgments

The authors wish to thank Météo–France for providing the meteorological data. We also wish to thank the two anonymous reviewers and the associate editor for their constructive comments on a previous version of this article which help improve the paper.

Synthèse du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons cherché à déterminer une fonction objectif adaptée à la simulation des indices d'étiage et de la saisonnalité. Dans un premier temps, nous avons défini une fonction objectif constituée des sept critères d'évaluation. Il est apparu que celle-ci n'est pas assez robuste. Dans un second temps, le choix s'est porté sur des fonctions objectif simples qui portent le poids sur les faibles débits, sur les forts débits, ou sur les débits intermédiaires. Ces fonctions objectif permettent une bonne simulation de certains indices suivant la fonction objectif choisie mais pas de tous les critères d'évaluation souhaités. Toutes les combinaisons entre deux fonctions objectif simples ont ensuite été testées. Nous avons ainsi trouvé que la moyenne entre une fonction objectif donnant un fort poids aux faibles débits, $KGE(1/Q)$, et une fonction objectif donnant un fort poids aux forts débits, $KGE(Q)$, permet de bien simuler tous les indices d'étiage et la saisonnalité. Cette fonction objectif est gardée dans toute la suite, pour le développement de la structure du modèle pluie-débit puis la régionalisation des paramètres du modèle.

4 Développement de la structure journalière de LoiEau

4.1 Introduction

Il existe une multitude de modèles pluie-débit et le choix du modèle utilisé dépend de l'application souhaitée, par exemple la modélisation des pics de crue ou de chroniques journalières, de l'expérience de l'utilisateur ou des données disponibles. Les modèles pluie-débit peuvent être classés en trois grandes catégories en fonction du choix effectué pour décrire les différents processus hydrologiques : les modèles à base physique, les modèles empiriques et les modèles conceptuels. Les modèles à base physique, par exemple le modèle SWAT (Arnold *et al.*, 1998 ; Gassman *et al.*, 2007) utilisent les différentes équations physiques régissant les différents processus à l'échelle des bassins versants : relations de conservation, équations de Barré de Saint Venant, ... Les paramètres de ces modèles sont en principe mesurables mais ce n'est souvent pas le cas et ces paramètres ont alors besoin d'être calés. Les modèles empiriques, de type « boîtes noires », consistent en différentes relations mathématiques établis entre les données d'entrée, la pluie, et de sortie, le débit. Cette catégorie de modèle ne permet pas de différencier et de modéliser les différents processus hydrologiques qui expliquent la relation pluie-débit. La dernière catégorie de modèle consiste à penser le bassin versant de manière conceptuelle. Comme expliqué dans le paragraphe 1.2, cela revient à le décrire à l'aide de réservoirs interconnectés qui représentent les différents systèmes de recharge, de stockage et de vidange présents sur le bassin. Les modèles conceptuels dépendent de paramètres à caler qui contrairement aux modèles à base physique n'ont pas un sens physique dans le sens commun du terme.

Cette dernière catégorie de modèle hydrologique est généralement choisie lorsque l'utilisateur travaille sur un grand échantillon de bassins versants et que l'objectif de la modélisation est à des fins opérationnelles. L'inconvénient reste cependant que suivant la complexité du modèle, ils ne permettent pas une bonne représentation des différents processus jouant un rôle à l'échelle du bassin versant.

Les modèles hydrologiques peuvent utiliser différentes représentations spatiales du bassin versant. Ainsi la représentation la plus facile à implémenter consiste à considérer le bassin versant comme une entité spatiale homogène. La variabilité spatiale des processus jouant un rôle au sein du bassin versant n'est pas prise en compte. Il s'agit de modèles dits globaux. A l'inverse, les modèles distribués découpent le bassin versant en différentes entités spatiales, sous la forme de sous-bassins versants ou de maillage régulier. C'est par exemple le

cas du modèle TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979) qui utilise des Unités Hydrologiques Représentatives (UHR) définies sur la base d'un indice de similitude topographique calculé en tout point à partir de la pente locale et de la surface amont drainée. Ces UHR ont par hypothèse les mêmes processus hydrologiques dominants. D'autres modèles utilisent une représentation spatiale intermédiaire. Certains processus sont alors modélisés à l'échelle du bassin versant et d'autres à l'échelle de différentes entités spatiales. Il s'agit de modèles dits semi-distribués. Les modèles distribués ont l'avantage de pouvoir représenter l'hétérogénéité spatiale des différents processus (Reszler *et al.*, 2008). Les modèles globaux peuvent être cependant plus performants lorsqu'il est difficile de séparer les différents écoulements (Atkinson *et al.*, 2002 ; Fenicia *et al.*, 2008).

Les modèles hydrologiques peuvent enfin être différenciés suivant leur échelle temporelle. Suivant l'application souhaitée, un modèle événementiel ou un modèle continu peut être choisi. Le premier type de modèle est surtout utilisé pour la prévision des crues pour simuler la réponse d'un bassin versant à un événement pluvieux. C'est par exemple le cas du modèle GR3H (Fourmigué et Lavabre, 2005). Le second type de modèle permet de modéliser les débits en continu et est utilisé dans le cadre de la simulation de l'hydrogramme complet ou lorsque nous cherchons à simuler des processus lents comme ceux intervenant lors de l'étiage. Le choix du pas de temps dépend aussi des processus à modéliser, du pas de temps infra-horaire pour la simulation du pic de crue au pas de temps mensuel ou annuel pour des processus beaucoup plus lents.

Nos travaux présentés dans ce chapitre sont orientés pour la simulation de plusieurs indices d'étiage pour un large échantillon de bassins versants, 691 bassins, et à des fins opérationnelles. Le choix s'est porté sur une structure unique pour pouvoir modéliser la grande variété de régimes hydrométéorologiques qui existent. Nous nous orientons donc sur un modèle conceptuel, global et continu.

De nombreux travaux de recherche ont permis d'étudier et de développer un grand nombre de structures de modèles conceptuels globaux (Perrin, 2000). Au pas de temps mensuel, nous pouvons citer le modèle ORCHY (Gille et Lang, 2003) utilisé pour la prévision des étiages en Lorraine, le modèle ABCD (Thomas, 1981) très utilisé aux Etats-Unis et le modèle GR2M LoiEau (Folton et Arnaud, 2012) développé par l'Irstea et utilisé en France par les hydrologues des DREAL et des Agences de l'Eau pour la simulation du QMNA(5) et du module interannuel, QA. Au pas de temps journalier, nous pouvons citer parmi de nombreux

modèles, les modèles GR6J (Pushpalatha *et al.*, 2011), IHACRES (Jakeman *et al.*, 1990), GARDENIA (Thiéry, 2009), MORDOR (Garçon, 1999 ; Mathevet *et al.*, 2010), une version modifiée de GR3J par Lang (2007) et HBV (Bergström, 1976 ; Engeland et Hisdal, 2009). Certains de ces modèles ont été développés ou sont utilisés dans un contexte de prévision de l'étiage et sont souvent très paramétrés pour permettre une bonne simulation de la courbe de tarissement.

Notre objectif est de déterminer une structure au pas de temps journalier, avec un minimum de deux paramètres libres afin de diminuer les problèmes d'équifinalité des paramètres pour ensuite régionaliser ces paramètres et estimer des indices d'étiage à partir des chroniques journalières de débits simulés en contexte non jaugé. L'objectif opérationnel de la thèse a contraint le choix de ne pas partir de la structure d'un modèle journalier existant et de l'adapter tout en réduisant le nombre de paramètres libres mais de partir de la structure du modèle mensuel GR2M LoiEau (noté LoiEauM par la suite). Ce modèle a été développé pour la simulation d'indices d'étiages calculés sur un intervalle de temps mensuel, QMNA et QMNA(5), et la simulation du module interannuel, QA. LoiEauM dispose de seulement deux paramètres qui ont été régionalisés sur toute la France (Folton et Lavabre, 2006 ; Folton et Arnaud, 2012). La méthodologie utilisée pour le développement au pas de temps journalier de la structure et pour l'évaluation de ses performances est expliquée dans la suite de ce chapitre. Les résultats sont ensuite présentés et discutés.

4.2 Méthodologie

Les données, l'échantillon de bassins versants et le calcul des différents indices d'étiage ont déjà été présentés dans les chapitres 2 et 3. Dans cette partie, nous décrivons le modèle LoiEauM et la méthodologie développée pour déterminer pas à pas la structure journalière du modèle.

Présentation du Modèle LoiEauM

Historiquement, le modèle LoiEauM a été créé pour l'estimation du QMNA(5) et du module interannuel, QA, dans la région méditerranéenne, en contextes jaugés et non jaugés (Folton et Lavabre, 2000 ; 2001c ; 2001b ; 2001a ; 2001d ; 2002). Le modèle et la régionalisation de ses paramètres ont ensuite été étendus et modifiés pour estimer ces mêmes indices dans d'autres régions, Limousin, Auvergne (Folton et Lavabre, 2003a ; 2003b ; 2003d ; 2003c ; 2004a ; 2004b), Adour-Garonne (Folton et Lavabre, 2005) et Seine-Normandie (Folton, 2008 ; 2009b). La version actuelle du modèle a été régionalisée sur la France entière (Folton, 2009a ; 2010 ; Folton et Arnaud, 2012). La structure du modèle LoiEauM est présentée dans la Figure 4.1 et expliquée dans la suite. Une description plus complète du modèle est détaillée dans l'Annexe 2.2.

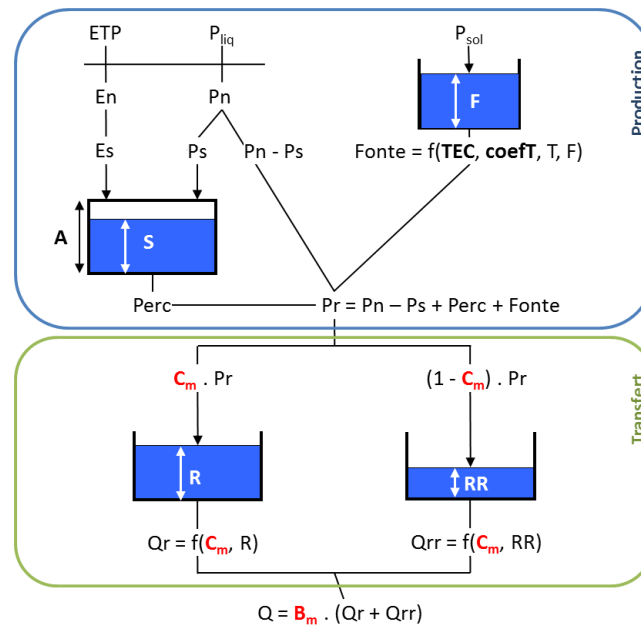


Figure 4.1 : Schéma de la structure du modèle LoiEauM (ETP : évapotranspiration potentielle ; P_{liq} : précipitation liquide ; P_{sol} : précipitation solide ; Q : débit ; A , B_m et C_m : paramètres du modèle pluie-débit ; TEC et coeffT : paramètres du module de neige ; les autres notations correspondent à des variables d'état internes au modèle).

La fonction de production du modèle LoiEauM fonctionne au pas de temps journalier et est sensiblement la même que celle de GR4J. La pluie efficace, Pr , et l'évapotranspiration actuelle sont fonction de la hauteur d'eau du réservoir de production, S , de la pluie nette, P_n , et de la capacité maximale du réservoir de production, A (mm). Folton (2009a) a régionalisé et cartographié le paramètre A sur toute la France et la Corse à l'échelle de la maille SAFRAN en fonction de l'hydrogéologie (Figure 4.2). Ce module de production est distribué à la maille SAFRAN. La quantité journalière de pluie efficace et les variations journalières de la hauteur d'eau du réservoir de production sont estimées à l'échelle de chaque pixel.

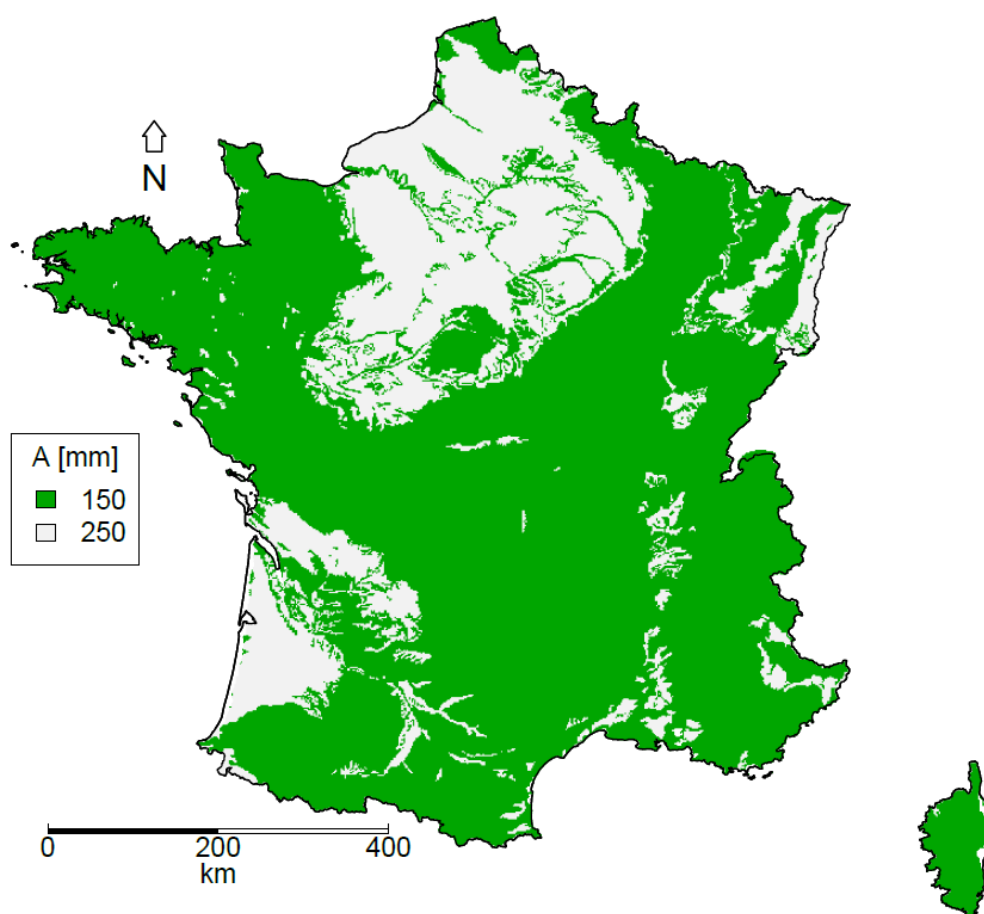


Figure 4.2 : Cartographie du paramètre A en France et en Corse.

La pluie efficace, Pr , est ensuite agrégée au pas de temps mensuel et à l'échelle du bassin versant. Elle est ensuite divisée en deux composantes. Cette séparation des écoulements est fonction du paramètre C_m . La première partie de la pluie efficace est acheminée par un réservoir linéaire représentant l'écoulement de base et la seconde partie par un second réservoir linéaire représentant l'écoulement de surface. Les lois de vidanges linéaires de chacun des deux réservoirs sont fonctions du paramètre C_m . Le débit final est la

somme de ces deux composantes, corrigée par un coefficient B_m qui permet de prendre en compte les apports et gains souterrains, infiltrations et échanges souterrains potentiels, à l'échelle du bassin versant.

Ce modèle est associé à un module de neige à deux paramètres. Les précipitations solides sont dirigées vers un réservoir représentant le stock de précipitations solides. La loi de vidange de ce réservoir est inspirée de la formule degré-jour couramment utilisée en hydrologie opérationnelle (Etchevers, 2000 ; Valéry, 2010). Cette loi de vidange possède deux paramètres, une température de fonte (TEC) et un coefficient de vidange (coefT). Ces deux paramètres sont régionalisés : la température de fonte, TEC, est imposée à -1°C sur toute la France et le second paramètre, coefT, est régionalisé par massif. Ce module est distribué. Il fonctionne au pas de temps journalier à l'échelle du pixel SAFRAN. La lame d'eau issue de la fonte est ensuite ajoutée à la pluie efficace pour être routée par les deux réservoirs de transfert.

4.2.1 Développement de la structure journalière

La fonction de production de LoiEauM est déjà au pas de temps journalier. Elle sera donc gardée telle quelle. Nous nous orientons vers un modèle global et préférons donc garder cette fonction de production à l'échelle du bassin versant plutôt qu'à l'échelle du pixel. Par la suite, nous parlerons de LoiEauJ lorsque nous discuterons d'une version journalière du modèle.

Notre objectif de modélisation est la simulation de différents indices d'étiage. Ces indices sont des statistiques majoritairement issues de moyennes glissantes calculées sur divers intervalles de temps ou de la courbe des débits classés. Contrairement à la prévision de l'étiage, la temporalité de la chronique des débits n'est donc pas une obligation pour notre objectif de modélisation. Nous faisons donc l'hypothèse de ne pas ajouter d'hydrogramme unitaire dont le temps de base est un paramètre à caler, ni de paramètre simulant le retard de l'écoulement.

Modèle 1 : La structure du modèle mensuel est-elle adaptée à la modélisation journalière ?

Nous évaluerons dans un premier temps si la structure actuelle de LoiEauM peut être utilisée telle quelle au pas de temps journalier, à savoir avec une fonction de transfert composée de deux réservoirs linéaires en parallèle (Figure 4.3). Les paramètres de vidange de chacun des réservoirs linéaires de transfert, C_1 et C_2 , seront laissés libres et calés pour modéliser les processus hydrologiques journaliers. Ces paramètres sont liés à la vidange respectivement du réservoir représentant l'écoulement de base et du réservoir représentant l'écoulement de surface. Le paramètre D de séparation des écoulements sera gardé et calé dans cette version du modèle. Dans un deuxième temps, nous évaluerons la pertinence du paramètre B pour le modèle journalier et la régionalisation du paramètre A pour cette structure.

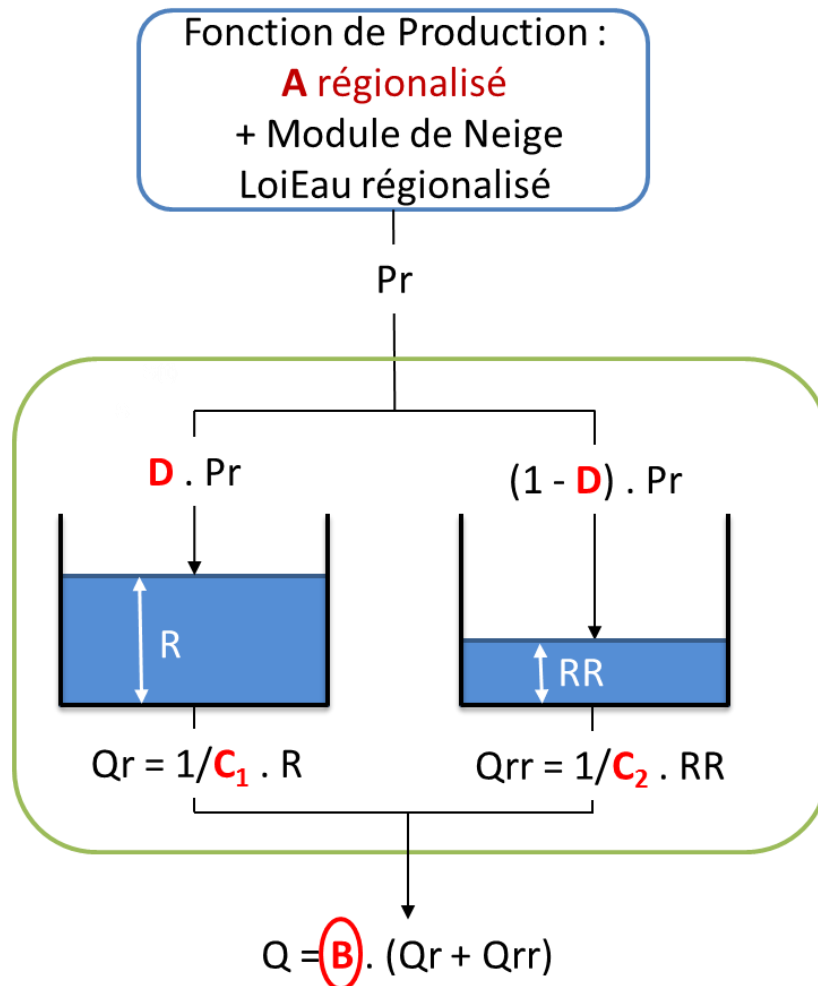


Figure 4.3 : Schéma de la première structure du modèle journalier LoiEauJ testée (A : capacité maximale du réservoir de production (mm) ; Pr : pluie efficace ; Q : débit ; B , C_1 , C_2 et D : paramètres du modèle pluie-débit ; les autres notations correspondent à des variables d'état internes au modèle).

Modèle 2 : Fonction de transfert à un seul réservoir

La procédure privilégiée pour développer la structure de la fonction de transfert consiste à commencer par une fonction de transfert très simple puis de la complexifier pas à pas, tout en préservant un maximum de deux paramètres libres pour cette fonction de transfert (Figure 4.4).

Dans un premier temps, nous testerons une fonction de transfert composée d'un seul réservoir. Celle-ci possède uniquement un paramètre calé qui dépend de la loi de vidange du réservoir. Les lois de vidanges testées seront :

- la loi de vidange linéaire, vidange des réservoirs de transfert de LoiEauM,
- la loi de vidange quadratique, vidange de la première structure de GR3J (Edijatno *et al.*, 1999),
- les lois de vidange avec une puissance supérieure à 3,
- la loi de vidange exponentielle, vidange qui permet une meilleure modélisation de la courbe de tarissement de l'hydrogramme.

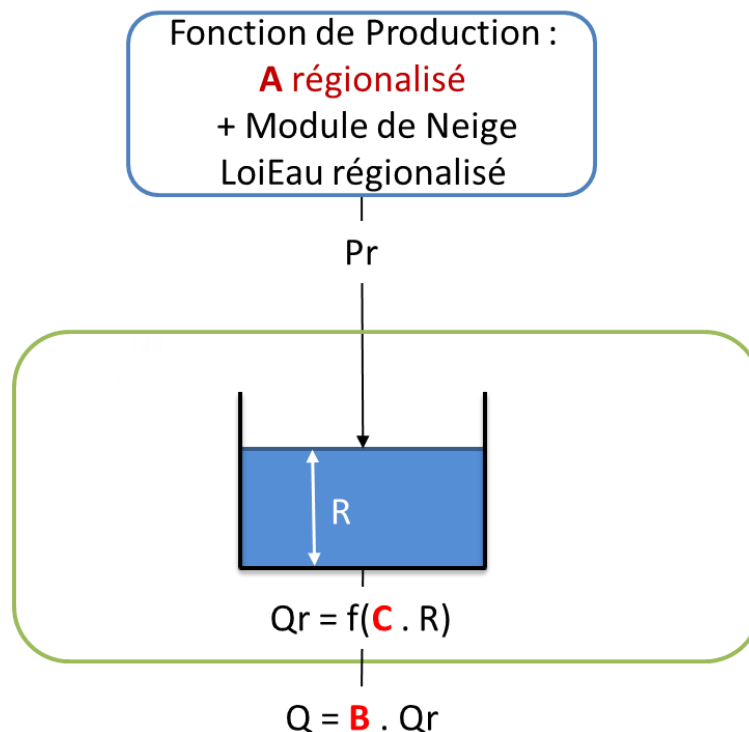


Figure 4.4 : Schéma de la deuxième structure du modèle journalier LoiEau testée (A : capacité maximale du réservoir de production (mm) ; Pr : pluie efficace ; Q : débit ; B et C : paramètres du modèle pluie-débit ; les autres notations correspondent à des variables d'état internes au modèle).

Modèle 3 : Rajout d'une composante directe de l'écoulement

Dans un deuxième temps, une composante directe sera rajoutée à la fonction de transfert composée du réservoir de transfert avec la meilleure vidange déterminée à l'étape précédente. Cette composante permet une différenciation entre la modélisation d'un écoulement de base et celle d'un écoulement de surface.

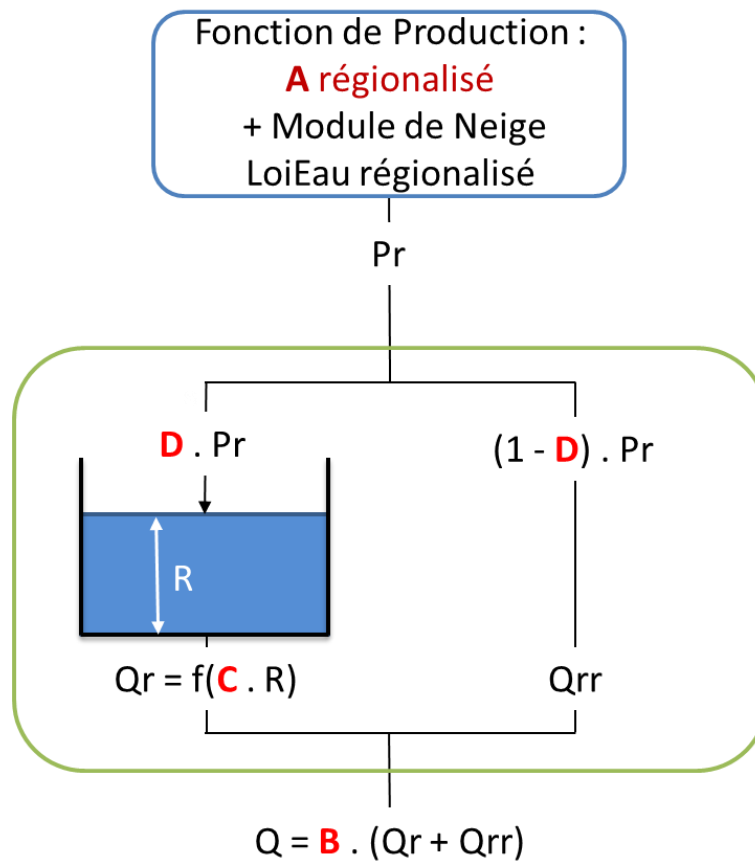


Figure 4.5 : Schéma de la troisième structure du modèle journalier LoiEau testée (A : capacité maximale du réservoir de production (mm) ; Pr : pluie efficace ; Q : débit ; B, C et D : paramètres du modèle pluie-débit ; les autres notations correspondent à des variables d'état internes au modèle).

Modèle 4 : Capacité maximale du réservoir de production

Une fois la structure de LoiEauJ à deux paramètres déterminée, nous évaluerons la pertinence de la valeur de A qui avait été calée puis régionalisée pour le modèle mensuel. Ce paramètre sera laissé libre afin de comparer les performances en contexte jaugé d'une structure de LoiEauJ à deux paramètres libres par rapport à une structure de LoiEauJ à trois paramètres libres. Les performances de ces deux structures en contexte non jaugé seront comparées dans les chapitres 5 et 6.

Les différents tests sur le développement de la structure journalière de LoiEauJ sont résumés dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Résumé des différents tests sur la structure du modèle journalier LoiEauJ.

Modèles	Tests	Production	Paramètre correctif B	Réservoir de transfert	Ecoulement direct	Nombre de paramètres
Modèle 1	Test 1.a	A régionalisé		2 réservoirs linéaires		3
	Test 1.b	A régionalisé	✓	2 réservoirs linéaires		4
	Test 1.c	A calé		2 réservoirs linéaires		4
	Test 1.d	A calé	✓	2 réservoirs linéaires		5
Modèle 2	Test 2.a	A régionalisé	✓	1 réservoir, vidange linéaire		2
	Test 2.b	A régionalisé	✓	1 réservoir, vidange exponentielle		2
	Test 2.c	A régionalisé	✓	1 réservoir, vidange quadratique		2
	Test 2.d	A régionalisé	✓	1 réservoir, vidange puissance 3		2
	Test 2.e	A régionalisé	✓	1 réservoir, vidange puissance 4		2
	Test 2.f	A régionalisé	✓	1 réservoir, vidange puissance 5		2
Modèle 3	Test 3	A régionalisé	✓	1 réservoir (meilleure vidange)	✓	2
Modèle 4	Test 4	A calé	✓	1 réservoir (meilleure vidange)	✓	3

4.2.2 Méthodes d'évaluations

L'évaluation des différentes structures du modèle LoiEauJ est basée sur une approche classique de « split-sample-test » expliquée dans le chapitre 3. Les paramètres des différentes structures seront calés à l'aide de l'algorithme de calage expliqué dans le chapitre 3 et à l'aide de la fonction objectif déterminée dans le chapitre précédent : la moyenne entre le $KGE(Q)$ et le $KGE(1/Q)$.

Les critères choisis pour comparer et évaluer les structures sont des critères calculés sur les différents indices d'étiage, la saisonnalité, le module interannuel et des critères calculés sur les simulations continues. Les critères calculés sur les différents indices sont expliqués au paragraphe 3.2.3.2. Nous souhaitons évaluer les simulations continues même si les différentes structures de LoiEauJ ne comportent pas d'hydrogramme unitaire, ni de paramètre simulant le retard de l'écoulement. Pour cela, les critères C2M (présentés et notés avec la notation anglaise NSE* dans le chapitre 3) calculés sur les débits, la racine-carrée des débits et l'inverse des débits sont calculés sur des chroniques simulées translatées dans le temps de plus ou moins 3 jours. Ces critères seront notés $C2M_3(Q)$, $C2M_3(Q^{0.5})$ et $C2M_3(1/Q)$ dans la suite. Suivant les paragraphes, les résultats sont analysés à l'aide d'un radial plot ou à l'aide de représentations sous forme de boîtes à moustaches pour évaluer les distributions des erreurs sur l'ensemble de l'échantillon de bassins versants. Le premier cas d'analyse a été expliqué dans le chapitre 3. Dans le second cas, pour les critères basés sur la saisonnalité et les simulations continues, les distributions des C2M ou $C2M_3$ ont été tracées. Pour les indices d'étiage et le module interannuel, au lieu de calculer un SIE donnant une seule valeur pour une simulation et pour un indice, nous avons calculé, pour chaque simulation, chaque indice d'étiage et chaque bassin versant, une erreur relative entre l'indice simulé et l'indice observé. Nous avons alors pu tracer la distribution de ces erreurs relatives pour l'ensemble de l'échantillon de bassins versants et pour chaque indice. Le Tableau 4.2 résume ces critères.

Tableau 4.2 : Descriptions des différents critères de validation.

Nom	Description
Débits caractéristiques d'étiage	
Err(VCN3(5)) ou SIE(VCN3(5))	Erreurs relatives ou SIE calculés sur le VCN3(5), Volume Consécutif Minimal pour 3 jours à T = 5 ans
Err(VCN10(5)) ou SIE(VCN10(5))	Erreurs relatives ou SIE calculés sur le VCN10(5), Volume Consécutif Minimal pour 10 jours à T = 5 ans
Err(QMNA(5)) ou SIE(QMNA(5))	Erreurs relatives ou SIE calculés sur le QMNA(5), Débit Mensuel Minimal Annuel à T = 5 ans
Err(Q95) ou SIE(Q95)	Erreurs relatives ou SIE calculées sur le Q95, débit dépassé 95% du temps
Err(Q75) ou SIE(Q75)	Erreurs relatives ou SIE calculées sur le Q75, débit dépassé 75% du temps
Module interannuel	
Err(QA) ou SIE(QA)	Erreurs relatives ou SIE calculées sur le QA, module interannuel
Saisonnalité	
NSE(Q _{MM})	NSE calculé sur les 12 débits moyens mensuels
Simulations continues	
C2M ₃ (Q)	C2M calculé sur les débits, chroniques simulées translatées de +/- 3 jours
C2M ₃ (Q ^{0.5})	C2M calculé sur la racine-carré des débits, chroniques simulées translatées de +/- 3 jours
C2M ₃ (1/Q)	C2M calculé sur l'inverse des débits, chroniques simulées translatées de +/- 3 jours

Une fois la meilleure structure à deux paramètres libres de LoiEauJ déterminée, les simulations obtenues avec celle-ci seront comparées aux simulations issues du modèle GR4J. GR4J a été choisi car une comparaison de modèles globaux au pas de temps journalier a déjà été réalisée par Perrin (2000) et Mathevet (2005) afin d'identifier les structures les plus efficaces sur un grand échantillon de bassins versants. Le modèle GR4J a démontré sa grande robustesse lors de ces exercices de comparaison. Pour comparer les simulations issues de LoiEauJ et de GR4J avec des structures ayant le même nombre de paramètres, une version à 3 paramètres de GR4J a aussi été utilisée. Dans cette version, le temps de base de l'hydrogramme unitaire a été imposé à la valeur médiane sur l'échantillon de bassins versants, à savoir 2 jours. Nous aurions pu comparer le modèle LoiEauJ à GR6J qui a montré de meilleures performances pour la simulation des étiages en sites jaugés. Pour un objectif de simulations en sites non jaugés, nous avons préféré utiliser GR4J dans un souci de structures de départ peu paramétrées pour la régionalisation des paramètres.

Enfin, ces quatre structures, LoiEauJ à 2 et 3 paramètres et GR4J à 3 et 4 paramètres, seront comparées pour tester leur robustesse temporelle en calant les paramètres sur les 22 années les plus humides et en validant sur les 22 années les plus sèches puis en inversant ces périodes. Cette méthodologie, basée sur le calcul de l'indice d'aridité annuel, a été présentée dans le chapitre 3.

4.3 Résultats et discussions

Dans cette partie sont présentés les différents développements du modèle journalier LoiEauJ. Cette structure est développée pour la simulation de différents indices calculés sur des intervalles de temps journaliers à annuels. La structure finale est comparée à GR4J et sa robustesse temporelle est évaluée.

4.3.1 Structure à 2 réservoirs linéaires et pertinence des paramètres A et B

Nous évaluons dans un premier temps la pertinence de la structure mensuelle au pas de temps journalier, ainsi que la pertinence de la régionalisation du paramètre A et la pertinence du paramètre correctif B. Le Tableau 4.3 résume les résultats pour ces premiers tests. La signification des tests a été présentée dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.3 : Evaluation de la pertinence du paramètre B et de la régionalisation du paramètre en A en validation pour les deux sous-périodes. Les valeurs en gras correspondent aux valeurs maximales prises par chaque critère d'évaluation entre les quatre variantes du modèle 1.

Tests	SIE sur VCN3(5)	SIE sur VCN10(5)	SIE sur QMNA(5)	SIE sur Q95	SIE sur Q75	q ₅₀ sur NSE(Q _{MM})	SIE sur QA	q ₅₀ de C2M ₃ (Q)	q ₅₀ de C2M ₃ (Q ^{0.5})	q ₅₀ de C2M ₃ (1/Q)
1.a	0,78	0,79	0,78	0,84	0,78	0,70	0,75	0,51	0,56	0,31
1.b	0,85	0,85	0,85	0,90	0,88	0,89	0,94	0,60	0,63	0,34
1.c	0,79	0,80	0,79	0,85	0,79	0,75	0,81	0,54	0,57	0,31
1.d	0,88	0,89	0,89	0,92	0,90	0,87	0,94	0,59	0,64	0,36

Nous observons que l'absence du paramètre correcteur B, lorsque que le paramètre de production A est régionalisé, test 1.a, ou calé, test 1.c, ne permet pas une bonne restitution des différents indices d'étiage et surtout de la saisonnalité et du module interannuel. Ce paramètre joue donc un rôle important sur la simulation du bilan et de la saisonnalité et un rôle moindre sur la simulation de l'étiage. En regardant les résultats sur les simulations continues, nous observons que l'ajout du paramètre B, test 1.b, permet de mieux simuler l'hydrogramme en hautes eaux, C2M₃(Q), comme en basses eaux, C2M₃(1/Q).

La structure pour laquelle le paramètre correcteur B et le paramètre de production A, test 1.d, sont calés ne permet pas d'améliorer significativement les résultats par rapport à la structure où le paramètre A est régionalisé, test 1.b. Lorsque le paramètre A est imposé, les valeurs prises par les autres paramètres s'ajustent probablement pour compenser les erreurs introduites par la régionalisation du paramètre A.

La structure de LoiEauJ à deux réservoirs linéaires avec paramètre correcteur et paramètre A régionalisé possède 4 paramètres ce qui est supérieur à notre objectif de 2 paramètres. Plutôt que de partir de cette structure et d'essayer de réduire le nombre de paramètres en établissant des relations entre les paramètres ou en imposant les valeurs de certains paramètres, nous avons choisi de partir de la fonction de transfert la plus simple, à savoir un réservoir de transfert puis de complexifier cette structure.

Pour la suite, nous garderons donc le paramètre correcteur B qui sera calé et le paramètre A régionalisé. La régionalisation du paramètre A sera ultérieurement remise en question une fois la structure journalière de LoiEau développée et son impact sur la régionalisation des paramètres sera évalué dans le chapitre 5.

4.3.2 Structure à 1 seul réservoir : quelle loi de vidange pour le réservoir de transfert ?

Le Tableau 4.4 résume les résultats en validation pour les tests sur les six lois de vidange du réservoir de transfert en validation sur les deux sous-périodes (P1 : 01/01/1970-31/12/1991 et P2 : 01/01/1992-31/12/2013).

Tableau 4.4 : Evaluation des différentes lois de vidange pour un seul réservoir de transfert en validation pour les deux sous-périodes. Les valeurs en gras correspondent aux valeurs maximales prises par chaque critère d'évaluation entre les six variantes du modèle 2.

Tests	Vidange	SIE sur VCN3(5)	SIE sur VCN10(5)	SIE sur QMNA(5)	SIE sur Q95	SIE sur Q75	q ₅₀ sur NSE(Q _{MM})	SIE sur QA	q ₅₀ de C2M ₃ (Q)	q ₅₀ de C2M ₃ (Q ^{0.5})	q ₅₀ de C2M ₃ (1/Q)
2.a	linéaire	0,76	0,77	0,79	0,79	0,36	0,77	0,90	0,33	0,43	0,13
2.b	exponentielle	0,68	0,73	0,78	0,79	0,81	0,82	0,85	0,44	0,56	0,27
2.c	quadratique	0,83	0,83	0,82	0,86	0,79	0,86	0,92	0,50	0,57	0,29
2.d	puissance 3	0,88	0,90	0,88	0,90	0,86	0,86	0,93	0,52	0,59	0,36
2.e	puissance 4	0,88	0,90	0,88	0,90	0,87	0,86	0,93	0,52	0,59	0,36
2.f	puissance 5	0,88	0,90	0,89	0,91	0,88	0,86	0,93	0,51	0,59	0,37

Les lois de vidange linéaire et exponentielle semblent moins bien adaptées pour simuler les différents indices d'étiage, avec des valeurs de SIE entre 0,36 et 0,90, ainsi que la saisonnalité avec une médiane sur les NSE(Q_{MM}) entre 0,77 et 0,82. La loi de vidange

exponentielle, qui peut se rapprocher de la formule utilisée par Maillet (1905) pour modéliser la courbe de tarissement ne permet pas, dans le cas d'un réservoir unique de transfert, de bien modéliser les différents indices d'étiage. Ces deux lois de vidanges sont également peu performantes pour les simulations continues des hautes eaux comme des basses eaux. Ces deux lois de vidange donnent donc de mauvais résultats, et montrent qu'elles ne sont pas adaptées pour la simulation d'un débit à l'aide d'un réservoir unique de transfert. Elles sont donc éliminées pour la suite.

La loi de vidange quadratique donne de moins bons résultats que les structures avec des puissances supérieures pour la restitution des différents indices d'étiage et des simulations continues des basses eaux. Les trois lois de puissances, 3, 4 ou 5, donnent des résultats équivalents pour la simulation des indices d'étiage, de la saisonnalité, du QA ou des simulations continues. Nous avons comparé les simulations obtenues par chacune des lois de vidange en découpant l'échantillon de bassins suivant leur régime hydrologique : uniforme, pluvial, nival ou méditerranéen. Les distributions des erreurs relatives de trois indices d'étiage (VCN3(5), QMNA(5) et Q75) et du QA sont illustrées dans la Figure 4.6. Il est à noter que les valeurs du VCN3(5) issus des chroniques de débits observées sont très faibles, majoritairement inférieures à 1 mm/j et pour certains bassins, ces valeurs sont nulles. Les erreurs relatives sur le VCN3(5) sont alors élevées et parfois supérieures à 100%.

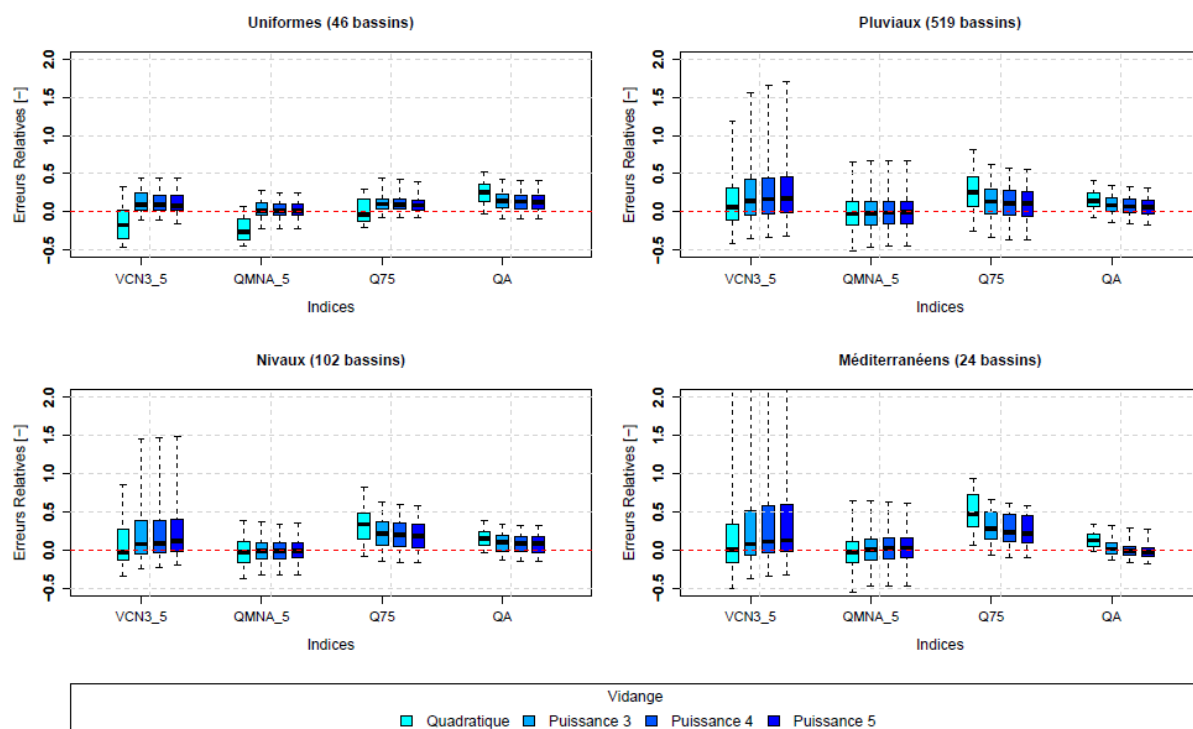


Figure 4.6 : Distribution des performances pour la simulation des indices d'étiage (VCN3(5), QMNA(5), Q75) et du QA pour les différents régimes hydrologiques (uniforme, pluvial, nival et méditerranéen) avec les différentes lois de vidange en validation. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut.

Avec la loi de vidange quadratique, les valeurs simulées des VCN3(5) et des QMNA(5) pour les bassins uniformes sont très sous-estimées avec des erreurs relatives médianes de -30%. Cependant, elle semble permettre une meilleure estimation du VCN3(5) pour les autres bassins (pluviaux, nivaux et méditerranéens) avec une médiane proche de 0. Cette tendance s'inverse lorsque nous évaluons la simulation du Q75. Pour les bassins uniformes, la médiane de la distribution des simulations avec la loi de vidange quadratique est centrée sur 0 mais elle est plus dispersée que les distributions des simulations avec les autres lois de vidange. Pour les autres bassins (pluviaux, nivaux et méditerranéens), les valeurs simulées du Q75 sont systématiquement surestimées avec la loi de vidange quadratique par rapport aux autres lois puissance. Quel que soit le régime hydrologique des bassins, les valeurs simulées du QA sont toujours surestimées lorsque les débits sont simulés par la loi de vidange quadratique. Ces résultats font écho aux comparaisons récentes entre structure générique et approche structurale plus flexible (Savenije, 2010).

La Figure 4.7 permet d'illustrer la distribution des performances pour la simulation de la saisonnalité et des simulations continues. Pour les bassins uniformes, toutes les simulations à l'aide de la loi de vidange quadratique sont moins bonnes qu'à l'aide des autres lois de

puissance. Pour les autres bassins versants, les performances sont équivalentes entre ces différentes lois de vidange pour les simulations continues mais la saisonnalité est moins bien simulée à l'aide de la loi de vidange quadratique.

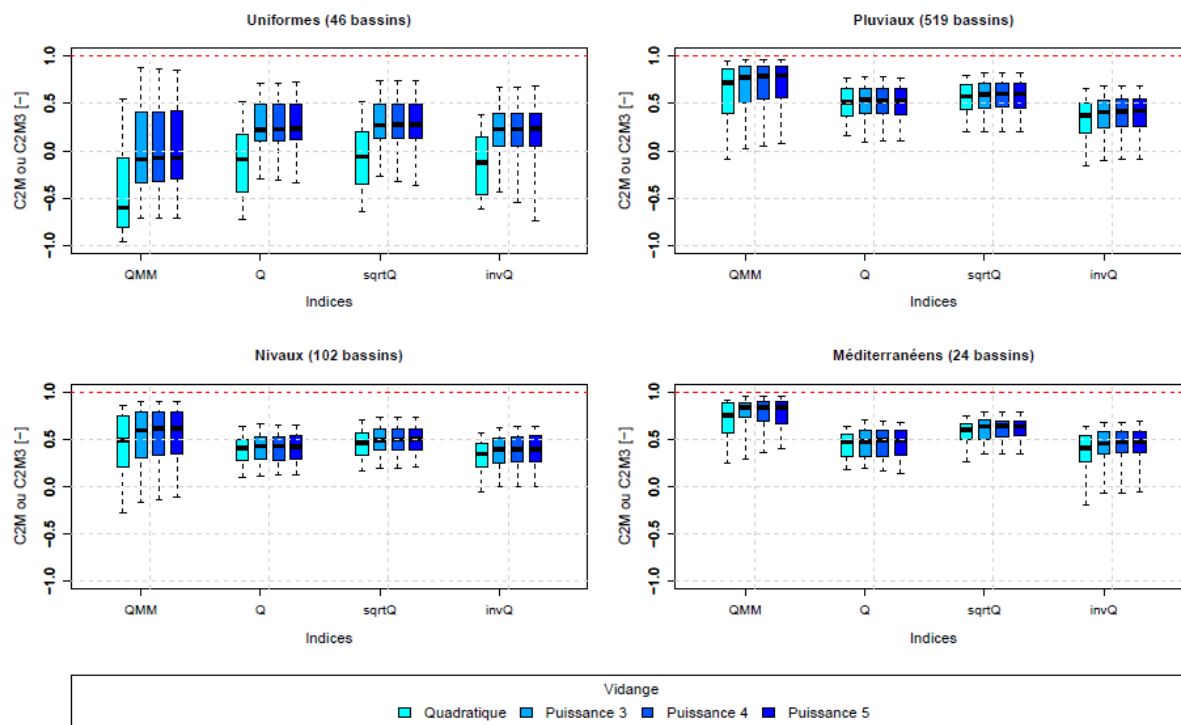


Figure 4.7 : Distribution des performances pour la simulation de la saisonnalité et des simulations continues pour les différents régimes hydrologiques (uniforme, pluvial, nival et méditerranéen) avec les différentes lois de vidange en validation. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut.

Ces différences entre la loi quadratique et les trois autres lois puissance s'expliquent par le fait que la loi quadratique est plus dynamique, c'est-à-dire que le réservoir de transfert se vidange beaucoup plus rapidement que les trois autres lois et ne permet donc pas de modéliser les bassins peu dynamiques dont les étiages sont particulièrement soutenus, comme les bassins uniformes. Un exemple est donné dans la Figure 4.8 (a) avec la simulation des débits pour l'année 2008 pour le bassin uniforme présenté dans le chapitre 2, l'Authie à Dompierr-sur-Authie (E5505730). Les hydrogrammes simulés par lois de vidange puissance 3, 4 et 5 sont équivalents et sont donc superposés sur la Figure 4.8 (a). La Figure 4.8 (b) permet d'illustrer les bassins méditerranéens à travers La Mimente à Florac (O3084320). La loi de vidange ne permet pas une bonne simulation de l'hydrogramme et les trois de puissance (3, 4 et 5) sont équivalentes.

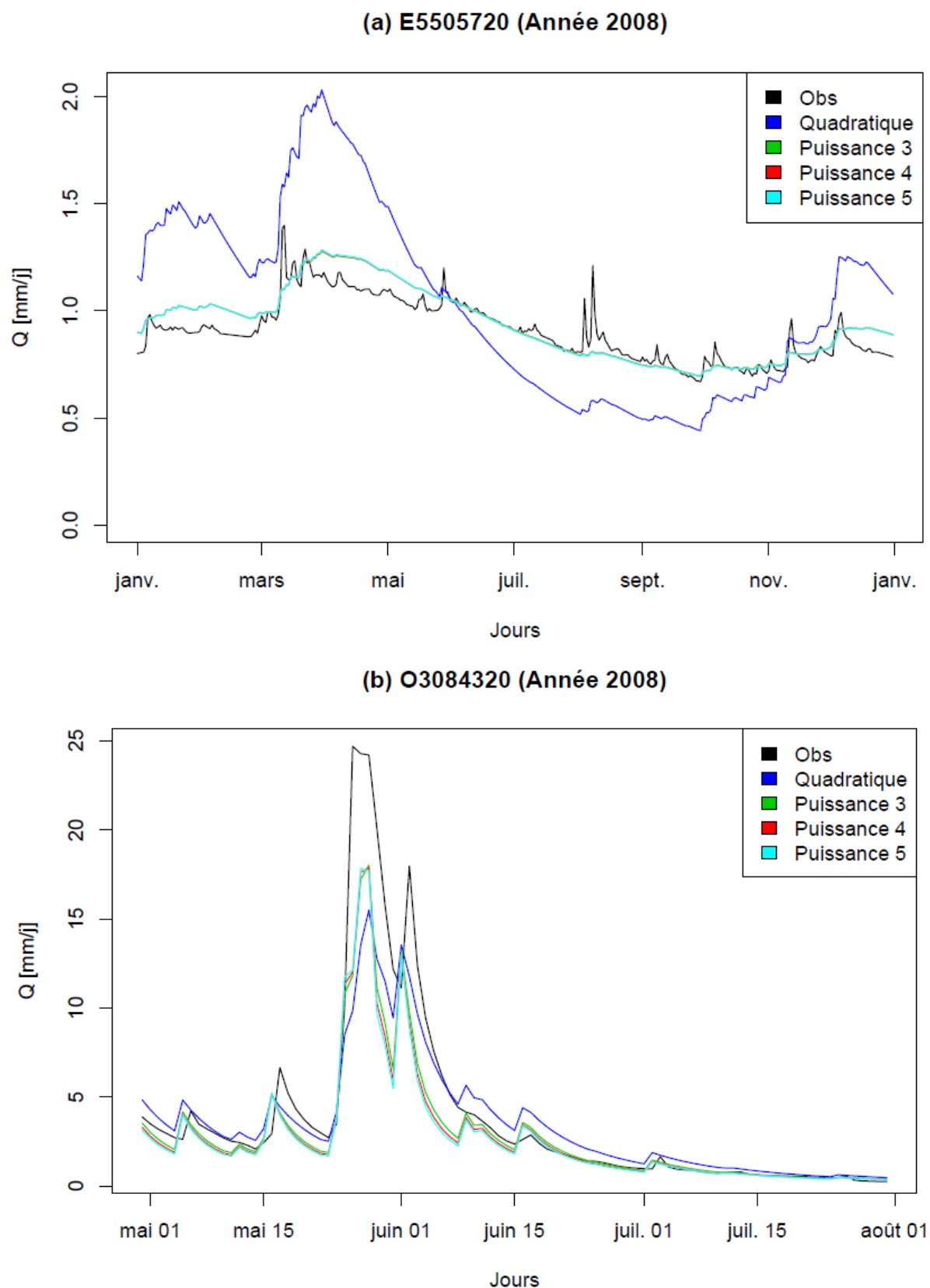


Figure 4.8 : Hydrogrammes observé et simulés par la loi de vidange quadratique ou les lois de vidange puissance pour l'année 2008 pour l'Authie à Dompierre-sur-Authie, E5505730 (a) et a Mimente à Florac, O3084320 (b).

Quel que soit le régime hydrologique des bassins versants, peu de différences sont observées entre les débits et différents indices simulés par les trois lois puissance, 3, 4 et 5. En effet, augmenter la puissance de la loi de vidange ne permet pas d'améliorer significativement la simulation de l'hydrogramme, en particulier la simulation de la courbe de tarissement. Par conséquent, nous choisissons la loi de vidange à la puissance 3.

4.3.3 Structure à un réservoir de transfert et une composante directe

Une fonction de transfert constituée d'un seul réservoir de transfert ne permet pas de bien simuler les débits de base ni de bien simuler les hydrogrammes des bassins uniformes. Nous souhaitons maintenant ajouter un écoulement direct en parallèle du réservoir de loi de vidange puissance 3 (Figure 4.5). Le paramètre qui gère le partage entre écoulement direct et écoulement de base, paramètre D dans la figure, a d'abord été laissé libre. Il peut prendre des valeurs comprises entre 0,1 et 0,9. Pour 80% des bassins de l'échantillon de référence, ce paramètre a été calé à la valeur 0,9. Pour les 20% restant, ce paramètre a pris des valeurs entre 0,1 et 0,89. Nous avons cherché à rattacher cette valeur du paramètre D à des caractéristiques descriptives de bassin versant ainsi qu'au BFI. Aucune relation satisfaisante n'a été trouvée et ce paramètre a donc été imposé à 0,9. Cette valeur de partage de l'écoulement est utilisée dans différentes versions des modèles GR3J et GR4J.

Tableau 4.5 : Evaluation en validation de l'apport d'une composante simulant l'écoulement direct dans la fonction de transfert. Les valeurs en gras correspondent aux valeurs maximales prises par chaque critère d'évaluation entre les deux variantes du modèle 3.

Écoulement direct	SIE sur VCN3(5)	SIE sur VCN10(5)	SIE sur QMNA(5)	SIE sur Q95	SIE sur Q75	q ₅₀ sur NSE(Q _{MM})	SIE sur QA	q ₅₀ de C ₂ M ₃ (Q)	q ₅₀ de C ₂ M ₃ (Q ^{0.5})	q ₅₀ de C ₂ M ₃ (1/Q)
Sans	0,88	0,90	0,88	0,90	0,86	0,86	0,93	0,52	0,59	0,36
Avec	0,88	0,90	0,89	0,92	0,87	0,87	0,93	0,54	0,61	0,37

Le Tableau 4.5 résume les résultats lorsque la fonction de transfert est uniquement constituée d'un réservoir de transfert ou lorsque cette fonction est constituée d'un réservoir de transfert et d'un écoulement direct en parallèle. Sur l'ensemble de l'échantillon de référence, les performances sont sensiblement les mêmes, avec une légère amélioration lorsque l'écoulement direct est simulé. La Figure 4.9 permet de comparer ces résultats en fonction des régimes hydrologiques des bassins versants. Pour tous les régimes, peu de différences sont observées dans la simulation de tous les indices (étiage et QA), ce qui explique les résultats du tableau pour la simulation de ces indices. Pour tous les régimes sauf les bassins uniformes, peu de différences sont observées entre les simulations continues et la saisonnalité. Pour les

bassins uniformes, l'ajout d'une branche simulant l'écoulement de surface permet de mieux simuler la saisonnalité et les simulations continues, en basses eaux comme en hautes eaux. Cependant, les médianes des distributions des C2M sur les QMM et des C2M₃ restent inférieures à 0,5. Les hydrogrammes de ces bassins restent donc difficiles à modéliser avec une structure simplifiée qui a des difficultés à bien simuler les écoulements en provenance des nappes et les échanges souterrains, processus dominants sur ces bassins.

Nous choisissons donc de garder la structure de LoiEauJ à 2 paramètres où 10% de la pluie efficace sont acheminés par une branche directe simulant l'écoulement de surface et les 90% restant par un réservoir de transfert avec une loi de vidange puissance 3 et une capacité maximale de réservoir à caler (paramètre C).

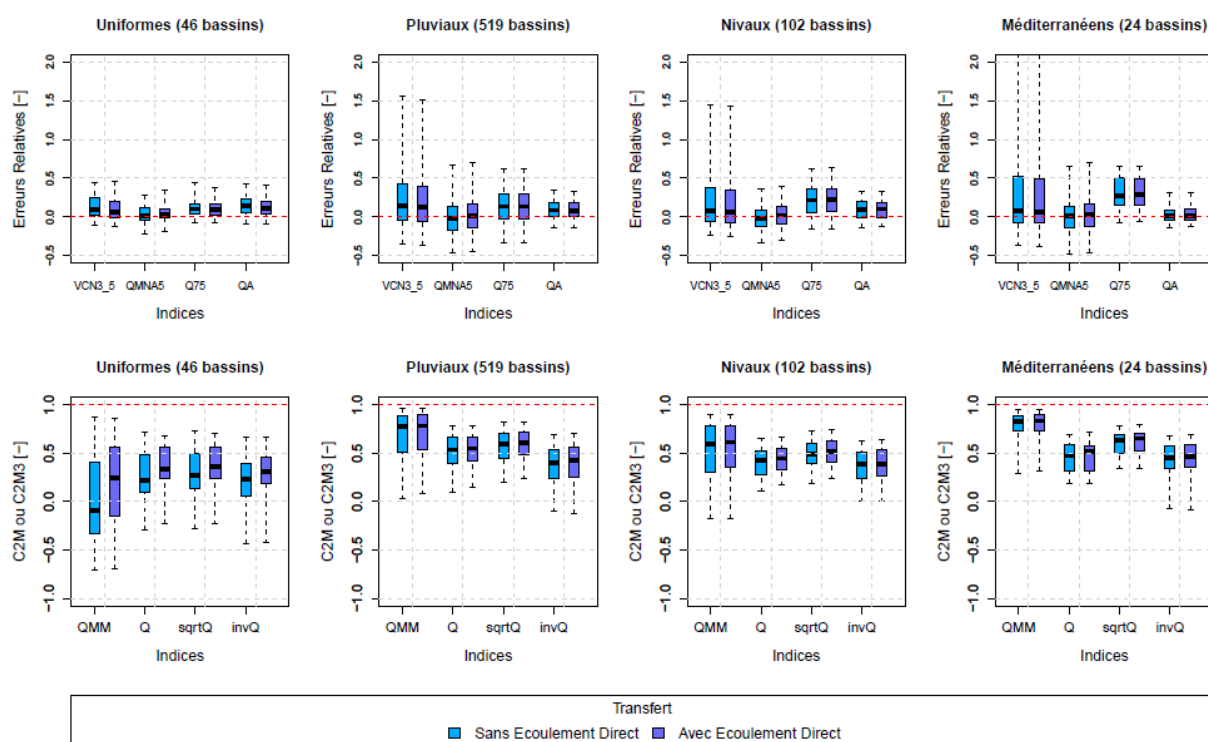


Figure 4.9 : Distribution des performances en validation pour la simulation des indices d'étiage (VCN3(5), QMNA(5), Q75), du QA, de la saisonnalité et des simulations continues pour les différents régimes hydrologiques (uniforme, pluvial, nival et méditerranéen) avec l'absence ou la prise en compte d'un écoulement direct. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut.

4.3.4 Comparaisons avec GR4J

Nous souhaitons maintenant évaluer la structure de LoiEauJ définie précédemment en comparant les simulations avec celles obtenues avec GR4J. LoiEauJ ayant 2 paramètres libres et GR4J 4 paramètres, nous comparons ces modèles à deux structures intermédiaires en nombre de paramètres. Pour le modèle LoiEauJ, la structure à 3 paramètres du modèle consiste à libérer le paramètre A. Pour le modèle GR4J, le temps de base est imposé à la valeur de 2 jours, valeur médiane du paramètre X4 sur toute la France, version notée GR4J(3).

La Figure 4.10 illustre les résultats moyens sur l'ensemble de l'échantillon de bassins versants sur les deux sous-périodes de validation. Les performances des 4 modèles sont très équivalentes ce qui indiquerait que deux paramètres suffisent pour notre objectif de modélisation et validerait notre hypothèse de départ dans le contexte jaugé. En moyenne sur l'ensemble de l'échantillon de référence, l'augmentation du nombre de paramètres libres n'améliore pas significativement la simulation des différents indices d'étiage et ainsi que du QA. Seul le Q75 est légèrement mieux simulé par GR4J et GR4J(3). Lorsque les performances sont comparées vis-à-vis de la saisonnalité et des simulations continues, nous remarquons une nouvelle fois que le nombre de paramètres libres n'a pas d'impact sur la simulation de la saisonnalité ni sur celle des basses eaux. La différence entre les performances des modèles augmente légèrement lorsque les simulations des hautes eaux et des débits intermédiaires sont comparées. Dans cet exemple, un modèle plus paramétré améliore ces performances. Cependant, la structure de LoiEauJ a été développée pour la simulation des indices d'étiage et de la saisonnalité alors que celle de GR4J a été développée pour la simulation de l'hydrogramme complet et des hautes eaux.

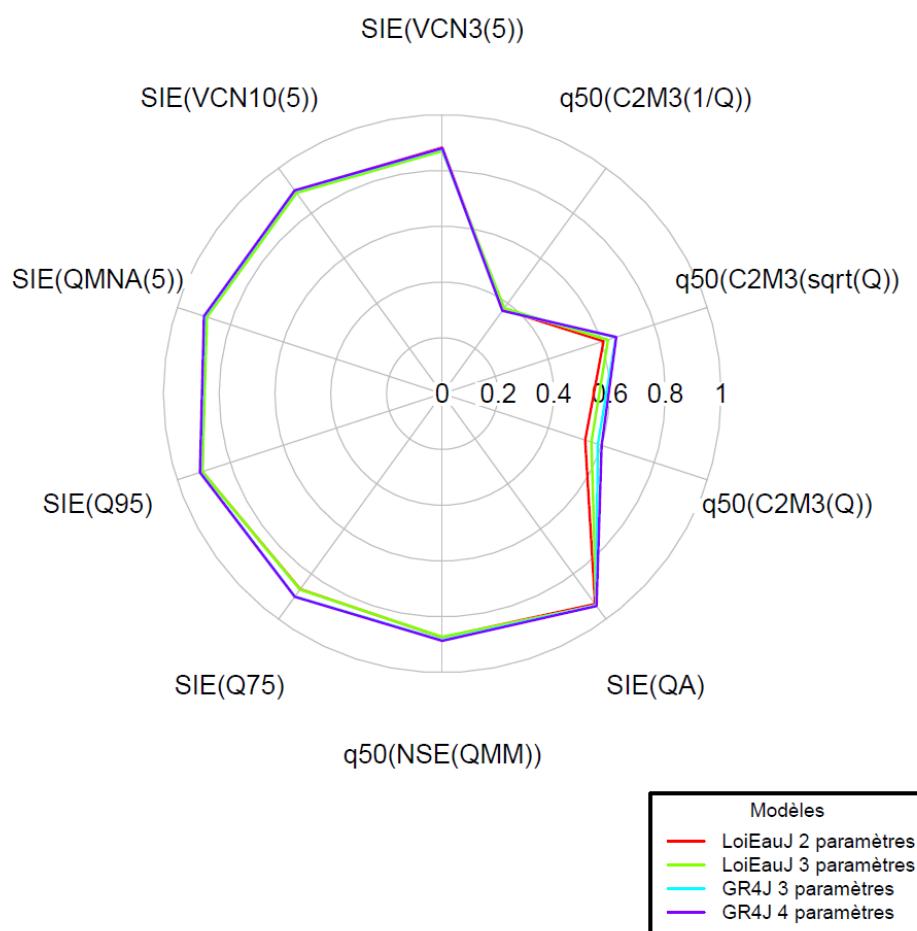


Figure 4.10 : Radial plot présentant les résultats moyens en validation pour les deux sous-périodes pour les quatre modèles pluie-débit.

Nous nous intéressons ensuite aux résultats en fonction du régime hydrologique des bassins versants (Figure 4.11). Pour les 4 régimes hydrologiques, les simulations du VCN3(5), du QMNA(5) et du QA avec les 4 modèles sont équivalentes. Les estimations du Q75 sont surestimées pour tous les bassins et tous les régimes hydrologiques. Les structures de LoiEauJ et GR4J n'ont pas été développées pour modéliser au mieux la courbe de tarissement ce qui pourrait expliquer cette surestimation des Q75. Lorsque nous nous intéressons à la simulation de la saisonnalité, les conclusions divergent suivant le régime hydrologique des bassins. La saisonnalité des bassins uniformes est mieux simulée avec le modèle LoiEauJ à 3 paramètres alors que les deux versions de GR4J donnent de meilleures performances pour les bassins pluviaux et nivaux et la saisonnalité des bassins méditerranéens est légèrement mieux modélisée par le modèle LoiEauJ à 2 paramètres. Pour les simulations continues, le modèle LoiEauJ à 3 paramètres est plus performant pour les simulations continues des bassins uniformes. Peu de différences sont observées pour les autres régimes hydrologiques. Le modèle GR4J reste légèrement plus performant pour la simulation des

hautes eaux et débits intermédiaires, contextes pour lesquels les modèles LoiEauJ n'ont pas été développés.

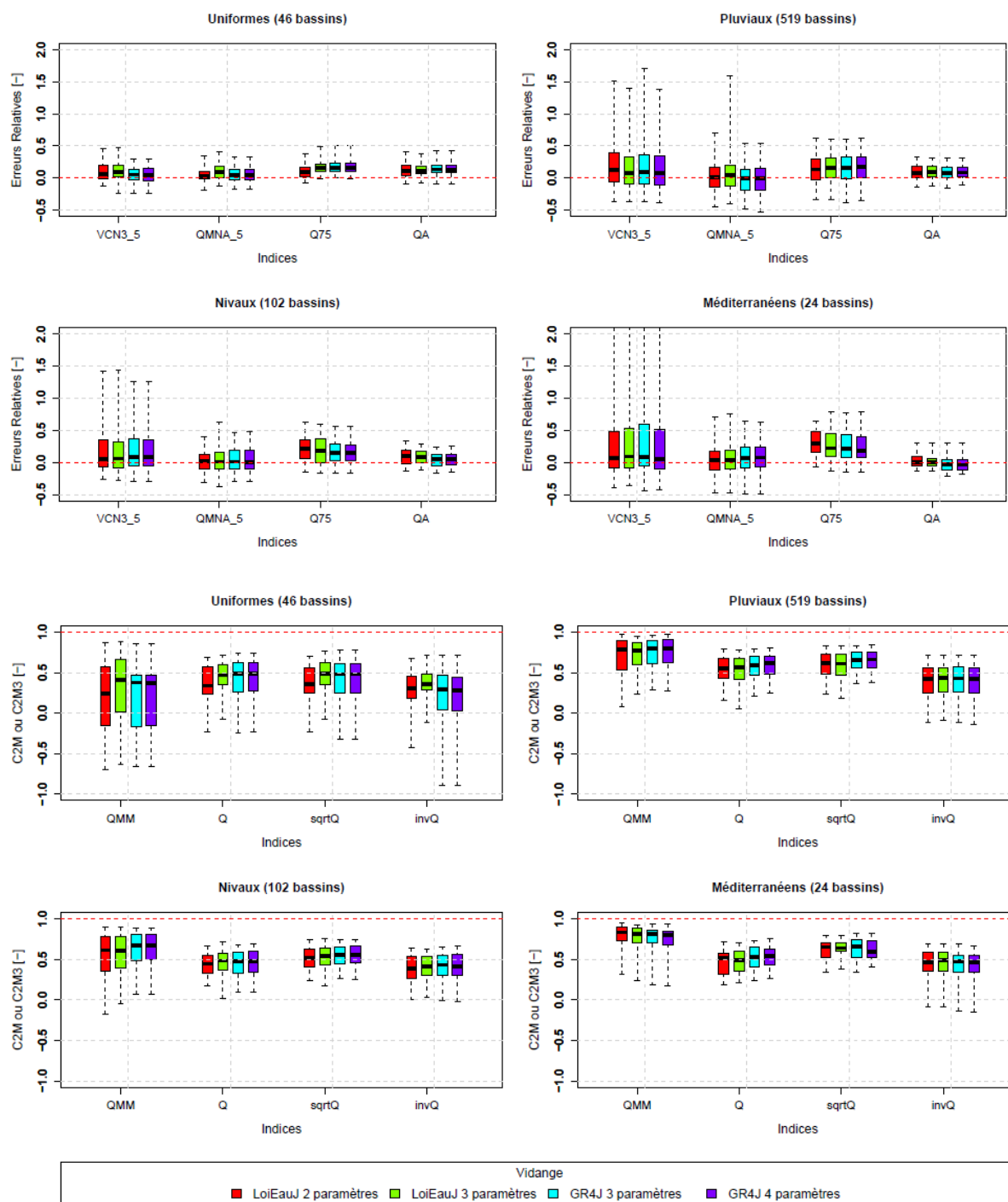


Figure 4.11 : Distributions des performances en validation pour la simulation des indices d'étiage (VCN3(5), QMNA(5), Q75), du QA, de la saisonnalité et des simulations continues pour les différents régimes hydrologiques (uniforme, pluvial, nival et méditerranéen) avec les quatre modèles. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut.

La structure de LoiEauJ à 2 paramètres a donc des performances proches de celles de GR4J pour la simulation des différents indices d'étiage, du QA, de la saisonnalité et des basses eaux en contexte jaugé. Le modèle GR4J est plus performant pour la simulation des hautes eaux et des débits intermédiaires. Cependant, ces simulations sortent du contexte de modélisation de LoiEauJ. Laisser le paramètre A libre dans la structure de LoiEauJ apporte peu pour la simulation des différents objectifs de modélisation en contexte jaugé.

4.3.5 Robustesse temporelle

Nous comparons dans ce paragraphe la robustesse temporelle des deux structures de LoiEauJ (à 2 et à 3 paramètres libres) pour évaluer si l'ajout d'un paramètre libre a un impact sur la robustesse du modèle. La Figure 4.12 illustre les résultats moyens, pour ces deux structures, lorsque nous calons sur les 22 années les plus humides puis validons sur les 22 plus sèches et inversement. Peu de différences sont observées dans les performances de chacun des deux modèles. L'ajout d'un paramètre libre dans la structure du modèle n'impacte pas sa robustesse.

Pour les deux modèles, nous observons peu, voire pas de pertes dans la simulation de la saisonnalité, NSE(QMM), du QA et des simulations continues des hautes eaux et débits intermédiaires. Ces pertes sont plus importantes pour la simulation des indices d'étiage et des simulations continues des basses eaux. La simulation du Q95 semble plus sensible au calage et à la validation dans des conditions climatiques différentes. En effet, cet indice est sous-estimé pour tous les bassins versants quelles que soient les périodes de calage et de validation. Lorsque les paramètres sont calés sur les années sèches et les débits estimés sur les années humides, les erreurs sur la simulation du Q95 sont plus élevées que lorsque nous calons sur les années humides et validons sur les années sèches. Cette tendance a été observée sur les simulations des autres indices mais ne semble pas dépendre des structures.

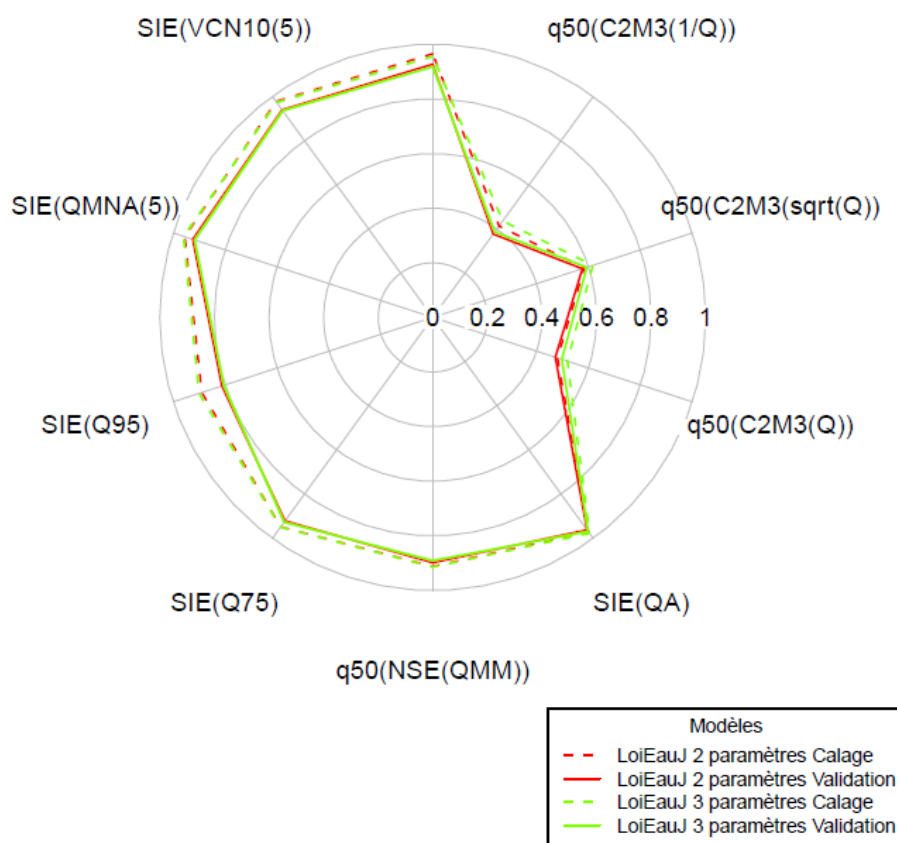


Figure 4.12 : Radial plot présentant les résultats moyens en calage et en validation pour les structures à 2 et 3 paramètres de LoiEauJ et pour les deux sous-périodes lorsque nous calons sur les 22 années les plus humides puis validons sur les 22 plus sèches et inversement.

4.4 Synthèse du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons cherché à adapter la structure du modèle LoiEauM, modèle fonctionnant au pas de temps mensuel, afin de simuler des chroniques journalières pour l'estimation de différents indices d'étiage et du QA. Nous avons décidé d'imposer le choix d'une structure possédant seulement 2 paramètres libres pour évaluer l'impact du nombre de paramètres libres d'un modèle pluie-débit sur les simulations des débits en contexte jaugé et en contexte non jaugé.

La structure retenue ici possède la fonction de production du modèle LoiEauM qui fonctionnait déjà au pas de temps journalier et dont la capacité maximale du réservoir de production a été régionalisée pour le modèle mensuel. La fonction de transfert retenue ensuite possède deux branches en parallèle : 10% de la pluie efficace sont acheminés directement pour simuler l'écoulement de surface et les 90% restant sont acheminés via un réservoir de transfert de vidange puissance 3 dont la capacité maximale est à caler. Le débit simulé est corrigé par un paramètre qui permet de prendre en compte tous les échanges, atmosphériques

et souterrains, non modélisables par la fonction de transfert. Les débits simulés par ce modèle ont ensuite été comparés à ceux modélisés par cette même structure avec un paramètre libre de plus, la capacité maximale du réservoir de production, et ceux modélisés par GR4J et une version à 3 paramètres de GR4J où le temps de base de l'hydrogramme unitaire est imposé à 2 jours.

En contexte jaugé, les simulations des différents indices d'étiage et du QA par LoiEauJ à 2 paramètres sont proches de celles simulées par les trois autres structures à 3 ou 4 paramètres. Les performances du modèle LoiEauJ à 2 paramètres sont inférieures à GR4J pour la simulation de la saisonnalité et les simulations continues en hautes eaux. La structure à 3 paramètres où la capacité maximale du réservoir de sol est laissée libre ne permet pas d'améliorer significativement les performances.

Dans ce contexte jaugé, cette structure très simple à seulement deux paramètres suffit pour simuler les différents indices d'étiage et les basses eaux. Elle n'améliore cependant pas la modélisation des basses eaux et des différents indices d'étiage par rapport au modèle GR4J. Ce n'était pas l'objectif recherché dans cette étude mais pour des simulations en contexte jaugé, il conviendrait par la suite d'améliorer la structure pour mieux modéliser les processus dominant lors de l'étiage, notamment ceux souterrains. Notre objectif est la modélisation en contexte non jaugé. Le prochain chapitre examinera le choix de la meilleure méthode de régionalisation des paramètres pour estimer les paramètres des deux structures de LoiEauJ, à deux et trois paramètres. Les simulations des différentes structures en contexte non jaugé seront ensuite comparées dans le chapitre 6.

5 Régionalisation des paramètres des deux structures de LoiEauJ

5.1 Introduction

Les modèles conceptuels pluie-débit sont une aide importante dans la simulation de chroniques de débits utiles pour de nombreux domaines, par exemple l'aménagement du territoire, l'industrie, et l'agriculture, et pour une meilleure gestion de la ressource en eau. Cependant, ces modèles dépendent de paramètres qui ne sont pas mesurables mais peuvent être calés à l'aide de chroniques de débit mesurées aux exutoires de bassins versants. L'enjeu est alors de pouvoir estimer ces paramètres en bassins non jaugés. De nombreux travaux ont été menés à ce sujet et plus largement sur le sujet de la prédiction en bassins non jaugés, notamment lors de la décennie PUB (« Prediction in Ungauged Basins ») proposée par l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques, IAHS, en 2003 (Sivapalan *et al.*, 2003). Cette décennie s'est conclue en 2013 avec de nombreuses études et de nombreuses synthèses (Blöschl *et al.*, 2013 ; Hrachowitz *et al.*, 2013 ; Parajka *et al.*, 2013 ; Razavi et Coulibaly, 2013).

Dans le cadre des modèles pluie-débit conceptuels, de nombreuses méthodes existent pour transférer les paramètres de bassins jaugés dont plusieurs informations sont connues localement, appelés bassins donneurs, vers des bassins non jaugés dont une information plus régionale est connue, appelés bassins receveurs (Blöschl *et al.*, 2013). Ces méthodes de régionalisation peuvent être regroupées en plusieurs grandes familles et sont expliquées dans la suite.

- Proximité spatiale : cette méthode se base sur l'idée que les phénomènes contrôlant les différents processus hydrologiques varient peu dans l'espace. Ainsi, des bassins versants proches auront des comportements hydrologiques similaires et par conséquent des paramètres de modèle hydrologique proches. Les jeux de paramètres sont alors directement transférés du bassin versant donneur le plus proche au bassin versant receveur. Par exemple, Zvolenský *et al.* (2008) ont testé cette méthode pour régionaliser les 15 paramètres du modèle Hron en Slovaquie. Plusieurs bassins voisins peuvent être aussi utilisés et les jeux de paramètres sont alors moyennés à l'aide de combinaisons pondérées (Parajka *et al.*, 2005 ; Kim et Kaluarachchi, 2008).
- Similarité : la méthode précédente est basée sur la proximité géographique entre les bassins versants. Cependant, cela ne garantit pas la similarité hydrologique

entre les bassins versants. Cette deuxième méthode consiste à définir la similarité entre deux bassins à partir du climat et/ou de caractéristiques descriptives de bassin versant, comme la géologie, la topographie, ... De la même manière que pour la proximité spatiale, les jeux de paramètres sont alors directement transférés du bassin le plus similaire ou moyennés à partir de plusieurs bassins versants (Kokkonen *et al.*, 2003). Les deux approches, proximité spatiale et similarité, peuvent être combinées afin de choisir des bassins donneurs proches géographiquement mais étant aussi similaire d'un point de vue hydrologique (Young, 2006 ; Kim et Kaluarachchi, 2008).

- Régression : chaque paramètre du modèle pluie-débit est relié à différentes caractéristiques descriptives de bassins versants. Les relations ainsi déterminées pour les bassins versants jaugés, le plus couramment à l'aide de régressions linéaires multiples, sont ensuite utilisées pour estimer les paramètres des bassins versants non jaugés. Par exemple, Lobligois (2014) a trouvé une relation reliant le paramètre de GR4J correspondant au temps de base de l'hydrogramme unitaire avec la surface du bassin versant. Kokkonen *et al.* (2003) ont relié deux paramètres du modèle IHACRES à des caractéristiques descriptives de bassin versant en Caroline du Nord aux Etats-Unis.

Dans la littérature, de nombreux travaux de recherche et études comparatives ont cherché à établir quelle est la meilleure méthode de régionalisation. Il est apparu que la performance de ces différentes méthodes dépend de la densité des stations de mesure sur le territoire. Ainsi, Oudin *et al.* (2008) ont montré qu'en France, région densément équipée, la proximité spatiale était la méthode la plus performante, par rapport à la similarité et la régression, pour la régionalisation du modèle GR4J et d'une version globale à 6 paramètres de TOPMODEL.

La méthode de régression a l'avantage d'établir des liens explicites entre les paramètres de modèle pluie-débit et les caractéristiques descriptives de bassins versants. Cette méthode semble être plus performante pour des modèles parcimonieux ayant moins de cinq paramètres, comme le suggère Young (2006). Cependant, il est souvent difficile d'obtenir des relations qui de plus aient une explication hydrologique (Fernandez *et al.*, 2000). En effet, les caractéristiques descriptives ne permettent pas de représenter tous les processus hydrologiques, notamment les processus souterrain et de subsurface. De plus, l'équifinalité

des jeux de paramètres empêche de bien identifier les paramètres et différents jeux de paramètres peuvent donner des résultats similaires (Kokkonen *et al.*, 2003 ; Wagener *et al.*, 2004 ; Beven, 2006 ; Bárdossy, 2007). Cette méthode tend alors à être moins performante que les autres méthodes de régionalisation. Différentes techniques ont été développées pour essayer de contourner ce problème. Par exemple, pour les modèles distribués, des méthodes de descente d'échelle sont utilisées pour caler les coefficients des relations entre les paramètres des modèles hydrologiques et les caractéristiques de bassin versant à l'échelle d'une grille ou des sous-bassins (Bandaragoda *et al.*, 2004). Pour les modèles globaux, une méthode similaire appelée calage régional consiste à caler les coefficients de la relation entre paramètres de modèle hydrologique et descripteurs à l'échelle du bassin versant au lieu de caler directement les paramètres (Fernandez *et al.*, 2000). Différentes techniques de calage régional existent. L'une de ces techniques consiste par exemple à réduire le nombre de paramètre libre en régionalisant et fixant chaque paramètre l'un après l'autre (Kay *et al.*, 2006 ; Wagener et Wheeler, 2006).

Toutes ces méthodes ont cependant été testées en comparant les performances à l'aide du critère NSE (défini au chapitre 3), donc en évaluant les simulations par rapport à la moyenne des débits observés et en cherchant à modéliser toutes les facettes de l'hydrogramme. Dans ce chapitre, les méthodes testées seront évaluées en comparant les paramètres des modèles pluie-débit estimés à l'aide de chaque méthode de régionalisation par rapport aux paramètres calés des modèles pluie-débit. Une comparaison finale des deux méthodes de régionalisation sera effectuée sur les débits simulés à l'aide des paramètres régionalisés et évaluée à partir de critères relatifs à notre objectif de modélisation.

L'objectif de ce chapitre est de déterminer la meilleure méthode de régionalisation des paramètres de deux structures du modèle LoiEauJ, à deux et trois paramètres, tout en évaluant l'impact du nombre de paramètres des modèles sur la performance de ces méthodes de régionalisation. Deux des grandes méthodes de régionalisation sont testées et comparées pour le transfert des paramètres de ces deux structures : proximité spatiale et régression. Par manque de temps, la méthode de similarité et la méthode de calage régional n'ont pu être testées au cours de la thèse. Le prochain paragraphe présente la méthodologie adoptée et les différentes méthodes de régionalisation testées. Les résultats sont ensuite présentés et discutés.

5.2 Méthodologie

Dans ce paragraphe, nous présentons d'abord les deux méthodes de régionalisation testées par la suite puis les méthodes et critères d'évaluation.

5.2.1 Proximité spatiale

Plusieurs méthodes existent pour déterminer la proximité spatiale d'un bassin versant receveur. Parmi celle-ci, la méthode du plus proche voisin (Zvolenský *et al.*, 2008) ou les méthodes d'interpolation spatiale utilisant les n plus proches voisins comme le krigeage (Vandewiele et Elias, 1995 ; Parajka *et al.*, 2005) et la pondération par l'inverse de la distance (Parajka *et al.*, 2005) sont couramment utilisées et comparées. Cette dernière méthode, notée PID par la suite, a été validée par plusieurs études pour la régionalisation de paramètres de modèle pluie-débit. Elle sera utilisée pour la méthode de la proximité spatiale et sa formule est donnée par l'équation suivante :

$$Z_{bassin\ receveur} = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{1}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \cdot Z_i \quad (5.1)$$

où n est le nombre de voisins, p est la puissance, d est la distance entre deux bassins et Z est le paramètre d'un modèle pluie-débit à interpoler. Plusieurs points sont alors soulevés : (i) le choix du nombre de voisins n et de la puissance p ; (ii) le calcul de la distance d entre deux bassins versants ; (iii) le choix du voisinage ; (iv) la gestion de bassins dits horsains.

Choix du nombre de voisins et de la puissance

Plusieurs études ont abordées la question du choix du nombre de voisins et dans le cas de la méthode PID, du choix de la puissance. Il ressort que choisir seulement le plus proche voisin ne permet pas une bonne régionalisation des paramètres (Parajka *et al.*, 2005 ; Oudin *et al.*, 2008). Le nombre de bassins donneurs dépend du modèle pluie-débit utilisé et de l'échantillon de bassins versants choisis. Dans cette étude, nous optimiserons le nombre de bassins versants, choisi entre 1 et 10 voisins, ainsi que la puissance, choisie entre 0 et 5.

Comment calculer la distance entre deux bassins versants ?

La distance utilisée est la distance euclidienne entre deux bassins versants mais il existe plusieurs méthodes pour définir celle-ci entre deux surfaces. Le choix du calcul de la distance aura un impact sur la valeur de la distance, sur le choix des voisins ainsi que sur les poids calculés. Certaines études préconisent d'utiliser la distance entre exutoires ou centroïdes des bassins versants (Zvolenský *et al.*, 2008 ; Li *et al.*, 2009) qui sont les distances les plus faciles à calculer. Cependant, ces distances peuvent poser problème ou ne pas refléter la réalité dans le cas de bassins emboîtés. Un autre calcul de la distance est la distance géostatistique ou distance de Ghosh (Ghosh, 1951) très utilisée dans les récentes études sur le top-kriging (Skøien et Blöschl, 2007 ; Gottschalk *et al.*, 2011 ; Laaha *et al.*, 2013 ; Laaha *et al.*, 2014). Cette distance combine toutes les distances possibles entre deux bassins versants et permet ainsi de mieux prendre en compte les bassins emboîtés. Différentes études ont permis de comparer ces différentes distances mais la plupart ont traité cette question du point de vue de la covariance des débits. Lebecherel (2015) a comparé ces trois distances, en rajoutant des distances combinant à la fois la distance entre exutoires et celle entre centroïdes, par rapport à la méthode de proximité spatiale par PID appliquée sur les simulations sur un jeu de 609 bassins versants sur la France. Elle en conclue que cette méthode de régionalisation est peu sensible à la définition de la distance et recommande d'utiliser la distance suivante :

$$d_{mixte} = 0.2 \cdot d_{exutoire} + 0.8 \cdot d_{centroïde} \quad (5.2)$$

Notre échantillon comportant des bassins versants emboîtés, nous étudierons l'impact du choix du calcul de la distance pour cette méthode de régionalisation pour notre objectif de simulation. Les distances retenues sont résumées dans le Tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Liste des distances utilisées pour mesurer la distance entre deux bassins versants.

Distance	Définition
d_{exu}	distance entre exutoires de bassins versants
d_{cent}	distance entre centroïdes de bassins versants
d_{mixte}	distance combinant 20% de d_{exu} et 80% de d_{cent}
d_{Ghosh}	distance de Ghosh

Choix du voisinage

D'après Shu et Burn (2004a ; 2004b) , la proximité géographique ne signifie pas que deux bassins versants sont similaires hydrologiquement. Certains auteurs préfèrent définir des zones homogènes pour déterminer ensuite les bassins donateurs dans ces zones (Burn et Boorman, 1993 ; Samuel *et al.*, 2011). De nombreux auteurs se sont posés la question sur le choix de méthodes pour déterminer des zones homogènes et hydrologiquement similaires. Deux grandes techniques existent : délimiter des zones figées ou déterminer des zones « glissantes » (« Region of Interest » en anglais, Burn, 1990). Les zones peuvent aussi avoir une cohérence géographique ou être éloignées géographiquement.

Dans cette comparaison de méthodes de régionalisation, nous ne chercherons pas à définir des zones homogènes pour la France et notre échantillon de bassins versants mais à déterminer si le choix des bassins donateurs doit être effectué dans des zones homogènes (échelles régionales) ou sur l'échantillon complet de bassin versant (échelle nationale). Nous utiliserons donc les Hydro-Eco-Régions proposées par Wasson *et al.* (2001) et déjà présentées au chapitre 2. Ces 22 régions sont définies sur la base de la similarité hydro-climatique et sont spatialement continues. Certains bassins versants de notre échantillon sont à cheval sur plusieurs régions HER. L'appartenance des bassins versants à une région HER se base alors sur la localisation du centroïde de chaque bassin. Pour garder un nombre suffisant de bassins versants par région, les régions possédant moins de 30 bassins ont été regroupées avec des régions voisines et relativement similaires. Ces regroupements ont mené à une classification de 10 régions qui sont présentées dans le Tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Regroupement des différentes HER.

Nouvelles HER	Nombre de bassins des nouvelles HER	HER niveau 1	Nombre de bassins des HER niveau 1
HER 1	88	Armoricains	88
HER 2	102	Tables Calcaires	89
		Dépôts Argilo-Sableux	8
		Ardenne	5
HER 3	73	Cotes Calcaires Est	73
HER 4	44	Vosges	36
		Alsace	8
HER 5	60	Massif Central Nord	51
		Dépressions Sédimentaires	3
		Plaine Saône	6
HER 6	91	Massif Central Sud	91
HER 7	55	Alpes Internes	13
		Jura-Préalpes du Nord	42
HER 8	88	Préalpes du Sud	14
		Méditerranéen	25
		Cévennes	30
		Grands Causses	19
HER 9	61	Coteaux Aquitains	44
		Landes	6
		Causses Aquitaines	11
HER 10	33	Pyrénées	33

Comment gérer les bassins dits horsains ?

Quel que soit le choix du voisinage, même si les bassins versants sont définis comme hydrologiquement similaires, il est possible que certains bassins donneurs n'apportent pas d'information pour le transfert des paramètres. Certains auteurs préconisent de ne garder comme bassins donneurs que les bassins bien simulés par le modèle pluie-débit. Par exemple, Oudin *et al.* (2008) ont montré pour leur échantillon de bassins versants, qu'il convenait de garder uniquement les bassins pour lesquels les valeurs de la fonction objectif utilisée pour le calage, $NSE(Q^{0.5})$ dans leur cas, sont supérieures à 0,70. Ce filtre sur les bassins donneurs risque cependant de diminuer la diversité des bassins versants. D'autres auteurs préconisent alors l'utilisation de méthodes itératives pour détecter les bassins horsains et limiter leur impact (Boldetti *et al.*, 2010 ; Catalogne, 2012). C'est cette dernière méthode qui est retenue ici. Tous les bassins versants sont dans un premier temps considérés comme donneur potentiel. Une fois la méthode PID appliquée pour chaque paramètre du modèle hydrologique, les résidus standardisés ($r_{standard}$) sont calculés d'après la formule suivante :

$$r_{standard} = \frac{e}{\sigma} \quad (5.3)$$

où $r_{standard}$ sont les résidus standardisés, e sont les résidus du modèle utilisé et σ l'écart-type de la distribution des résidus.

Les bassins versants pour lesquels les $r_{standard}$ sont supérieurs à 4 en valeur absolue sont alors retirés de la liste des bassins donneurs pour tous les paramètres du modèle pluie-débit. La méthode d'interpolation est alors appliquée sur la nouvelle liste de bassins donneurs. Ces deux étapes sont réitérées jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'horsains détectés. Les paramètres du modèle pluie-débit des bassins considérés comme horsains dans cette méthode sont ensuite estimés à partir de la liste de bassins versants donneurs finale.

Interpolation des paramètres ou des simulations ?

Ce travail de régionalisation a été pensé de manière à estimer au mieux les paramètres des modèles LoiEauJ par rapport à leurs valeurs calées. McIntyre *et al.* (2005) et Oudin *et al.* (2008) ont montré que la méthode d'interpolation des simulations est plus performante que la méthode d'interpolation des paramètres car celle-ci utilise des jeux de paramètres non modifiés. Leur objectif était cependant la simulation de l'hydrogramme entier et non la simulation d'indices d'étiage. Nous avons donc choisi de comparer ces deux méthodes pour notre objectif de simulation.

5.2.2 Régression linéaire multiple

Cette méthode de régionalisation consiste à établir des relations de régression linéaire multiple entre un paramètre du modèle pluie-débit et des caractéristiques descriptives de bassins versants, appelés descripteurs pour la suite :

$$Z_j = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot X_{ji} + \varepsilon_j \quad (5.4)$$

où Z_j est un paramètre du modèle pluie-débit calé pour le bassin j , X_{ji} sont les $i = 1, \dots, k$ descripteurs explicatifs, α_i sont les coefficients assignés à chaque descripteur et ε_j est le résidu de l'estimation. Les coefficients α_i peuvent être estimés par rapport aux valeurs observés par minimisation du critère des moindres carrés (Thomas et Benson, 1970 ; Hardisson, 1971). Cette méthode repose sur plusieurs hypothèses fortes : (i) la linéarité de la relation, (ii) la non-

colinéarité des variables explicatives, (iii) l'homoscédasticité des résidus, (iv) la normalité des résidus. Ces hypothèses peuvent être vérifiées *a posteriori* avec différents tests effectués sur les résidus (test de normalité (Shapiro-Wilk), test d'hétéroscédasticité (Bench-Pagan)).

Plusieurs points sont soulevés pour cette méthode : (i) le choix du voisinage, (ii) le choix des descripteurs, (iii) la prise en compte de la corrélation spatiale, (iv) la méthode de détermination du meilleur modèle et la prise en compte des bassins dits horsains.

Choix du voisinage

Comme expliqué dans le paragraphe précédent, il est important de choisir des zones homogènes où les bassins sont similaires hydrologiquement. Dans le cas des régressions linéaires multiples, si le domaine d'étude est grand ou très hétérogène, il peut être utile de découper ce domaine en plusieurs zones homogènes. Les régressions linéaires sont alors déterminées par zone homogène. Nous parlerons alors de régression régionale par opposition à une régression globale où un modèle de régression linéaire est déterminé pour le domaine entier. Dans ce chapitre, nous comparerons l'estimation des différents paramètres du modèle pluie-débit à l'aide d'une régression globale ou à l'aide de régressions régionales. Les régions choisies sont les 10 HER regroupées définies précédemment (Tableau 5.2).

Choix des descripteurs

Le choix des descripteurs reste une problématique importante. Il n'existe pas de consensus sur le choix des descripteurs car ceux-ci dépendent de l'application souhaitée. En effet, ils peuvent dépendre de la disponibilité des données mais aussi d'un choix *a priori* lorsque les processus physiques dominants dans les bassins versants sont connus. Ils doivent cependant être pertinents pour décrire au mieux les processus hydrologiques (Oudin *et al.*, 2008). Plusieurs grandes catégories ont néanmoins été déterminées (Blöschl *et al.*, 2013) et ont déjà été présentées dans le chapitre 2 :

- les descripteurs morphologiques (surface, altitude, densité de drainage, ...)
- les descripteurs climatiques (précipitations, températures, évapotranspirations potentielles, ...),
- les descripteurs géologiques (type de roche, pourcentage du bassin couvert par une surface imperméable, ...),

- les descripteurs de l'occupation des sols (pourcentage du bassin couvert par de la forêt, des surfaces agricoles, des prairies, ...),
- les descripteurs pédologiques (profondeur des sols, réserve utile potentielle en eau, ...).

Ces descripteurs ont une variabilité spatiale alors que nous ne pouvons évaluer les résultats des méthodes de régionalisation qu'en un seul point du bassin versant, l'exutoire. Nous avons donc besoin d'une valeur de ces descripteurs par bassin versant et la question de la méthode de l'agrégation des descripteurs à l'échelle du bassin se pose. Pour ne pas limiter le choix des descripteurs *a priori*, différentes méthodes d'agrégation sont testées : le minimum, le maximum, la médiane, la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation. Au total, 84 descripteurs ont donc été calculés (Tableau 5.3).

Nous cherchons ensuite à réduire la corrélation et la redondance de l'information entre ces 84 descripteurs de manière objective (Singh *et al.*, 2008 ; Morris *et al.*, 2009 ; Price *et al.*, 2011). Dans un premier temps, la normalité de chaque descripteur a été évaluée à l'aide de différents tests, le test de Shapiro-Wilk, le test de Lilliefors, le test de Anderson-Darling, le test de D'Agostino et le test de Jarque-Bera, à l'échelle globale et à l'échelle régionale sur chacune des 10 HER regroupées. Lorsque la distribution n'est pas normale, différentes transformations ont été testées pour atteindre la normalité : logarithme népérien ($\ln$), racine carrée. Dans le cas des descripteurs exprimés en pourcentage, la transformation angulaire, $\text{asr} : \arcsin(\sqrt{x})$, a été appliquée. Une matrice de corrélation a ensuite été calculée pour pouvoir identifier les descripteurs possédant une corrélation linéaire trop importante entre eux ($|R| > 0,8$). Un seul des descripteurs est alors retenu et la préférence est accordée à des descripteurs ayant déjà démontré leur relation avec des paramètres ou des débits caractéristiques d'étiage dans la littérature. Une analyse par composante principale a ensuite été effectuée pour examiner les descripteurs restants. Cette méthode a permis de retenir 21 descripteurs.

Tableau 5.3 : Descripteurs considérés avec les éventuelles transformations appliquées pour atteindre la normalité de la distribution (ln : logarithme népérien, asr : arc sinus racine carrée, – : distribution normale atteinte sans transformation, X : aucune transformation n’a permis de normaliser la distribution). Le symbole ✓ et la mise en forme en gras indiquent que le descripteur a été retenu pour déterminer les modèles de régression.

Variable	Unité	Notation	Utilisé	Transformation
Surface du bassin versant	km²	S	✓	ln
Densité de drainage				
Minimum	km ²	<i>DD_{min}</i>		X
Maximum	km ²	<i>DD_{max}</i>	✓	–
Médiane	km ²	<i>DD_{q50}</i>		X
Moyenne	km ²	<i>DD_{moy}</i>	✓	–
Coefficient de Variation	km ²	<i>DD_{cv}</i>		ln
Ecart-type	km ²	<i>DD_{sd}</i>	✓	–
Altitude				
Minimum	m NGF	<i>Z_{min}</i>		ln
Maximum	m NGF	<i>Z_{max}</i>		ln
Médiane	m NGF	<i>Z_{q50}</i>	✓	ln
Moyenne	m NGF	<i>Z_{moy}</i>		ln
Coefficient de Variation	m NGF	<i>Z_{cv}</i>	✓	ln
Ecart-type	m NGF	<i>Z_{sd}</i>		ln
Pente				
Minimum	%	<i>SL_{min}</i>		X
Maximum	%	<i>SL_{max}</i>	✓	X
Médiane	%	<i>SL_{q50}</i>		X
Moyenne	%	<i>SL_{moy}</i>		ln
Coefficient de Variation	%	<i>SL_{cv}</i>	✓	ln
Ecart-type	%	<i>SL_{sd}</i>		ln
Hauteur au-dessus du drain le plus proche				
Minimum	m	<i>HAND_{min}</i>	✓	ln
Maximum	m	<i>HAND_{max}</i>		ln
Médiane	m	<i>HAND_{q50}</i>		ln
Moyenne	m	<i>HAND_{moy}</i>		ln
Coefficient de Variation	m	<i>HAND_{cv}</i>	✓	–
Ecart-type	m	<i>HAND_{sd}</i>		ln
Pluies moyennes interannuelles				
Minimum	mm	<i>PA_{min}</i>		–
Maximum	mm	<i>PA_{max}</i>		–
Médiane	mm	<i>PA_{q50}</i>		–
Moyenne	mm	<i>PA_{moy}</i>	✓	–
Coefficient de Variation	mm	<i>PA_{cv}</i>	✓	ln
Ecart-type	mm	<i>PA_{sd}</i>		ln

Variable	Unité	Notation	Utilisé	Transformation
Pluies saisonnières moyennes interannuelles				
Hiver	mm	P_{winter}	—	
Printemps	mm	P_{spring}	—	
Eté	mm	P_{summer}	—	
Automne	mm	P_{autumn}	—	
Variabilité (écart-type) des précipitations moyennes mensuelles	mm	$VarP$	—	
Nombre de jours sans pluie moyen interannuel	jour	nP_0	✓	—
Précipitations solides moyennes interannuelles				
Minimum	mm	$P_s A_{min}$		ln
Maximum	mm	$P_s A_{max}$		ln
Médiane	mm	$P_s A_{q50}$		ln
Moyenne	mm	$P_s A_{moy}$		ln
Coefficient de Variation	mm	$P_s A_{cv}$		ln
Ecart-type	mm	$P_s A_{sd}$		ln
Températures moyennes interannuelles				
Minimum	°C	TA_{min}		—
Maximum	°C	TA_{max}		—
Médiane	°C	TA_{q50}		—
Moyenne	°C	TA_{moy}		—
Coefficient de Variation	°C	TA_{cv}	✓	X
Ecart-type	°C	TA_{sd}		ln
Températures saisonnières moyennes interannuelles				
Hiver	°C	T_{winter}		—
Printemps	°C	T_{spring}		—
Eté	°C	T_{summer}		X
Automne	°C	T_{autumn}		X
Variabilité (écart-type) des températures moyennes mensuelles	°C	$VarT$	✓	X
Evapotranspiration potentielle moyenne sur juillet et août (Oudin)	mm	ETP_{summer}		X
Evapotranspiration réelle interannuelle (Turc)	mm	$ETRA$		—
Indice d'aridité				
Minimum	Sans unité	AI_{min}		—
Maximum	Sans unité	AI_{max}		—
Médiane	Sans unité	AI_{q50}		—
Moyenne	Sans unité	AI_{moy}		—
Coefficient de Variation	Sans unité	AI_{cv}		ln
Ecart-type	Sans unité	AI_{sd}		ln
Evapotranspiration potentielle moyenne interannuelle				
Minimum	mm	$ETPA_{min}$		X
Maximum	mm	$ETPA_{max}$		—
Médiane	mm	$ETPA_{q50}$		—
Moyenne	mm	$ETPA_{moy}$		—
Coefficient de Variation	mm	$ETPA_{cv}$		ln
Ecart-type	mm	$ETPA_{sd}$		ln

Variable	Unité	Notation	Utilisé	Transformation
Pourcentage du bassin couvrant une surface imperméable	%	%imp	✓	asr, X
Pourcentage du bassin occupé par la forêt	%	%forest	✓	asr
Pourcentage du bassin occupé par la prairie et/ou de la végétation basse	%	%grass	✓	asr
Pourcentage du bassin occupé par les surfaces agricoles	%	%agro		asr
Profondeur des sols				
Minimum	m	DR_{min}		X
Maximum	m	DR_{max}		X
Médiane	m	DR_{q50}		X
Moyenne	m	DR_{moy}		–
Coefficient de Variation	m	DR_{cv}	✓	X
Ecart-type	m	DR_{sd}		X
Réserve utile potentielle				
Minimum	mm	AWC_{min}		–
Maximum	mm	AWC_{max}		–
Médiane	mm	AWC_{q50}		–
Moyenne	mm	AWC_{moy}	✓	ln
Coefficient de Variation	mm	AWC_{cv}	✓	–
Ecart-type	mm	AWC_{sd}		–

Prise en compte de la corrélation spatiale

La régression linéaire suppose que les phénomènes sont stationnaires. Or, les paramètres des modèles hydrologiques tout comme les descripteurs de bassins versants sont spatialement corrélés. Différentes techniques existent pour pallier ce problème et pour prendre en compte la dépendance spatiale. Par exemple, la régression géographiquement pondérée ou les méthodes d'auto-régression conditionnelle ou simultanée (Steinschneider *et al.*, 2015). Une autre méthode, nommé géorégression (Parajka *et al.*, 2005) consiste à caler un modèle de régression puis à interpoler spatialement les résidus à l'aide de la méthode PID ou la méthode de krigeage (Parajka *et al.*, 2005 ; Chopart et Sauquet, 2008). Folton et Arnaud (2012) ont utilisé cette méthode de régression linéaire avec interpolation spatiale des résidus par la méthode PID pour régionaliser les paramètres du modèle mensuel LoiEauM. Cette méthode de régression suivie de l'interpolation spatiale des résidus par la méthode PID sera comparée à la méthode de régression seule.

Détermination du meilleur modèle et gestion des bassins dits horsains

Différentes méthodes existent pour déterminer le meilleur modèle de régression linéaire multiple pour chaque paramètre. Parmi elles, la procédure dite de « pas à pas » (« stepwise regression ») est utilisée pour déterminer les meilleurs modèles de régression. Cette procédure consiste à introduire, méthode ascendante (« forward stepwise regression ») ou à exclure, méthode descendante (« backward stepwise regression ») progressivement les descripteurs dans le modèle pour choisir le plus petit nombre de descripteurs expliquant la variabilité de chaque paramètre hydrologique. L'apport ou la perte des descripteurs est évalué à l'aide d'un critère : R^2 , le Critère d'Information d'Akaike (AIC), le Critère d'Information Bayésien (BIC), le critère de Mallows (C_p), ... Cette méthode a pour avantage de limiter la colinéarité entre descripteurs et ainsi garantir des modèles plus robustes. De plus, cette méthode limite le nombre de descripteurs utilisés dans le modèle. Nous choisirons de déterminer le meilleur modèle de régression pour chaque paramètre par la méthode de régression ascendante (« forward stepwise regression ») en évaluant l'ajout de chaque descripteur à l'aide du critère AICc qui correspond au critère AIC corrigé, utilisé dans le cas de petits échantillons. De plus, pour répondre à l'hypothèse de normalité des résidus, un test de normalité des descripteurs et des paramètres a été effectué. Dans le cas de distribution non normale pour les descripteurs ou les paramètres, différentes transformations ont été testées pour atteindre cette normalité.

Comme expliqué dans le paragraphe précédent, nous choisissons d'abord de garder tous les bassins versants de notre échantillon de référence pour déterminer les meilleurs modèles de régression puis de détecter et d'éliminer ces horsains par une méthode itérative. Pour chaque paramètre du modèle pluie-débit à estimer, nous déterminons le meilleur modèle de régression. Nous pouvons alors calculer les r_{standard} pour chacun des bassins versants. Les bassins versants pour lesquels les r_{standard} sont supérieurs à 4 en valeur absolue sont alors retirés de la liste des bassins versants pour tous les paramètres du modèle pluie-débit. Le meilleur modèle de régression est alors déterminé sur cette nouvelle liste de bassins versants. Ces deux étapes sont réitérées jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'horsains détectés.

5.2.3 Méthodes d'évaluations et de comparaisons

Les données, l'échantillon de bassins versants et les différents débits caractéristiques ont déjà été présentés dans le paragraphe 3.2. Les deux structures de LoiEauJ, à 2 et 3 paramètres, ont été présentées dans le chapitre 4. Les paramètres pour chacun des deux modèles et pour chaque bassin versant ont préalablement été calés sur la période de 1970 à 2013 avec la fonction objectif combinée déterminée au chapitre 3.

Les deux méthodes de régionalisation comparées dans ce chapitre sont la méthode de proximité spatiale à l'aide de la méthode PID et la méthode de régression linéaire. Préalablement à la comparaison entre les paramètres estimés par ces deux méthodes, la configuration optimale, à savoir les différents points soulevés dans les paragraphes 5.2.1 et 5.2.2, est déterminée pour chacune des deux méthodes. Pour la méthode de proximité spatiale, toutes les combinaisons possibles entre le choix du nombre de voisins, de la puissance, du calcul de la distance et du voisinage ont été testées. Pour des questions de présentation, seule est présentée ici la sensibilité de chacune des options par rapport à la configuration optimale : 5 voisins, la puissance 1, la distance entre centroïdes (d_{cent}) et le voisinage globale. La même configuration optimale a été déterminée dans le cadre de l'interpolation des simulations. Pour la méthode de régression linéaire, toutes les combinaisons possibles entre le choix du voisinage et la prise en compte des résidus sont présentées afin de déterminer la configuration optimale pour cette méthode. Ces différents tests sont résumés dans le Tableau 5.4.

Tableau 5.4 : Résumé des différents tests des méthodes de régionalisation.

Tests	Méthodes
	<i>Proximité spatiale (PID)</i>
	Sensibilité par rapport à la configuration optimale : 5 voisins, puissance 1, d_{cent} , voisinage globale
Test 1	Optimisation du nombre de voisins et de la puissance
Test 2	Calcul de la distance (d_{exu} , d_{cent} , d_{mixte} , d_{Ghosh})
Test 3	Choix du voisinage (global ou par HER)
Test 4	Choix de la variable interpolée (paramètres ou simulations)
	<i>Régression linéaire multiple</i>
	Détermination de la configuration optimale
Test 5	Comparaison du voisinage (global ou par HER) sans la prise en compte des résidus
Test 6	Comparaison du voisinage (global ou par HER) avec la prise en compte des résidus (par la méthode PID)
	<i>Comparaison finale</i>
Test 7	Comparaison entre la configuration optimale de la méthode de la proximité spatiale et la configuration optimale de la méthode de régression linéaire multiple

L'évaluation et la comparaison des différentes méthodes de régionalisation se sont basées sur le schéma classique de calage-validation (Klemeš, 1986) à l'aide de la technique du « leave-one-out » (LOO). Chaque bassin est tour à tour considéré non jaugé et ses paramètres sont estimés à l'aide des (n-1) bassins restants. Les performances sont évaluées en validation sur les paramètres estimés pour les bassins considérés non jaugés. Comme expliqué dans les deux paragraphes précédents, 5.2.1 et 5.2.2, les bassins horsains sont exclus de la liste des bassins donneurs pour la méthode de proximité spatiale et de la liste des bassins pour la détermination des meilleurs modèles de régression (partie effectuée en calage) puis lorsque les différents paramètres des modèles de régression sont ajustés par la méthode LOO. Les paramètres des modèles pluie-débit de ces bassins horsains sont estimés en toute fin à partir de la liste de bassins donneurs sans eux pour la proximité spatiale et à partir des meilleurs modèles de régression estimés sans eux pour la régression. Leurs valeurs estimées sont alors incluses pour l'évaluation des performances en validation.

Les configurations optimales de ces deux méthodes de régionalisation sont estimées en optimisant le RMSE calculé entre la distribution de chaque paramètre calé et chaque paramètre régionalisé de modèle pluie-débit. La comparaison finale des deux méthodes de régionalisation est d'abord évaluée sur le RMSE calculé sur chaque distribution de paramètres. Cette comparaison finale est ensuite effectuée sur les débits simulés à l'aide de ces paramètres régionalisés. Ces simulations de débits à l'aide des paramètres régionalisés sont comparées aux simulations à l'aide des paramètres calés et à une méthode de régionalisation de référence où tous les bassins possèdent le même jeu de paramètres correspondant aux paramètres médians sur toute la France. Les critères de validation utilisés pour comparer les simulations sur les débits correspondent à ceux définis dans les chapitres 3 et 4. Ces critères sont résumés dans le Tableau 5.5.

Tableau 5.5 : Critères d'évaluation des différentes méthodes de régionalisation.

Nom	Description
	<i>Evaluation des paramètres régionalisés par rapport aux paramètres calés (pour chaque paramètre de modèle pluie-débit)</i>
RMSE	RMSE calculé entre la distribution des paramètres régionalisés et paramètres calés
	<i>Evaluation des débits simulés à l'aide des paramètres régionalisés par rapport aux débits observés</i>
	<i>Indices d'étiage</i>
Err(VCN3(5))	Erreurs relatives calculées sur le VCN3(5), Volume Consécutif Minimal pour 3 jours à T = 5 ans
Err(QMNA(5))	Erreurs relatives calculées sur le QMNA(5), Débit Mensuel Minimal Annuel à T = 5 ans
Err(Q75)	Erreurs relatives calculées sur le Q75, débit dépassé 75% du temps
	<i>Module interannuel</i>
Err(QA)	Erreurs relatives calculées sur le QA, module interannuel
	<i>Saisonnalité</i>
C2M(Q _{MM})	C2M calculé sur les 12 débits moyens mensuels
	<i>Simulations continues</i>
C2M ₃ (Q)	C2M calculé sur les débits, chroniques simulées translatées de +/- 3 jours
C2M ₃ (Q ^{0.5})	C2M calculé sur la racine-carré des débits, chroniques simulées translatées de +/- 3 jours
C2M ₃ (1/Q)	C2M calculé sur l'inverse des débits, chroniques simulées translatées de +/- 3 jours

5.3 Résultats et discussions

Ce paragraphe présente les résultats obtenus pour déterminer la meilleure méthode de régionalisation des paramètres des structures de LoiEauJ à 2 et à 3 paramètres. Dans toute la suite, nous noterons B2 et C2 les paramètres de la structure à 2 paramètres et A3, B3 et C3 ceux de la structure à 3 paramètres.

5.3.1 Choix du nombre de voisins et de la puissance pour la proximité spatiale

Nous comparons la sensibilité du choix du nombre de voisins et de la puissance sur la configuration optimale déterminée pour la méthode de proximité spatiale : la méthode PID appliquée avec la distance entre centroïdes et voisinage globale. La Figure 5.1 montre qu'un nombre relativement faible de voisins, entre 3 et 5, suffit pour une bonne performance de la régionalisation. Pour tous les paramètres sauf C3, choisir un seul voisin ne permet pas une bonne performance du modèle de régionalisation. Pour la régionalisation de ces paramètres, lorsque le nombre de voisins augmente, la performance du modèle de régionalisation augmente rapidement jusqu'à un nombre de voisins limite à partir duquel nous observons un palier. Pour les paramètres A3 et C2, ce nombre de voisins correspond à 5 bassins alors que pour les paramètres B2 et B3, il correspond à 3 voisins. Pour ces 4 paramètres, la puissance 0, qui correspond à un modèle où les paramètres sont seulement moyennés sans prendre en compte la distance entre les bassins donneurs et le bassin receveur, ne permet pas une bonne performance du modèle en régionalisation. La puissance 1 est la puissance optimale puis lorsque la puissance augmente, la performance du modèle diminue. Enfin, les paramètres C2 et C3 semblent plus difficile à régionaliser, avec des RMSE proches de 1,70 pour C2 et de 3,62 pour C3. Le paramètre C3 semble donner des conclusions différentes pour le choix du nombre de voisins et de la puissance. Ainsi la performance optimale est obtenue avec un seul voisin. Lorsque la puissance 1 ou la puissance 2 sont choisies, l'augmentation du nombre de voisins n'a pas d'impact sur la performance du modèle alors qu'une puissance 0 ou une puissance supérieure à 2 diminuent la performance du modèle. Pour s'affranchir des problèmes d'interaction entre les paramètres des modèles pluie-débit, nous déterminons le même modèle pour tous les paramètres. Nous choisissons donc, pour les 2 structures de LoiEauJ, 5 voisins et une puissance 1 pour la méthode PID. Ce nombre de voisins a aussi été déterminé pour la régionalisation des paramètres du modèle mensuel LoiEauM mais une puissance optimale de 2 avait été choisie (Abderemane, 2014).

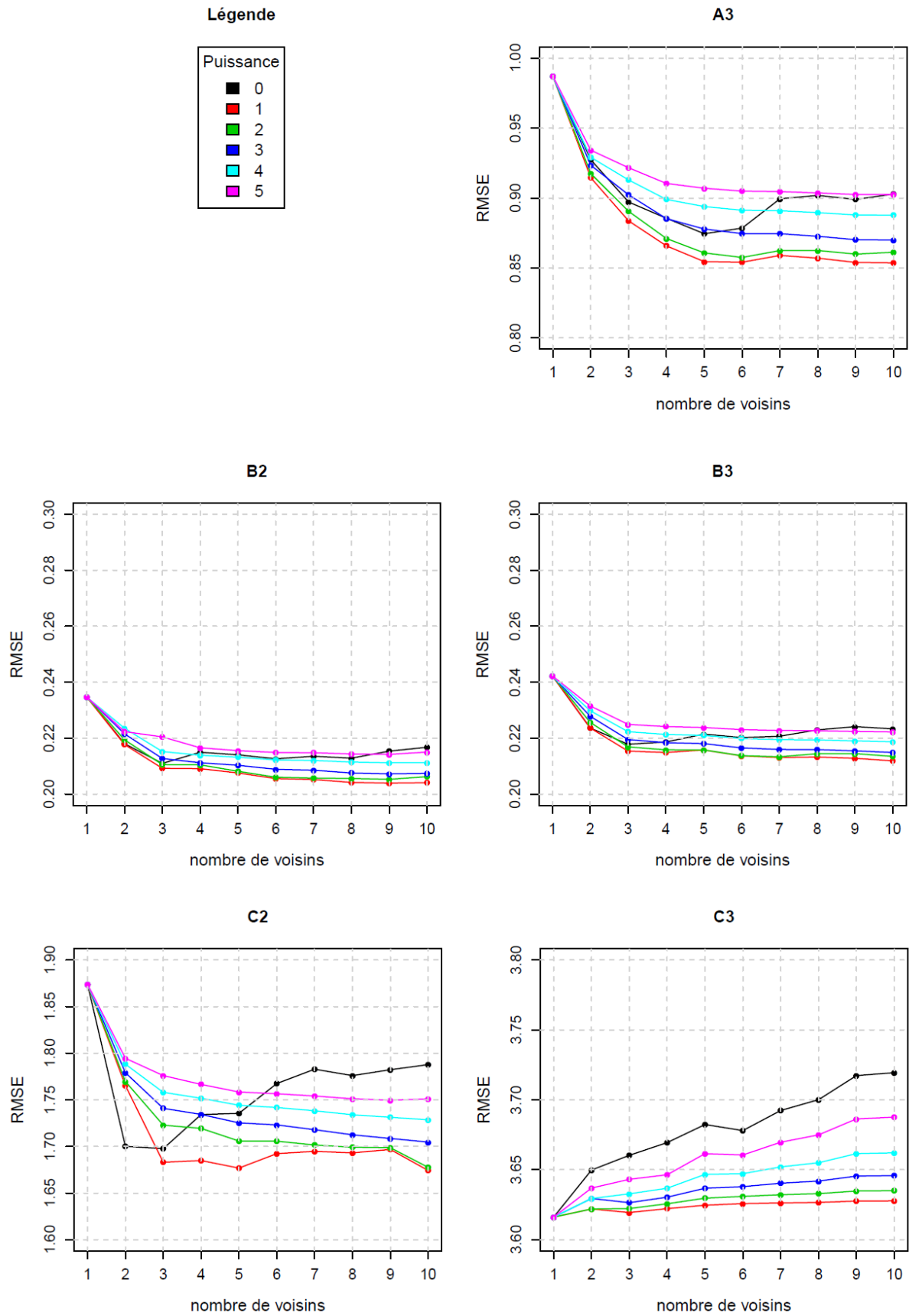


Figure 5.1 : Impact du choix du nombre de voisins et de la puissance dans la méthode PID sur la régionalisation des paramètres A3, B2, B3, C2 et C3.

5.3.2 Choix du calcul de la distance entre bassins versants pour la proximité spatiale

Nous évaluons maintenant l'impact du choix du calcul de la distance entre bassins versants sur la méthode PID. Les autres choix possibles sont imposés à leurs valeurs optimales (5 voisins, puissance 1 et voisinage global). Les valeurs des RMSE calculés sur chaque paramètre et pour chacune des distances sont résumées dans le Tableau 5.6.

Tableau 5.6 : Impact du calcul de la distance sur la performance de la méthode PID sur les paramètres B2, C2, A3, B3 et C3 (en noir sur l'échantillon de référence de 691 bassins, en bleu uniquement sur les 410 bassins possédant au moins un bassin amont ou un bassin aval).

RMSE [-]	d_{exu}	d_{cent}	d_{mixte}	d_{Ghosh}
ln(A3)	0,89 0,76	0,86 0,75	0,86 0,74	0,87 0,76
B2	0,22 0,19	0,21 0,18	0,21 0,17	0,21 0,18
B3	0,23 0,20	0,21 0,18	0,22 0,19	0,22 0,19
ln(C2)	1,76 1,69	1,68 1,61	1,66 1,57	1,70 1,62
ln(C3)	3,67 3,25	3,66 3,21	3,66 3,19	3,66 3,20

Pour chaque paramètre à régionaliser, les valeurs de RMSE pour les paramètres estimés avec les différentes distances sont très proches. Pour les 5 paramètres, la distance entre les exutoires (d_{exu}) semble néanmoins être moins performante, surtout en comparant les estimations du paramètre C2. Cette faible sensibilité du modèle de régionalisation à la distance entre bassins versants peut s'expliquer par le fait que ces distances sont relativement proches les unes des autres et que pour 40% de l'échantillon de référence, nous trouvons les mêmes bassins donneurs et par conséquent des valeurs de paramètres relativement proches.

Du fait de ces faibles différences sur tout l'échantillon, nous nous intéressons maintenant aux performances uniquement sur les bassins emboîtés. L'échantillon comprend 410 bassins possédant au moins un bassin amont ou un bassin aval. Les résultats sont en bleu dans le Tableau 5.6. Les différences de performance ne sont toujours pas très marquées. Nous constatons une nouvelle fois que la distance entre les exutoires de bassin versant (d_{exu}) donne les résultats les moins performants, surtout pour la régionalisation des capacités maximales du réservoir transfert de chaque modèle, C2 et C3. Cependant ces différences sont extrêmement faibles. Le choix du calcul de la distance a donc un très faible impact sur la régionalisation des paramètres, et ce même pour les bassins emboîtés. Ces conclusions sur la faible sensibilité

du choix du calcul de la distance entre bassins versants pour la méthode PID rejoignent les résultats de Lebecherel (2015). Pour la suite, nous choisirons la distance entre centroïdes de bassin versant, facile à calculer et déjà utilisée dans de nombreuses études.

5.3.3 Choix du voisinage pour la proximité spatiale

Nous évaluons maintenant l'impact du choix du voisinage sur la méthode PID. Dans ce paragraphe, les autres variables sont imposées à leur valeur optimale (5 voisins, puissance 1 et distance calculée entre les centroïdes de bassins versants). Les résultats sont résumés dans le Tableau 5.7.

Tableau 5.7 : Impact du choix du voisinage sur la performance de la méthode PID sur les paramètres B2, C2, A3, B3 et C3 (en noir sur l'échantillon de référence de 691 bassins, en bleu uniquement sur les 217 bassins possédant au moins un voisin différent).

RMSE [-]	Global	HER
ln(A3)	0,86 0,89	0,88 0,93
B2	0,21 0,23	0,21 0,25
B3	0,22 0,23	0,22 0,23
ln(C2)	1,68 1,77	1,74 1,94
ln(C3)	3,66 4,22	3,52 4,00

Lorsque ces résultats sont comparés à l'échelle de l'échantillon de référence, peu de différences sont observées entre les performances lorsque le voisinage est global ou lorsqu'il est choisi par HER. Les paramètres A3, B2 et B3 ne semblent pas sensibles à ce choix alors que les paramètres C2 et C3 y sont un peu plus sensibles.

Les résultats sont alors comparés sur l'échantillon composé des 217 bassins possédant au moins un voisin différent entre les deux échelles. Les RMSE sur les paramètres A3, B2 et B3 sont relativement proches pour les deux voisinages. Parmi ces 217 bassins, 82 bassins ont seulement un voisin différent et 64 bassins ont 2 voisins différents, donnant des valeurs de paramètres relativement proches de celles interpolées à l'échelle globale. Pour les 71 autres bassins restants ayant entre 3 et 5 voisins différents, les voisins sont sélectionnés à des distances plus importantes. Ils apportent donc un poids faible dans l'interpolation spatiale des paramètres et peu de changements significatifs des résultats. Pour le paramètre C2, le RMSE

augmente lorsque le voisinage est choisi parmi les HER alors que l'inverse est observé pour le paramètre C3. Ces différences plus marquées pour ces 2 paramètres peuvent être expliquées par les paramètres des bassins horsains qui ont des valeurs moins bien simulées pour ces paramètres. Pour la suite, nous garderons donc le voisinage global pour l'interpolation spatiale des paramètres.

5.3.4 Choix de la variable interpolée pour la proximité spatiale

Nous évaluons dans un dernier temps l'impact du choix de la variable interpolée par la méthode PID. Dans ce paragraphe, toutes les variables sont imposées à leur valeur optimale : 5 voisins, puissance 1, distance calculée entre centroïdes de bassins versants et voisinage global. Cette configuration optimale est la même pour l'interpolation des paramètres et celle des simulations.

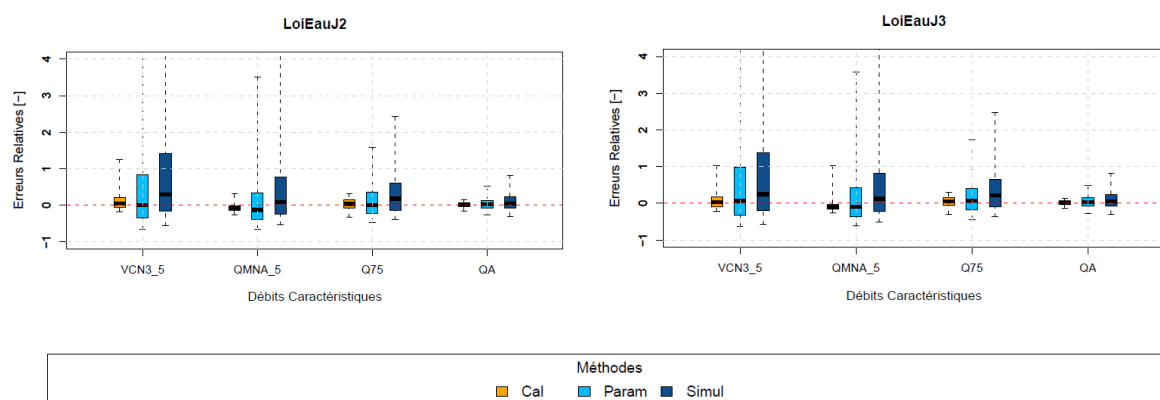


Figure 5.2 : Distribution des performances pour la simulation des débits caractéristiques (VCN3(5), QMNA(5), Q75, QA) pour le modèle LoiEauJ2 (à gauche) et LoiEauJ3 (à droite). Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut. Les différentes couleurs indiquent les distributions lorsque les paramètres sont calés (Cal) et chacune des variables interpolées par la méthode PID dans leur configuration optimale (Param : paramètres, Simul : simulations).

La Figure 5.2 permet de comparer les débits caractéristiques simulés à l'aide des modèles LoiEauJ à 2 et 3 paramètres calés ou régionalisés par la méthode PID appliquée aux paramètres ou appliquée aux simulations. Comme attendu, les simulations obtenues par les deux modèles régionalisés sont moins robustes que celles obtenues lorsque les paramètres des modèles LoiEauJ sont calés. Indépendamment du modèle pluie-débit, nous observons que la méthode PID appliquée aux simulations tend à surestimer les différents indices d'étiage, VCN3(5), QMNA(5), Q75 et QA. Cette méthode d'interpolation des simulations entraîne un lissage des hydrogrammes en période de basses eaux ce qui conduit à une surestimation de

ces débits et des différents indices d'étiage. Ces conclusions sont différentes de celles de McIntyre *et al.* (2005) et Oudin *et al.* (2008) dont l'objectif était la simulation de l'hydrogramme complet et non la simulation d'indices d'étiage. Pour la suite, nous garderons la méthode PID appliquée aux paramètres de modèle pluie-débit.

5.3.5 Choix des descripteurs pour les régressions selon le voisinage

Dans ce paragraphe, nous cherchons à déterminer si le choix du voisinage, global ou par HER, a un impact sur le pouvoir explicatif de la régression ainsi que sur le choix des descripteurs expliquant chaque paramètre. Les performances des régressions globales et régressions par HER pour l'échantillon de référence seront évaluées dans le paragraphe suivant. Les différents modèles de régression obtenues pour expliquer chacun des 5 paramètres sont regroupés dans le Tableau 5.8.

Tableau 5.8 : Modèles de régression retenus pour les paramètres A3, B2, B3, C2 et C3 des deux structures du modèle LoiEauJ suivant le voisinage de la régression.

Vois.	Nombre bassins	Param.	Modèle	R ² -ajusté (cal.)	RMSE (val.)
Globale	691	ln(A3)	$9,518 - 0,448 \cdot VarT - 0,001 \cdot PA_{moy}$	0,13	1,02
		B2	$0,837 + 0,129 \cdot \ln(Z_{q50}) - 0,128 \cdot VarT$	0,18	0,23
		B3	$0,996 - 0,063 \cdot VarT + 2,553 \cdot 10^{-4} \cdot PA_{moy}$	0,10	0,24
		ln(C2)	$16,667 - 0,894 \cdot VarT + 0,160 \cdot SL_{max} - 0,031 \cdot DD_{moy}$	0,33	1,87
		ln(C3)	$5,347 + 1,714 \cdot TA_{cv} - 0,064 \cdot DD_{moy}$	0,11	3,89
HER 1	88	ln(A3)	$6,125 - 0,722 \cdot asr(\%forest)$	0,04	0,55
		B2	$0,439 - 0,307 \cdot asr(\%forest) + 5,192 \cdot 10^{-4} \cdot PA_{moy}$	0,39	0,12
		B3	$0,589 - 0,418 \cdot asr(\%forest) + 4,397 \cdot 10^{-4} \cdot PA_{moy}$	0,33	0,14
		ln(C2)	$6,435 - 1,582 \cdot VarT + 0,005 \cdot PA_{moy}$	0,52	1,48
		ln(C3)	$13,513 + 0,017 \cdot PA_{moy}$	0,26	4,40
HER 2	102	ln(A3)	$13,148 - 1,203 \cdot \ln(SL_{cv}) - 0,152 \cdot DD_{moy} - 0,005 \cdot PA_{moy}$	0,38	1,12
		B2	$0,169 + 0,211 \cdot asr(\%grass) + 6,360 \cdot 10^{-4} \cdot PA_{moy}$	0,36	0,20
		B3	$0,248 + 7,317 \cdot 10^{-4} \cdot PA_{moy}$	0,16	0,22
		ln(C2)	$23,032 - 2,125 \cdot VarT - 0,198 \cdot DD_{moy}$	0,55	1,29
		ln(C3)	$-7,662 + 1,769 \cdot \ln(AWC_{moy}) - 0,213 \cdot DD_{moy} + 0,005 \cdot PA_{moy}$	0,49	3,05
HER 3	73	ln(A3)	$5,018 + 0,226 \cdot \ln(HAND_{min})$	0,05	0,86
		B2	$1,471 - 1,834 \cdot HAND_{cv}$	0,06	0,20
		B3	$1,474 - 1,443 \cdot HAND_{cv}$	0,07	0,21
		ln(C2)	$33,071 - 2,757 \cdot asr(\%grass) - 2,743 \cdot VarT - 0,043 \cdot DD_{moy}$	0,27	1,32
		ln(C3)	$5,522 - 2,485 \cdot asr(\%grass)$	0,14	1,37

Vois.	Nombre bassins	Param.	Modèle	R ² -ajusté (cal.)	RMSE (val.)
HER 4	44	ln(A3)	$6,816 - 1,215 \cdot \text{asr}(\%imp) - 0,180 \cdot DD_{moy}$	0,43	0,91
		B2	$1,146 - 0,220 \cdot \text{asr}(\%imp)$	0,17	0,21
		B3	$7,080 - 0,910 \cdot VarT - 3,194 \cdot 10^{-4} \cdot PA_{moy}$	0,27	0,22
		ln(C2)	$8,244 + 0,963 \cdot \text{asr}(\%imp) - 0,296 \cdot DD_{moy}$	0,38	1,28
		ln(C3)	$4,759 - 0,505 \cdot \ln(SL_{cv})$	0,23	0,62
HER 5	60	ln(A3)	$17,133 - 1,215 \cdot VarT - 0,754 \cdot \ln(Z_{q50})$	0,33	0,58
		B2	$0,637 + 0,388 \cdot \text{asr}(\%forest)$	0,28	0,14
		B3	$0,144 + 7,159 \cdot 10^{-4} \cdot PA_{moy}$	0,29	0,15
		ln(C2)	$2,746 - 0,405 \cdot DD_{moy} + 0,007 \cdot PA_{moy}$	0,33	1,20
		ln(C3)	$-4,657 + 11,479 \cdot \text{asr}(\%forest) + 3,121 \cdot \ln(SL_{cv})$	0,31	3,04
HER 6	91	ln(A3)	$6,114 - 0,036 \cdot DD_{max}$	0,02	0,56
		B2	$2,146 - 0,305 \cdot VarT + 0,040 \cdot DD_{moy}$	0,23	0,19
		B3	$2,061 - 0,291 \cdot VarT + 0,039 \cdot DD_{moy}$	0,24	0,18
		ln(C2)	$19,713 + 9,677 \cdot TA_{cv} - 2,602 \cdot VarT - 1,696 \cdot \text{asr}(\%grass)$	0,41	1,09
		ln(C3)	$32,479 - 4,962 \cdot VarT$	0,07	3,93
HER 7	55	ln(A3)	$9,919 - 0,004 \cdot PA_{moy}$	0,57	1,25
		B2	$1,050 - 0,403 \cdot \text{asr}(\%imp)$	0,12	0,33
		B3	$1,041 - 0,328 \cdot \text{asr}(\%imp)$	0,07	0,32
		ln(C2)	$-4,957 + 1,738 \cdot \ln(Z_{q50}) + 0,833 \cdot \ln(PA_{cv})$	0,61	2,78
		ln(C3)	$5,533 + 0,478 \cdot \ln(PA_{cv}) + 0,093 \cdot SL_{max}$	0,62	3,63
HER 8	88	ln(A3)	$4,198 + 0,933 \cdot DD_{sd}$	0,15	0,84
		B2	$4,671 - 0,514 \cdot VarT - 0,004 \cdot nP_0$	0,21	0,30
		B3	$3,795 - 0,479 \cdot VarT$	0,08	0,32
		ln(C2)	$-3,028 + 9,804 \cdot TA_{cv} + 1,690 \cdot \ln(AWC_{moy}) - 0,130 \cdot DD_{moy}$	0,41	2,34
		ln(C3)	$-6,235 + 1,635 \cdot \ln(Z_{q50})$	0,28	1,66
HER 9	61	ln(A3)	$5,836 - 0,834 \cdot \text{asr}(\%imp)$	0,16	0,93
		B2	$3,000 - 0,411 \cdot VarT + 0,380 \cdot \text{asr}(\%grass)$	0,28	0,21
		B3	$2,747 - 0,343 \cdot VarT$	0,15	0,25
		ln(C2)	$3,053 + 1,668 \cdot \text{asr}(\%forest) - 0,028 \cdot DD_{moy} + 0,007 \cdot PA_{moy}$	0,56	1,49
		ln(C3)	$-11,259 + 0,014 \cdot PA_{moy}$	0,18	4,71
HER 10	33	ln(A3)	$7,895 - 4,020 \cdot \text{asr}(\%grass)$	0,25	1,10
		B2	$0,672 - 0,192 \cdot \ln(PA_{cv})$	0,18	0,26
		B3	$0,684 - 0,182 \cdot \ln(PA_{cv})$	0,15	0,27
		ln(C2)	$1,878 + 3,128 \cdot \text{asr}(\%grass) + 0,192 \cdot SL_{max}$	0,58	0,76
		ln(C3)	$3,990 + 4,818 \cdot TA_{cv}$	0,53	0,64

Pour aider à l'interprétation des régressions par HER, le Tableau 5.9 propose un résumé des différents descripteurs qui sont ressortis pour expliquer chaque paramètre ainsi que le nombre de fois où ils sont ressortis et le signe des coefficients qui ont été calés. Lorsqu'un descripteur est ressorti plusieurs fois, nous remarquons en premier lieu que le signe du coefficient qui a été estimé est toujours le même pour les HER.

Tableau 5.9 : Résumé des différents descripteurs pouvant expliquer chaque paramètre (A3, B2, B3, C2 et C3) suivant les HER, avec le nombre de fois où ces descripteurs ressortent pour expliquer les paramètres suivant les HER ainsi que le signe des coefficients qui leur sont associés. Les cellules en gras correspondent aux descripteurs ressortis majoritairement pour expliquer chaque paramètre.

	A3	B2	B3	C2	C3
S					
DD_{max}	1 fois (négatif)				
DD_{moy}	2 fois (négatif)	1 fois (positif)	1 fois (positif)	6 fois (négatif)	1 fois (négatif)
DD_{sd}	1 fois (positif)				
Z_{q50}	1 fois (négatif)			1 fois (positif)	1 fois (positif)
Z_{cv}					
SL_{max}				1 fois (positif)	1 fois (positif)
SL_{cv}	1 fois (négatif)				2 fois (négatif)
$HAND_{min}$	1 fois (positif)				
$HAND_{cv}$		1 fois (négatif)	1 fois (négatif)		
PA_{moy}	2 fois (négatif)	2 fois (positif)	4 fois (positif)	3 fois (positif)	3 fois (positif)
PA_{cv}		1 fois (négatif)	1 fois (négatif)	1 fois (positif)	1 fois (positif)
nP_0		1 fois (négatif)			
TA_{cv}				2 fois (positif)	1 fois (positif)
$VarT$	1 fois (négatif)	3 fois (négatif)	4 fois (négatif)	4 fois (négatif)	1 fois (négatif)
$\%imp$	2 fois (négatif)	2 fois (négatif)	1 fois (négatif)	2 fois (positif)	
$\%forest$	1 fois (négatif)	2 fois (négatif)	1 fois (négatif)		1 fois (positif)
$\%grass$	1 fois (positif)	2 fois (positif)		3 fois (négatif)	1 fois (négatif)
DR_{cv}					
AWC_{moy}				1 fois (positif)	1 fois (positif)
AWC_{cv}					

A l'échelle nationale, les régressions et les descripteurs retenus établissent des relations moyennes sur toute la France mais ne peuvent pas représenter les régimes et processus hydrologiques dominants de chaque bassin versant. Les R^2 -ajustés de chaque régression sont donc relativement faibles, entre 0,10 et 0,33. A l'échelle des HER, cette hétérogénéité peut être mieux prise en compte. Les descripteurs pour expliquer chaque paramètre sont expliqués par la suite.

Capacité maximale du réservoir de production A3

Ce paramètre est laissé libre uniquement dans la structure à 3 paramètres. Le paramètre A3 représente la capacité maximale du réservoir de production. Plus ce paramètre prend de faibles valeurs, plus il représente un bassin productif.

A l'échelle globale, ce paramètre est uniquement lié à des variables climatiques : il diminue lorsque la variabilité mensuelle des températures ($VarT$) et la pluie moyenne interannuelle (PA_{moy}) augmentent. $VarT$ est principalement lié à A3 lorsque ce descripteur prend de faibles valeurs, ce qui correspond à des bassins pour lesquels les saisons sont peu marquées, typiquement les bassins uniformes qui sont des bassins peu productifs. Les bassins peu productifs se situent de plus dans des zones à faibles pluviométries. A l'échelle des HER, trois descripteurs ressortent le plus pour expliquer ce paramètre : les valeurs de A diminuent lorsque le pourcentage de la surface du bassin couverte par une zone imperméable ($\%imp$), la densité de drainage moyenne (DD_{moy}) ou PA_{moy} augmentent. Si le rôle de PA_{moy} a déjà été discuté, le rôle de $\%imp$ et DD_{moy} semble aussi logique puisque lorsque les caractéristiques augmentent, la capacité tampon du bassin diminue. Les deux régions pour lesquels A3 a un lien avec $\%imp$ sont la région Vosges/Alsace (HER 4) et la région Coteaux Aquitains/Landes/Causse Aquitains (HER 9). La première région regroupe des bassins assez productifs situés sur des sols peu perméables alors que la seconde est caractérisée par des roches très perméables et des bassins dont le débit moyen annuel est faible.

Paramètres correcteurs B2 et B3

Pour les deux structures du modèle, les paramètres B2 et B3 sont des paramètres correcteurs du modèle LoiEauJ. Ils permettent de prendre en compte les échanges non atmosphériques et non modélisables par la structure simplifiée du modèle (infiltration, échanges souterrains, ...) ainsi que les erreurs dues à la structure du modèle. La plage de valeurs de ces deux paramètres varie peu, comprise entre 0 et 2. Lorsque B2 ou B3 ont des valeurs inférieures à 1, le modèle perd de l'eau et inversement, lorsque ces paramètres ont des valeurs supérieures à 1, le modèle tend à gagner de l'eau.

A l'échelle nationale, B2 augmente avec l'altitude médiane (Z_{q50}) mais diminue lorsque $VarT$ augmente alors que B3 augmente avec PA_{moy} et diminue lorsque $VarT$ augmente. Pour le paramètre B2, celui-ci possède de fortes valeurs pour les bassins montagneux, notamment

dans les Alpes et les Pyrénées. Ce paramètre corrige probablement les estimations des précipitations en montagne souvent sous-estimées ainsi que les sorties du module de neige dont les paramètres sont régionalisés par massif. Le paramètre B3 augmente lorsque la pluie moyenne (PA_{moy}) augmente. Cela concerne notamment les bassins montagneux pour lesquels PA_{moy} est relativement élevé. Comme expliqué précédemment, lorsque la variabilité de la température augmente, les bassins sont plus productifs ce qui expliquerait que les paramètres B2 et B3 diminuent lorsque $VarT$ augmente. A l'échelle des HER, B2 et B3 sont avant tout reliés à $VarT$.

A l'échelle nationale, le pouvoir explicatif de ces régressions restent relativement faible (R-ajusté de 18% pour B2 et 10% pour B3). Nous remarquons cependant que lorsque le nombre de paramètres libres du modèle augmente, le pouvoir explicatif de la régression diminue mais les valeurs de RMSE restent relativement proches, 0,23 pour B2 et 0,24 pour B3.

Capacité maximale du réservoir de transfert C2 et C3

Ces deux paramètres jouent un rôle lors de la décrue, notamment sur la courbe de tarissement et donc sur la simulation des différents indices d'étiage. Plus ce paramètre a des valeurs élevées, plus le tarissement est lent. Avant d'interpréter les descripteurs expliquant ces paramètres, il est à noter que les plages de C2 et C3 diffèrent. En effet, nous avons observé que la plage des valeurs de C3 est beaucoup plus petite que celle de C2. Pour C3, 95% des bassins versants ont été calés entre 0 et 400 mm alors que pour C2 cette plage est entre 0 et 2 000 mm. Même si les corrélations linéaires (coefficient de Pearson) entre la capacité maximale du réservoir de production et celle du réservoir de transfert ne sont pas élevées (-39% pour le modèle à 2 paramètres et -9% pour le modèle à 3 paramètres), il semblerait que ces paramètres soient liés et que de petites valeurs du paramètre A entraîneraient de grandes valeurs du paramètre C.

A l'échelle nationale, C2 augmente avec la pente maximale (SL_{max}) mais diminue lorsque $VarT$ et DD_{moy} augmentent. C3 augmente avec le coefficient de variation de la température moyenne (TA_{cv}) et diminue lorsque DD_{moy} augmente. Le lien entre SL_{max} et C2 concerne principalement les bassins montagneux pour lesquels le paramètre C2 a des valeurs très importantes. Ces bassins ont des écoulements en période d'étiage assez soutenus. Cependant l'étiage de ces bassins est soutenu par la fonte et non pas des processus liés à la

nappe. Il se pourrait alors que les valeurs prises par ce paramètre compensent les valeurs régionalisés des paramètres du module neige. Le lien entre C2 et $VarT$ concerne une nouvelle fois principalement les bassins possédant une faible variation mensuelle de la température. Ce groupe de bassins est principalement constitué des bassins uniformes pour lesquels l'écoulement est soutenu par les nappes en période d'étiage. Le lien entre TA_{cv} et C3 concerne majoritairement les bassins méditerranéens. En effet, ces bassins possèdent des valeurs de C3 supérieures à celles des bassins pluviaux mais bien inférieures à celles des bassins nivaux et uniformes. Cette liaison est plus difficile à interpréter puisque ces bassins ont des tarissements assez rapides et des indices d'étiage relativement faibles voire nulles. Enfin, la DD_{moy} augmente lorsque les cours d'eau sont très ramifiés et qu'il y a peu d'infiltrations sur le bassin, ce qui entraîne alors des décrues rapides, ce qui se modélise par des valeurs de C2 et C3 plus faibles. A l'échelle des HER, C2 est principalement relié à DD_{moy} et C3 à PA_{moy} .

5.3.6 Régressions et interpolations des résidus

Dans ce paragraphe, nous comparons, sur l'échantillon de référence, l'impact du choix du voisinage et de la prise en compte des résidus sur la régression linéaire. Le Tableau 5.10 résume les performances des régionalisations de chaque paramètre en fonction de la méthode.

Tableau 5.10 : Impact du choix du voisinage sur les régressions et de la prise en compte des résidus sur les régressions linéaires pour régionaliser A3, B2, B3, C2 et C3 (RG : régression globale, RH : régressions par HER, RGR : régression globale avec interpolation des résidus et RHR : régressions par HER avec interpolation des résidus). Les valeurs en gras sont celles pour lesquelles la méthode de régression est la plus performante vis-à-vis du RMSE calculé entre paramètres calés et paramètres régionalisés.

RMSE [-]	RG	RH	RGR	RHR
ln(A3)	1,02	0,88	0,88	0,87
B2	0,23	0,22	0,21	0,21
B3	0,24	0,23	0,22	0,22
ln(C2)	1,87	1,61	1,58	1,51
ln(C3)	3,89	3,39	3,67	3,41

Pour les paramètres B2 et B3, le choix du voisinage et de la prise en compte des résidus a peu d'impacts sur la régionalisation de ces paramètres avec des valeurs RMSE entre 0,21 et 0,23 pour B2 et 0,22 et 0,24 pour B3. Pour les 3 autres paramètres, A3, C2 et C3, la régression globale est la moins performante des 4 méthodes. Pour le paramètre A3, les 3 autres méthodes donnent des résultats équivalents. Pour le paramètre C2, l'interpolation des

résidus améliore la régionalisation du paramètre, avec un voisinage global et par HER. La méthode RHR semble néanmoins plus performante pour la régionalisation de C2.

La Figure 5.3 présente une comparaison graphique des paramètres calés et des paramètres régionalisés par les différentes régressions. Comme attendu, lorsque les paramètres sont régionalisés à l'échelle nationale, les valeurs des paramètres sont alors proches de la valeur médiane des valeurs calées de chaque paramètre. Ce résultat confirme la mauvaise performance de la régression à l'échelle globale. A l'échelle des HER, les valeurs régionalisées des paramètres sont globalement plus proches des valeurs calées qu'à l'échelle nationale. Cependant, les régressions à l'échelle régionale font ressortir des bassins ayant un comportement hydrologique différent du reste des bassins dans la région, notamment des bassins de plaine dans les régions montagneuses. Lorsque nous prenons en compte les résidus à l'échelle globale, les valeurs régionalisées se rapprochent des valeurs calées, confirmant que le manque de robustesse des régressions globales est dû à la corrélation spatiale et peut être corrigé en interpolant spatialement les résidus. A l'échelle régionale, l'ajout des résidus améliore aussi la régionalisation des paramètres.

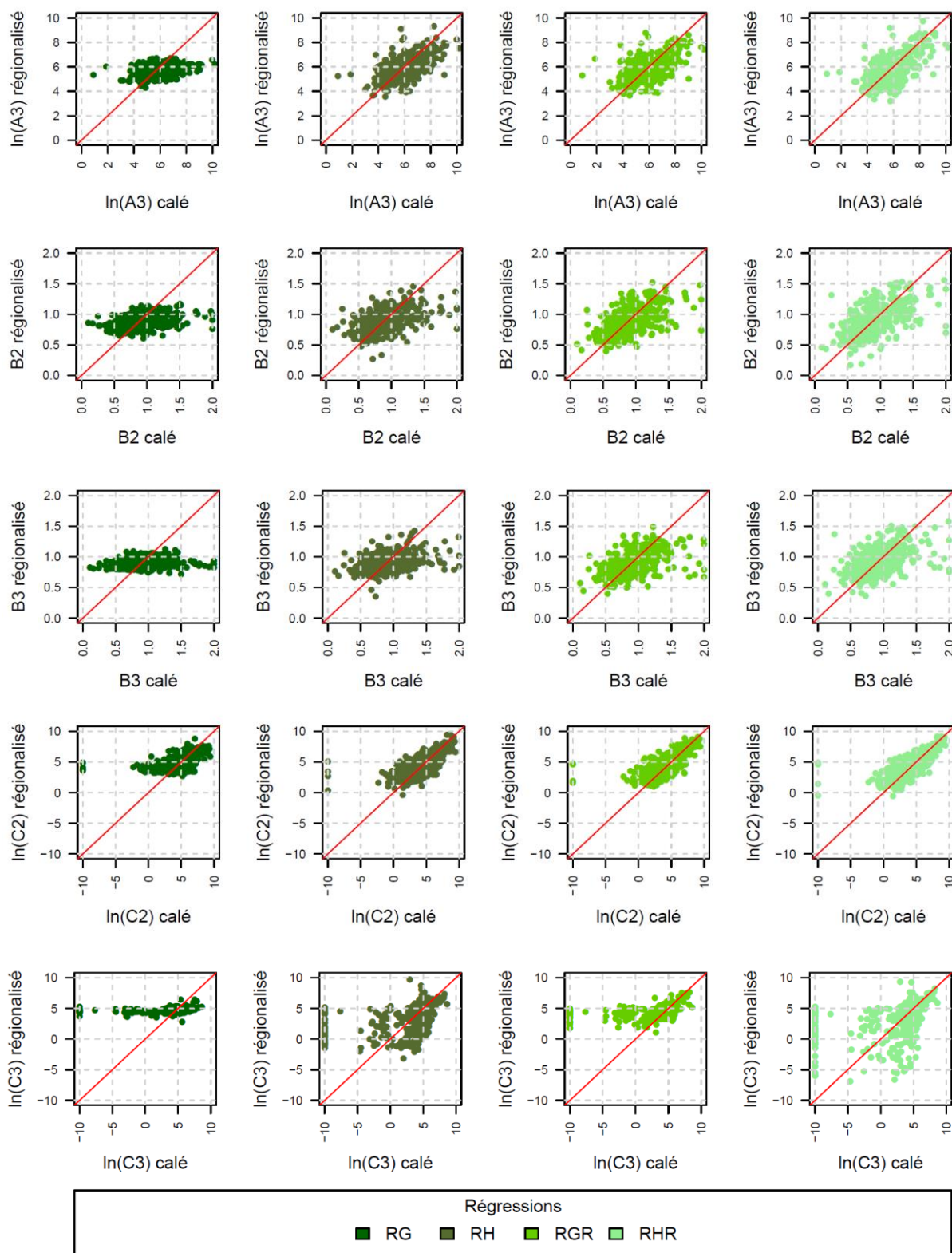


Figure 5.3 : Comparaisons entre paramètres calés et paramètres régionalisés en fonction du voisinage de la régression et de l'absence ou de la prise en compte des résidus (de gauche à droite : régression globale (RG), régressions par HER (RH), régression globale avec prise en compte des résidus (RGR), régressions par HER avec prise en compte des résidus(RHR)).

En conclusion, la méthode de régression par HER permet une meilleure régionalisation des paramètres que la méthode de régression globale. En effet, elle permet de construire des modèles de régressions sur des domaines plus homogènes et de sortir des descripteurs de bassins versants plus en lien avec les processus hydrologiques dominants. L'interpolation spatiale des résidus améliore ensuite les régionalisations en prenant en compte la cohérence spatiale des descripteurs et des paramètres. Pour ces raisons, nous choisissons la régression linéaire par HER avec interpolation des résidus pour la suite.

5.3.7 Comparaison entre proximité spatiale et régressions linéaires multiples

Après avoir déterminé les configurations optimales pour la méthode de proximité spatiale (PID avec 5 voisins, puissance 1, distance calculée entre centroïdes et voisinage global) et pour la méthode de régression (régression linéaire par HER avec interpolation des résidus), nous comparons maintenant ces deux méthodes en évaluant leur performance sur les paramètres régionalisés puis sur les débits simulés.

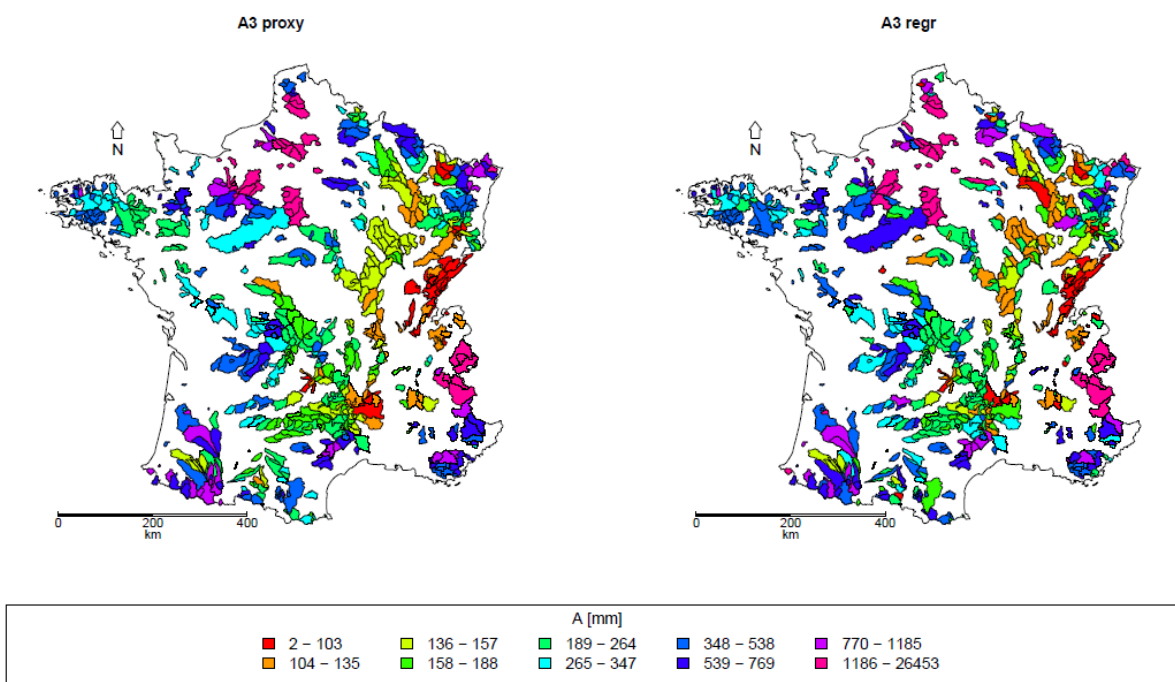
Tableau 5.11 : Comparaison des deux méthodes de régionalisation sur les 5 paramètres. Les valeurs en gras sont celles pour lesquelles la méthode de régionalisation est la plus performante vis-à-vis du RMSE calculé entre paramètres calés et paramètres régionalisés.

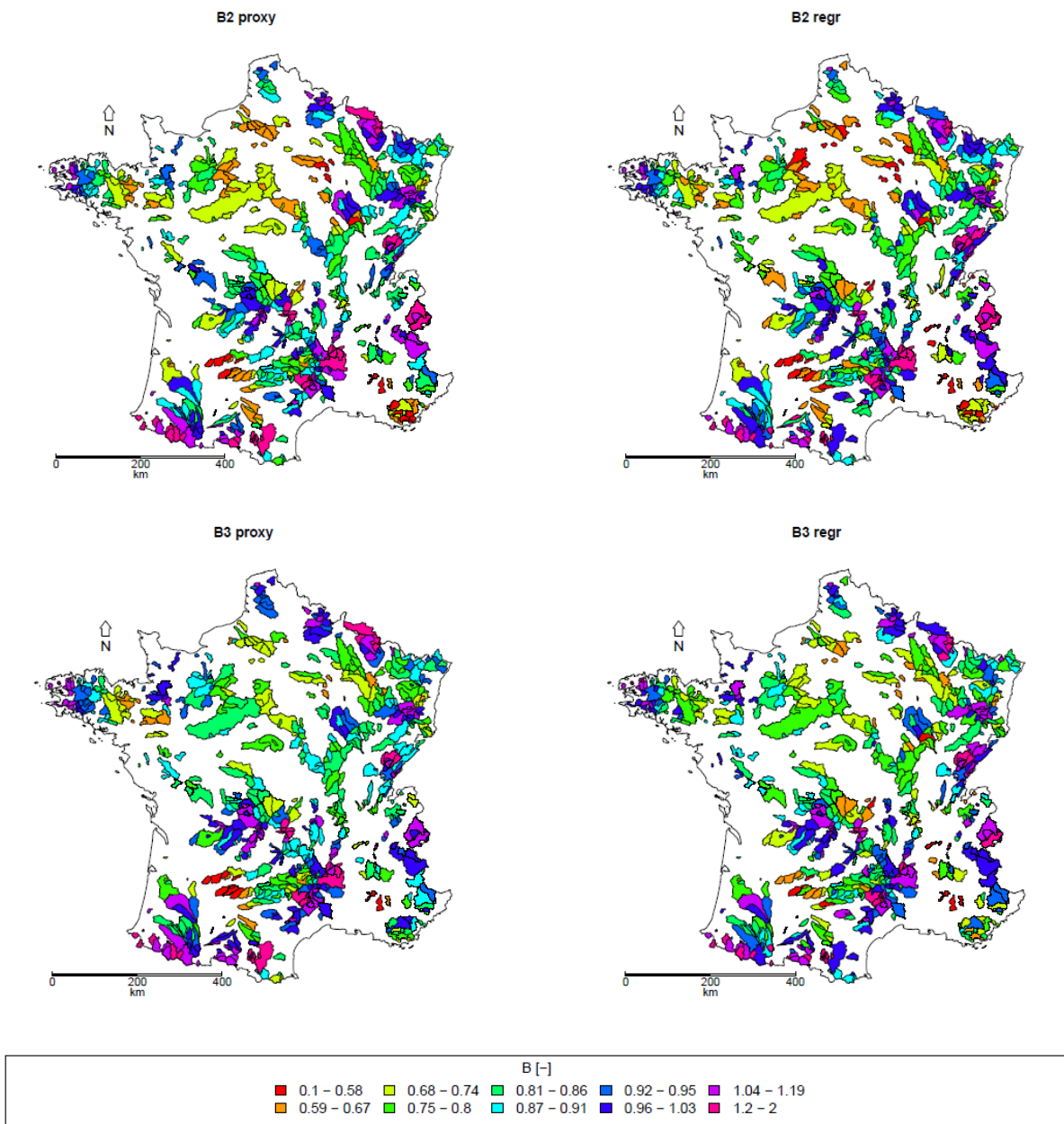
RMSE [-]	Proximité spatiale	Régression
ln(A3)	0,86	0,87
B2	0,21	0,21
B3	0,22	0,22
ln(C2)	1,68	1,51
ln(C3)	3,66	3,41

Les deux méthodes de régionalisation donnent des résultats proches pour la régionalisation des paramètres A3, B2 et B3. La méthode de régression semble améliorer la régionalisation des paramètres C2 et C3. Cependant, ces paramètres sont moins bien régionalisés que les trois autres avec des valeurs de RMSE relativement élevées par rapport aux trois autres paramètres. En regardant uniquement les valeurs de RMSE, la méthode de régression permet une meilleure régionalisation des paramètres des deux structures de LoiEauJ. La régionalisation du paramètre correcteur, B ne semble pas impactée par le nombre de paramètres libres dans la structure du modèle et les deux méthodes de régionalisation testées avec leurs différentes sensibilités ont donné des résultats proches pour ce paramètre B. La régionalisation de la capacité maximale du réservoir de transfert, C, est impactée par le

nombre de paramètres libres de la structure. En effet, le paramètre C3 est beaucoup plus difficile à régionaliser que le paramètre C2, quelle que soit la méthode de régionalisation.

Les cartographies de chaque paramètre régionalisé par chaque méthode sont illustrées dans la Figure 5.4. Nous remarquons pour chaque paramètre une cohérence régionale des valeurs pour les 2 méthodes mais celle-ci diffère suivant les paramètres. Les valeurs régionalisées pour chaque paramètre semblent relativement proches quelle que soit la méthode, exceptées pour celles du paramètre C3. En effet, pour de nombreux bassins, ces valeurs régionalisées par la méthode de régression sont relativement faibles (inférieures à 1 mm) par rapport à celles régionalisées par la méthode de proximité spatiale. Ce résultat semble indiquer que pour certains bassins, il y a compensation entre A et C ce qui rend le paramètre C inutile et veut ainsi dire que le routage est exclusivement assuré par la branche représentant l'écoulement de surface. Ces zones où les valeurs de C sont proches de 0, correspondent aux zones où A est sous-estimé par la régression.





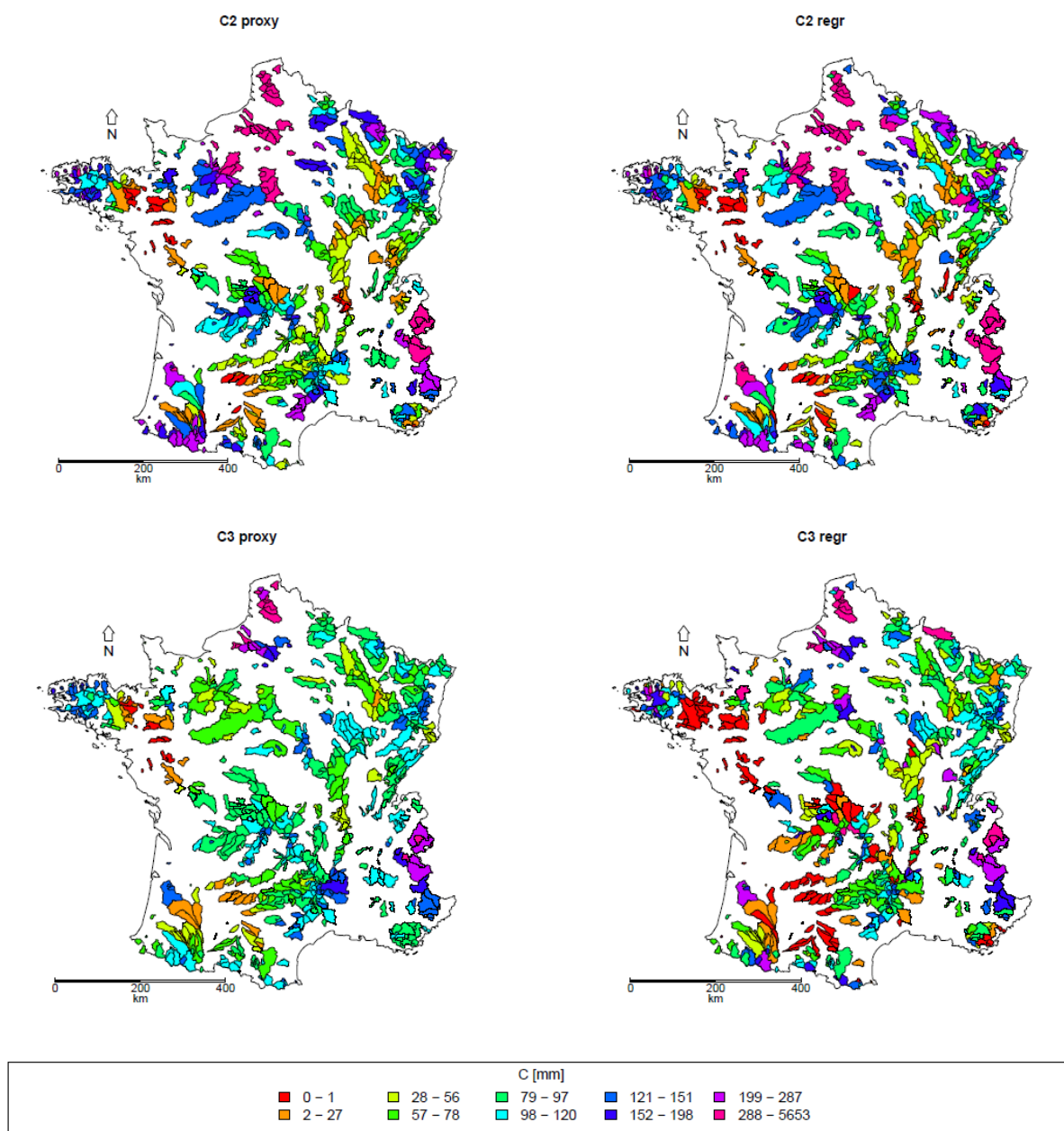


Figure 5.4 : Cartographies des 5 paramètres en fonction de la méthode de régionalisation.

Nous comparons maintenant les débits simulés à l'aide des paramètres régionalisés par les deux méthodes. Ces débits sont comparés aux débits simulés par une méthode de régionalisation de référence où les paramètres sont imposés aux valeurs médianes sur l'échantillon et aux débits simulés lorsque les paramètres sont calés. Ces résultats sont illustrés par la Figure 5.5. Comme attendu, les simulations par tous les modèles régionalisés sont moins robustes que les simulations issues des modèles où les paramètres sont calés. Pour le modèle à 2 paramètres, les méthodes de proximité spatiale et de régression sont plus robustes que la méthode de référence mais ces deux méthodes ont des performances équivalentes. Cette absence de différences entre les deux méthodes peut être due au grand

nombre de bassins versants de l'échantillon de référence. Ces conclusions rejoignent celles d'autres études (Oudin *et al.*, 2008 ; Samuel *et al.*, 2011). Les conclusions diffèrent cependant pour le modèle à 3 paramètres. Excepté pour la simulation continue des hautes eaux, les méthodes de régionalisation par proximité spatiale et régression sont plus robustes que la méthode de référence mais la méthode de régression semble moins robuste que la méthode de proximité spatiale pour la simulation des différents indices d'étiage et des simulations continues. Ce manque de robustesse de la méthode de régression provient de la mauvaise régionalisation du paramètre C3, notamment pour les bassins où il a été régionalisé à des valeurs bien trop faibles. Pour le modèle à 3 paramètres, une amélioration de RMSE sur les paramètres régionalisés n'implique pas une meilleure simulation des débits. Pour ce modèle, la méthode de régionalisation retenue est donc la méthode de proximité spatiale. Pour le modèle à 2 paramètres, les résultats des simulations sont relativement proches. L'indice d'étiage VCN3(5) est mieux restitué par la méthode de régression. La méthode de proximité spatiale est plus simple à mettre en œuvre, cependant la méthode de régression permet ici d'expliquer les paramètres et d'améliorer la régionalisation du VCN3(5), elle sera donc préférée pour la suite.

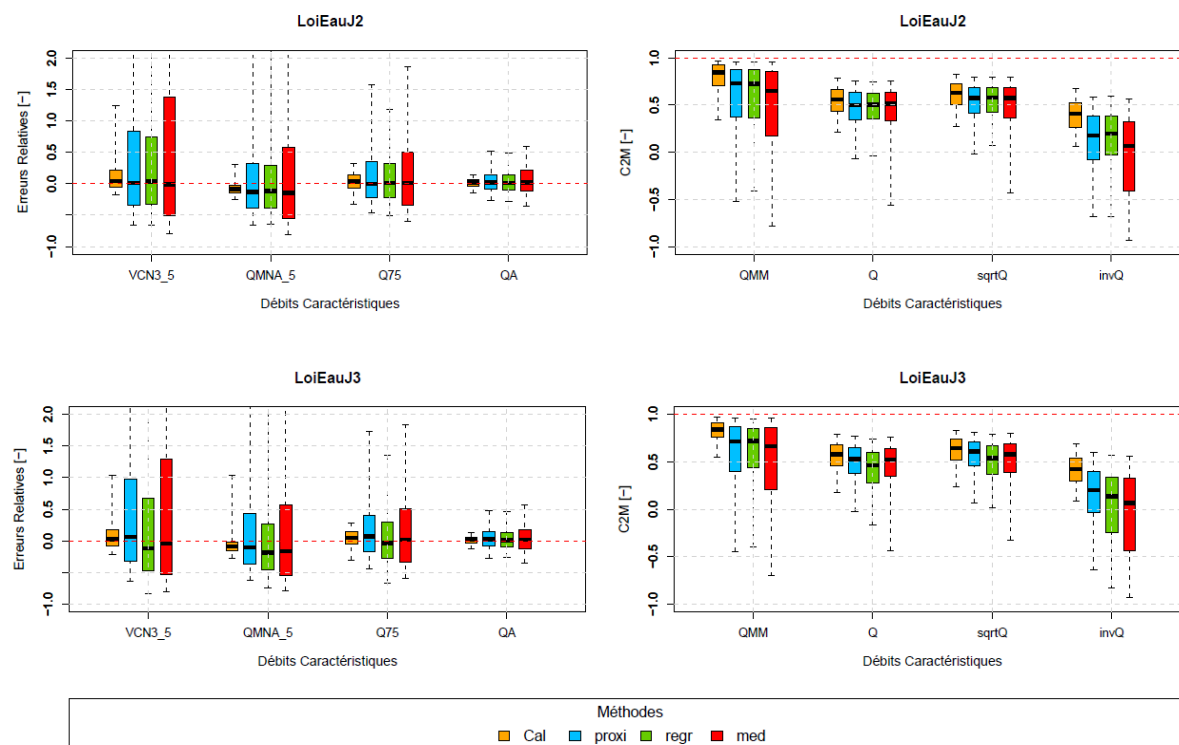


Figure 5.5 : Distribution des performances pour la simulation des débits caractéristiques (VCN3(5), QMNA(5), Q75, QA) et des simulations continues (Q_{MM} , Q , $Q^{0.5}$, $1/Q$) pour le modèle LoiEauJ2 (en haut) et LoiEauJ3 (en bas). Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut. Les différentes couleurs indiquent les distributions lorsque les paramètres sont calés (Cal) et chacune des méthodes de régionalisation dans leur configuration optimale (prox : proximité spatiale, regr : régression, med : paramètres médians).

La Figure 5.6 permet de comparer les débits caractéristiques simulés à l'aide du modèle LoiEauJ à 2 paramètres régionalisés par les régressions par rapport aux observations. Les valeurs simulées sont assez proches des valeurs observées. Nous remarquons cependant qu'un certain nombre de bassins ont des débits caractéristiques relativement éloignés de leurs valeurs observées. Ces bassins correspondent à des bassins ayant une hydrologie particulière. Nous retrouvons les bassins possédant une forte composante souterraine (par exemple le bassin de la Laine à Soulaines-Dhuys, H1333010, et le bassin de la Magescq à Magescq, S4214010) mais aussi des bassins karstiques (par exemple le bassin de la Loue à Vuillafans, U2604030). Ces bassins sont relativement difficiles à simuler par les modèles pluie-débit parcimonieux et leurs débits sont relativement sous-estimés. Certains bassins nivaux possédant un comportement très particulier sont ressortis et ont été relativement sous-estimés. C'est par exemple le cas du bassin du Doron de Bozel à Perrière, W0224010. Ces bassins ont été conservés dans l'échantillon de base mais sont ressortis comme étant des horsains et n'ont pas participé au calage des différentes méthodes de régionalisation.

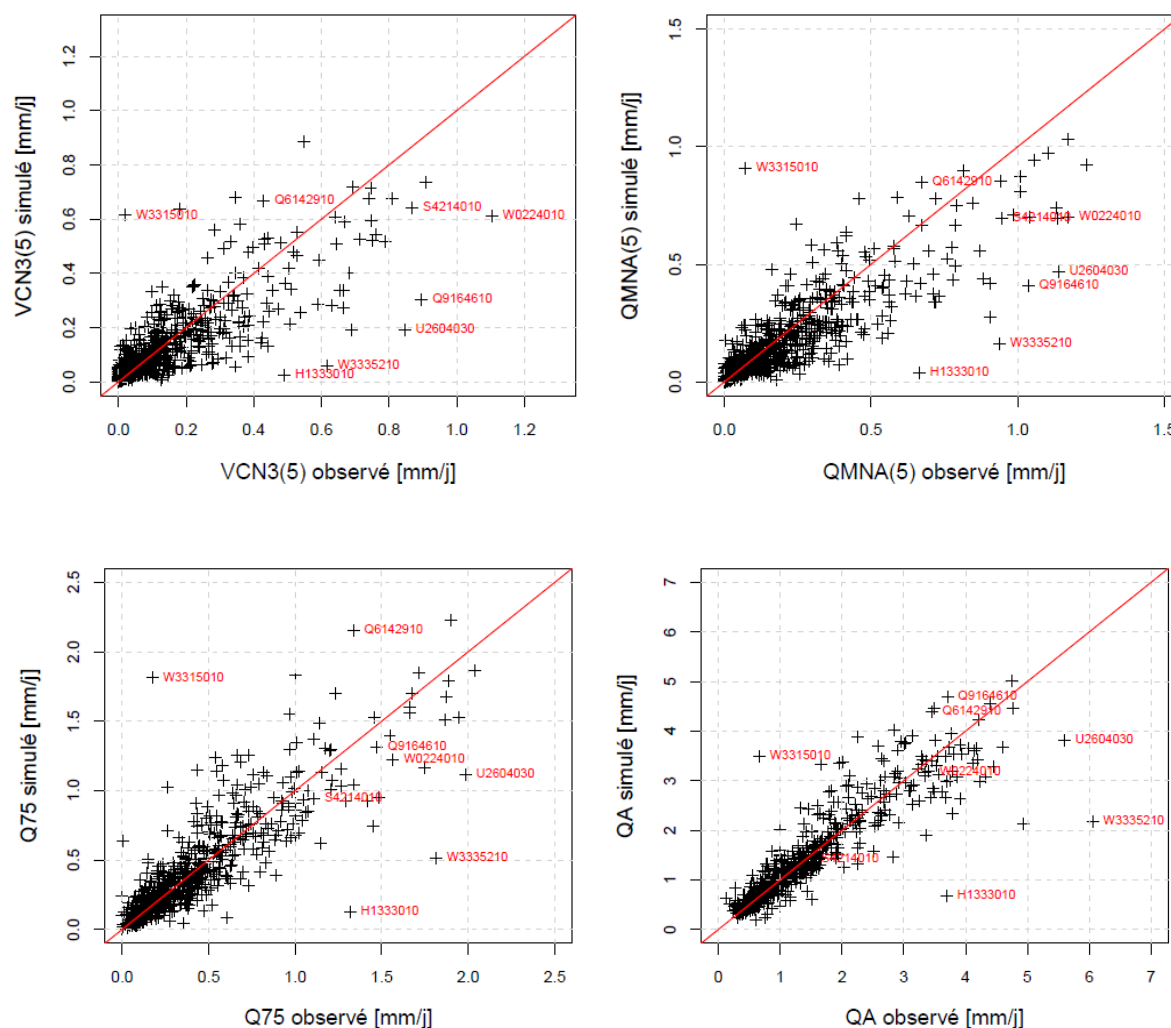


Figure 5.6 : Comparaison entre les quatre débits caractéristiques observés et simulés à l'aide du modèle LoiEauJ à deux paramètres régionalisés.

5.4 Synthèse du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons cherché à déterminer la meilleure méthode de régionalisation pour estimer les paramètres des modèles LoiEauJ à 2 et à 3 paramètres. Les deux méthodes comparées dans ce chapitre étaient la proximité spatiale par la méthode de pondération par l'inverse de la distance et la régression linéaire multiple. Dans un premier temps, les configurations optimales de ces deux méthodes ont été déterminées : (i) la méthode de pondération par l'inverse de la distance calculée entre centroïdes de bassins versants pour 5 voisins choisis dans un voisinage global et une puissance 1, (ii) la méthode de régression linéaire multiple par HER avec interpolation des résidus. Ces configurations optimales sont les mêmes pour les deux modèles LoiEauJ étudiés dans ce chapitre. Pour le modèle à 2 paramètres, ces deux méthodes ont des résultats proches mais la méthode par régression a été

privilegiée car plus efficace pour la simulation du VCN3(5). Pour le modèle à 3 paramètres, la méthode par régression n'a pas permis une bonne simulation des débits, notamment à cause d'une mauvaise régionalisation de la capacité maximale du réservoir de transfert. Malgré ces conclusions, la méthode de régressions régionales a semblé prometteuse, permettant de mieux expliquer les paramètres en fonction des régions et des régimes hydrologiques. Cependant, cette méthode peut encore être améliorée en intégrant des descripteurs de bassins versants relatifs à l'hydrogéologie des bassins. Un travail sur la définition des régions homogènes et similaires hydrologiquement pourrait aussi améliorer les résultats. Enfin, il conviendrait pour un travail plus complet de comparer ces méthodes à la méthode de similarité définie en introduction et la méthode de calage régionale afin de garder la cohérence entre jeux de bassins versants, ce qui n'est pas le cas quand les paramètres sont régionalisés par régression uniquement. Il a été montré que le critère d'évaluation, RMSE calculé entre paramètres régionalisés et paramètres calés, n'est pas le plus adapté pour évaluer et choisir entre les différentes méthodes de régionalisation. Il conviendrait donc de comparer plusieurs critères d'évaluation en intégrant par exemple un critère évaluant la simulation des débits pour caler les coefficients des différents modèles de régression et ainsi garder la cohérence entre les paramètres (Hundechea et Bardossy, 2004).

Dans ce chapitre, les débits simulés par les modèles régionalisés n'ont pas été comparés entre eux mais le sont dans le chapitre suivant avec les débits simulés par les modèles GR4J à 3 et 4 paramètres régionalisés. Les mêmes tests ont été effectués pour la régionalisation des paramètres de ces deux structures de GR4J. Les résultats ne sont pas présentés ici mais les conclusions ont rejoint celles de précédentes études montrant que la proximité spatiale est la meilleure méthode de régionalisation des paramètres de ces modèles (Oudin *et al.*, 2008).

6 Simulations d'indices d'étiage en contexte non jaugé

6.1 Introduction

Disposer d'informations sur l'étiage en tout point des cours d'eau est important pour la gestion de la ressource en eau pour différents domaines d'activités tels que l'hydroélectricité, l'irrigation ou les prélèvements en eau potable ainsi que pour la préservation des écosystèmes. L'étiage est défini par différents indices qui servent de base à l'établissement de différentes règles de gestion et qui correspondent à des statistiques obtenues à partir de longues chroniques de débit mesurés aux exutoires de bassins versants (Smakhtin, 2001 ; Tallaksen et Van Lanen, 2004 ; WMO, 2008). La connaissance de ces indices est cependant nécessaire en tout point des cours d'eau, pour des sites non jaugés ou pour lesquels les chroniques de débits mesurés sont trop courtes. Différentes techniques de régionalisation ont été développées pour transférer l'information d'un ou plusieurs bassins donneurs jaugés vers un bassin cible non jaugé. Cette problématique de l'estimation de débits en sites non jaugés a fait l'objet de nombreuses recherches dans le cadre de la décennie PUB (« Prediction in Ungauged Basins ») proposée par l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques, IAHS, en 2003 (Sivapalan *et al.*, 2003). Cette décennie s'est achevée en 2013 après la publication de nombreux articles et synthèses (Parajka *et al.*, 2005 ; Blöschl *et al.*, 2013 ; Hrachowitz *et al.*, 2013 ; Razavi et Coulibaly, 2013).

Deux approches de régionalisation existent pour l'estimation des indices d'étiage en sites non jaugés : (i) une approche stochastique visant à déterminer directement les indices d'étiages et (ii) une approche déterministe exploitant les simulations d'un modèle hydrologique préalablement régionalisé. L'approche stochastique fait appel à différentes méthodes qui peuvent être regroupées en deux catégories :

- les régressions linéaires entre indices et caractéristiques morphologiques des bassins versants,
- les techniques géostatistiques qui consistent souvent à interpoler spatialement les indices.

La méthode par régression linéaire multiple est l'une des méthodes les plus couramment étudiées et qui a fait le plus l'objet de nombreux travaux de recherche. Elle a par exemple été utilisée par Gustard *et al.* (1992), Holmes *et al.* (2002) et Gustard *et al.* (2004) pour l'estimation de différents indices d'étiage en sites non jaugés et aboutir à la création du

logiciel Low Flows 2000 au Royaume-Uni. Cette méthode a aussi été utilisée par Laaha et Blöschl (2007) pour la cartographie du Q95 en Autriche, par Aschwanden et Kan (1999) et Pfaundler *et al.* (2011) pour la création d'un atlas hydrologique en Suisse et par Catalogne et Sauquet (2012) pour la cartographie du QMNA(5) et du VCN10(5) en France. En dehors de l'Europe, nous pouvons aussi citer les travaux de Thomas et Benson (1970), Ries (2002) et Kroll *et al.* (2004) pour la cartographie aux Etats-Unis et ceux de Nathan et McMahon (1990) en Australie. Smakhtin (2001) et Demuth et Young (2004) ont fourni des listes de références très détaillées de l'utilisation de cette méthode à travers le monde. Cette méthode relie un indice d'étiage à des descripteurs de bassins versants tels que la géologie, l'occupation du sol ou le climat, à l'aide de modèles de régressions multiples (Demuth et Young, 2004). Suivant les indices d'étiage régionalisés, les régressions peuvent être additives ou multiplicative (Laaha et Blöschl, 2006b ; Price *et al.*, 2011 ; Catalogne, 2012). Si le domaine d'étude est trop hétérogène, il peut être préférable de le découper en régions homogènes et de définir un modèle de régression par région. Nous parlons alors de régressions régionales par opposition aux régressions globales (Aschwanden et Kan, 1999 ; Laaha et Blöschl, 2006b ; Catalogne, 2012). Ces zones homogènes peuvent être définies par différentes techniques, comme des regroupements expertisés, ou des regroupements par classifications automatiques (Laaha et Blöschl, 2006b ; Vezza *et al.*, 2010 ; Catalogne, 2012 ; Olden *et al.*, 2012). La définition de ces zones se base sur des caractéristiques de bassins versants comme la classification des sols HOST au Royaume-Uni (Young, 2000) ou des caractéristiques climatiques. La saisonnalité de l'étiage permet par exemple des regroupements intéressants (Laaha et Blöschl, 2006b ; Engeland et Hisdal, 2009). La méthode de régression linéaire multiple a plusieurs limites : le choix des descripteurs qui est souvent limité aux données disponibles, la corrélation des données, descripteurs et indices, et la gestion des bassins horsains dont les données particulières peuvent être liées à des problèmes de données ou des comportements hydrologiques atypiques par rapport aux autres bassins versants utilisés pour déterminer le modèle de régression.

Les méthodes d'interpolation spatiale exploitent la corrélation spatiale des indices d'étiage et font l'hypothèse que des bassins versants proches possèdent les mêmes processus dominants et sont donc hydrologiquement similaires. Ces méthodes regroupent les méthodes d'interpolation par l'inverse de la distance et les méthodes géostatistiques. Ces dernières ont fait l'objet de nombreuses recherches récentes (Gottschalk, 1993 ; Sauquet *et al.*, 2000 ; Cressie *et al.*, 2006 ; Gottschalk *et al.*, 2006 ; Skøien *et al.*, 2006 ; Skøien et Blöschl, 2007 ;

Laaha *et al.*, 2013 ; Laaha *et al.*, 2014 ; Skøien *et al.*, 2014). Parmi les techniques utilisées, le top-kriging qui permet de tenir compte des bassins emboîtés (Skøien *et al.*, 2006 ; Laaha *et al.*, 2013 ; Laaha *et al.*, 2014) est très prometteur mais dépend cependant de la densité des sites de mesure et de l'hétérogénéité spatiale des étiages. Cette technique a été comparée aux régressions régionales notamment en Autriche et Laaha *et al.* (2014) ont trouvé que les résultats étaient meilleurs par la méthode de top-kriging, notamment pour des bassins de surfaces moyennes à grandes et géologiquement homogènes. Cette méthode peut aussi être combinée avec celle de régression, globale ou régionale, où les résidus de la régression sont interpolés spatialement par une méthode géostatistique (Chopart et Sauquet, 2008).

L'approche déterministe consiste à utiliser un modèle pluie-débit régionalisé pour simuler des hydrogrammes en tout point des cours d'eau et en déduire les indices d'étiage souhaités. Cette seconde approche est relativement peu utilisée (Smakhtin, 2001). A notre connaissance, seuls Engeland et Hisdal (2009) en Norvège et Folton et Arnaud (2012) en France ont utilisé cette approche récemment. Outre le choix d'une structure de modèle pluie-débit adaptée à la simulation de l'étiage, cette approche implique au préalable d'utiliser une fonction objectif adaptée à l'évaluation de la qualité des simulations de débit en période d'étiage (Smakhtin, 2001) et de régionaliser les paramètres du modèle pluie-débit. Cette approche a l'avantage de permettre l'estimation de tous les indices d'étiage souhaités à partir d'une seule et même méthode, ce qui garantit une cohérence des différents indices obtenus sur un bassin non jaugé et ce qui est un avantage pour son utilisation en opérationnel. Le choix d'utiliser un modèle pluie-débit est aussi intéressant dans un contexte de changement climatique car une fois le modèle hydrologique régionalisé, les indices d'étiage peuvent être calculés sur des chroniques de débits issus de projections climatiques.

Dans la littérature, seuls Engeland et Hisdal (2009) ont comparé ces deux approches pour régionaliser un indice d'étiage, noté Q_c , utilisé en Norvège pour définir le débit réservé en aval des ouvrages hydroélectriques. La méthode choisie pour l'approche stochastique était la régression régionale et le modèle pluie-débit choisi pour la seconde approche était le modèle HBV distribué. Ils en ont conclu sur un échantillon de 21 bassins versants que la méthode de régression régionale était meilleure pour la simulation du Q_c , en particulier pour la simulation des valeurs faibles pris par cet indice.

Dans ce chapitre, nous nous proposons de comparer les deux approches pour la simulation du VCN3(5) en France. Nous évaluerons préalablement l'impact du nombre de paramètres libres d'un modèle pluie-débit sur l'estimation de différents indices en sites non jaugés. La méthodologie sera ensuite testée sur un jeu de bassins versants de validation non utilisés pour les développements méthodologiques décrits dans les chapitres précédents. Les structures journalières, LoiEauJ, et mensuelles, LoiEauM, seront ensuite comparées pour l'estimation d'indices calculées aux intervalles de temps mensuel, le QMNA(5) et annuel, le QA. Le prochain paragraphe présente la méthodologie adoptée dans ce chapitre. Les résultats sont ensuite présentés et discutés.

6.2 Méthodologie

Dans ce paragraphe, nous présentons d'abord les deux méthodes utilisées pour chacune des deux approches comparées par la suite puis les critères d'évaluation.

6.2.1 Approche stochastique pour l'estimation du VCN3(5)

D'après Laaha *et al.* (2014), la méthode par régression linéaire multiple est plus performante dans le cas de bassins versants de petites tailles. Notre échantillon de référence est principalement constitué de bassins de faibles surfaces, 75% des surfaces de bassins de l'échantillon de référence ont une valeur inférieure à 478 km². Cette méthode par régression a donc été choisie pour l'approche stochastique pour estimer le VCN3(5). Nous comparons ici le choix du voisinage de la régression, global ou régional, ainsi que l'apport de la prise en compte de la corrélation spatiale des résidus. Les méthodes, le choix du voisinage et la détermination du meilleur modèle et la gestion des hors-bassins sont expliqués au paragraphe 5.2.2. Les descripteurs choisis pour l'établissement du modèle de régression sont résumés dans le Tableau 6.1. Le choix de ces descripteurs ainsi que les transformations qui leur sont associées, sont expliqués dans le paragraphe 5.2.2.

Tableau 6.1 : Descripteurs considérés avec les éventuelles transformations appliquées pour atteindre la normalité de la distribution (ln : logarithme népérien, asr : arc sinus racine carrée, – : distribution normale atteinte sans transformation, X : aucune transformation n’a permis de normaliser la distribution).

Variable	Unité	Notation	Transformation
Surface du bassin versant	km ²	S	ln
Densité de drainage			
Maximum	km ²	DD_{max}	–
Moyenne	km ²	DD_{moy}	–
Ecart-type	km ²	DD_{sd}	–
Altitude			
Médiane	m NGF	Z_{q50}	ln
Coefficient de Variation	m NGF	Z_{cv}	ln
Pente			
Maximum	%	SL_{max}	X
Coefficient de Variation	%	SL_{cv}	ln
Hauteur au-dessus du drain le plus proche			
Minimum	m	$HAND_{mi}$	ln
Coefficient de Variation	m	$^n HAND_{cv}$	–
Pluies moyennes interannuelles			
Moyenne	mm	PA_{moy}	–
Coefficient de Variation	mm	PA_{cv}	ln
Nombre de jours sans pluie moyen interannuel	jour	nP_0	–
Températures moyennes interannuelles			
Coefficient de Variation	°C	TA_{cv}	X
Variabilité (écart-type) des températures moyennes mensuelles	°C	$VarT$	X
Pourcentage du bassin couvrant une surface imperméable	%	$\%imp$	asr, X
Pourcentage du bassin occupé par la forêt	%	$\%forest$	asr
Pourcentage du bassin occupé par la prairie et/ou de la végétation basse	%	$\%grass$	asr
Profondeur des sols			
Coefficient de Variation	m	DR_{cv}	X
Réserve utile potentielle			
Moyenne	mm	AWC_{moy}	ln
Coefficient de Variation	mm	AWC_{cv}	–

La normalité de la distribution des VCN3(5) a été évaluée à l’aide de différents tests (le test de Shapiro-Wilk, le test de Lilliefors, le test de Anderson-Darling, le test de D’Agostino et le test de Jarque-Bera). Elle a été atteinte en transformant le VCN3(5) à l’aide du logarithme népérien. Dans ce chapitre, nous construisons les modèles de régression sur les distributions des descripteurs avec leur éventuelle transformation et les VCN3(5) transformés par le logarithme népérien. Ce choix de configuration de modèle a donné de meilleurs résultats en Norvège (Engeland et Hisdal, 2009) et aux Etats-Unis (Price *et al.*, 2011).

Les quatre configurations testées sont résumées dans le Tableau 6.2.

Tableau 6.2 : Les 4 modèles de régression testés.

Tests	Méthodes
Test V1	Régression globale sans la prise en compte des résidus
Test V2	Régression par HER sans la prise en compte des résidus
Test V3	Régression globale avec interpolation spatiale des résidus
Test V4	Régression par HER avec interpolation spatiale des résidus

6.2.2 Approche déterministe

Dans ce chapitre, nous comparons 4 structures régionalisées de modèle pluie-débit au pas de temps journalier. Les deux structures du modèle LoiEauJ (à 2 et 3 paramètres) ont été présentées au chapitre 4 et la méthode de régionalisation de leurs paramètres déterminées au chapitre 5. Le modèle GR4J a été présenté au paragraphe 3.2.1. Les structures à 3 et 4 paramètres de GR4J ont été régionalisées par la proximité spatiale (Oudin *et al.*, 2008). Le travail de régionalisation présenté au chapitre 5 a été effectué pour les deux structures de GR4J, à 3 et 4 paramètres. Les résultats non présentés ici ont rejoint ceux de nombreuses études et ont montré que la proximité spatiale donne de meilleures performances pour ce modèle. Le Tableau 6.3 résume les 4 modèles avec leur nombre de paramètres et la méthode de régionalisation des paramètres choisie pour chaque modèle.

Tableau 6.3 : Les 4 modèles journaliers et leur méthode de régionalisation des paramètres.

Tests	Modèle	Nombre de paramètres	Méthodes de régionalisation des paramètres
Test M1	LoiEauJ2	2	Régression par HER avec interpolation spatiale des résidus par la méthode de pondération par l'inverse de la distance à la puissance 1 calculée entre centroïdes de bassins versants entre 5 voisins
Test M2	LoiEauJ3	3	Interpolation par la méthode de pondération par l'inverse de la distance à la puissance 1 calculée entre centroïdes bassins versants entre 5 voisins choisis dans un voisinage global
Test M3	GR4J3	3	Interpolation par la méthode de pondération par l'inverse de la distance à la puissance 1 calculée entre centroïdes des bassins versants entre 5 voisins choisis dans un voisinage global
Test M4	GR4J	4	Interpolation par la méthode de pondération par l'inverse de la distance à la puissance 1 calculée entre centroïdes des bassins versants entre 5 voisins choisis dans un voisinage global

6.2.3 Méthodes d'évaluations

Les données, l'échantillon de bassins versants de référence et les différents débits caractéristiques ont déjà été présentés dans le paragraphe 3.2.1. L'échantillon de validation a été présenté dans le chapitre 2.

La configuration optimale de la méthode de régression pour la simulation du VCN3(5) et l'impact du nombre de paramètres des structures sur les simulations en contexte non jaugé seront évalués préalablement à la comparaison entre les deux approches, stochastique et déterministe. Ces trois tests (test V, test M et test C dans le Tableau 6.4) sont évalués sur l'échantillon de référence de 691 bassins à l'aide de la technique du « leave-one-out ». Chaque bassin est tour à tour considéré non jaugé et les coefficients des modèles de régression pour l'approche stochastique et les paramètres de modèle pluie-débit pour l'approche déterministe sont estimés à l'aide des (n-1) bassins restants. Les performances sont évaluées en validation sur les paramètres estimés pour les bassins considérés non jaugés. Lorsque les méthodes et approches sont comparées pour l'estimation du VCN3(5), le critère d'évaluation est alors l'erreur relative calculée entre les VCN3(5) observé et simulé. Lorsque les modèles pluie-débit sont comparés entre eux, les critères d'évaluation sont des erreurs relatives calculées pour différents indices, VCN3(5), QMNA(5), Q75 et QA, et un C2M ou un C2M3 calculé sur les simulations continues. Ces critères ont été présentés dans le chapitre 4. Ces deux approches sont ensuite comparées sur un échantillon de validation de 141 bassins sur les mêmes critères d'évaluation (test C2 dans le Tableau 6.4). Cet échantillon de bassins versants n'a pas servi à l'établissement des différentes méthodes. Il est représentatif de l'échantillon de référence (voir chapitre 2). Les pourcentages des bassins représentant les différents régimes hydrologiques, uniformes, pluviaux, nivaux et méditerranéens, étant légèrement différents, il conviendrait pour une comparaison plus rigoureuse d'attribuer des poids à ces bassins définis par le ratio entre pourcentage des bassins de l'échantillon de référence pour un régime donné et pourcentage des bassins de l'échantillon de validation pour ce même régime.

La comparaison entre le modèle mensuel et le modèle journalier est évaluée sur les bassins versants communs aux développements de chaque méthode. Les critères d'évaluation choisis sont les erreurs relatives calculées sur le QMNA(5) et sur le QA.

Tableau 6.4 : Résumé des différents tests de ce chapitre pour la simulation d'indices d'étiage en sites non jaugés.

Tests	Objectif	Echantillon de bassins versants	Critères d'évaluation
Test V	Modèles de régression	Référence (691 bassins)	Err(VCN3(5)) : erreurs relatives sur le VCN3(5).
Test M	Modèles pluie-débit	Référence (691 bassins)	Err(VCN3(5)), Err(QMNA(5)), Err(Q75) et Err(QA) : erreurs relatives calculées respectivement sur le VCN3(5), le QMNA(5), le Q75 et le QA ; C2M(QMM) : C2M calculé sur les 12 débits moyens mensuels ; C2M3(Q), C2M3(Q ^{0.5}) et C2M3(1/Q) : C2M calculé respectivement sur les débits, la racine-carré des débits et l'inverse du débit, chroniques simulées translatées de +/- 3 jours.
Test C	Comparaison des 2 approches	Référence (691 bassins)	Err(VCN3(5)) : erreurs relatives sur le VCN3(5).
Test C2	Comparaison des 2 approches et des modèles pluie-débit	Validation (141 bassins)	Err(VCN3(5)), Err(QMNA(5)), Err(Q75) et Err(QA) : erreurs relatives calculées respectivement sur le VCN3(5), le QMNA(5), le Q75 et le QA ; C2M(QMM) : C2M calculé sur les 12 débits moyens mensuels ; C2M3(Q), C2M3(Q ^{0.5}) et C2M3(1/Q) : C2M calculé respectivement sur les débits, la racine-carré des débits et l'inverse du débit, chroniques simulées translatées de +/- 3 jours.
Test T	Comparaison des pas de temps des modèles pluie-débit	Bassins communs aux 2 méthodes	Err(QMNA(5)) et Err(QA) : erreurs relatives calculées respectivement sur le QMNA(5) et le QA.

6.3 Résultats et discussions

Ce paragraphe présente les résultats obtenus pour la comparaison des deux approches, stochastiques et déterministes avec la détermination de leur configuration optimale. Ces approches sont ensuite comparées sur un échantillon de bassins versants de validation. Pour terminer, le pas de temps des modèles, mensuel et journalier, est comparé pour la simulation du QMNA(5) et du QA.

6.3.1 Analyse des méthodes de régressions pour l'estimation du VCN3(5) en sites non jaugés

Dans ce paragraphe, nous déterminons la meilleure méthode de régression linéaire multiple pour l'estimation du VCN3(5) sur l'échantillon de référence. Les modèles retenus selon le voisinage de la régression sont regroupés dans le Tableau 6.5.

Tableau 6.5 : Modèles de régression retenus pour l'estimation du VCN3(5) suivant le voisinage.

Vois.	Nombre bassins	Modèle	R ² -ajusté (cal.)	RMSE (val.)
Global	691	$\ln(\text{VCN3}(5)) = -3,145 - 0,118 \cdot DD_{moy} + 0,002 \cdot PA_{moy}$	0,27	2,06
HER 1	88	$\ln(\text{VCN3}(5)) = 1,661 + 2,607 \cdot \text{asr}(\%grass) - 2,076 \cdot VarT + 0,004 \cdot PA_{moy}$	0,65	1,89
HER 2	102	$\ln(\text{VCN3}(5)) = 3,907 - 0,772 \cdot VarT + 0,637 \cdot \ln(HAND_{min}) - 0,018 \cdot nP_0$	0,43	2,04
HER 3	73	$\ln(\text{VCN3}(5)) = -3,152 + 1,244 \cdot \text{asr}(\%grass) + 1,111 \cdot \text{asr}(\%imp) + 0,211 \cdot SL_{max} - 0,120 \cdot DD_{moy}$	0,24	0,85
HER 4	44	$\ln(\text{VCN3}(5)) = 29,264 - 4,293 \cdot VarT - 1,477 \cdot DR_{cv} - 0,139 \cdot DD_{moy}$	0,44	0,75
HER 5	60	$\ln(\text{VCN3}(5)) = -5,686 + 4,091 \cdot \text{asr}(\%forest) + 0,999 \cdot \ln(SL_{cv})$	0,37	0,95
HER 6	91	$\ln(\text{VCN3}(5)) = 10,954 + 8,051 \cdot TA_{cv} - 2,431 \cdot VarT$	0,48	1,80
HER 7	55	$\ln(\text{VCN3}(5)) = -4,790 + 1,176 \cdot \ln(Z_{q50}) - 0,937 \cdot \ln(AWC_{moy})$	0,34	1,78
HER 8	88	$\ln(\text{VCN3}(5)) = -25,460 - 4,271 \cdot \ln(AWC_{moy}) + 1,330 \cdot \ln(Z_{q50}) - 0,028 \cdot nP_0$	0,74	1,91
HER 9	61	$\ln(\text{VCN3}(5)) = -12,905 + 2,695 \cdot \text{asr}(\%forest) + 0,008 \cdot PA_{moy}$	0,30	2,38
HER 10	33	$\ln(\text{VCN3}(5)) = 3,678 - 1,547 \cdot \ln(AWC_{moy}) + 0,192 \cdot SL_{max} + 0,001 \cdot PA_{moy}$	0,73	0,62

Le modèle de régression globale fait appel à des descripteurs climatiques et des descripteurs morphologiques. La valeur du VCN3(5) augmente logiquement avec la pluie moyenne sur le bassin versant mais diminue lorsque la densité de drainage moyenne augmente. A l'échelle des HER, les modèles de régression font majoritairement appel aux variables climatiques, la pluie moyenne et la variabilité des températures mensuelles et à

l'occupation du sol, pourcentage de la surface couverte par des forêts ou pourcentage de la surface couverte par de la végétation basse. La densité de drainage ne semble plus jouer de rôle important compte tenue probablement de sa forte homogénéité au sein des HER. Les signes des coefficients de chaque descripteur semblent cohérents suivant les modèles de régression et suivant leur influence sur le phénomène d'étiage.

La Figure 6.1 illustre les résultats obtenus pour chacun des modèles de régression pour tout l'échantillon de référence. Logiquement, la prise en compte d'un voisinage régional plus homogène que le voisinage global améliore nettement l'estimation du VCN3(5) comme le montre les distributions V1 pour les résultats de la régression globale et V2 pour les résultats des régressions par HER. Ce résultat rejoint ceux de nombreux travaux de recherche. La prise en compte des résidus pour la régression globale, V3, améliore l'estimation du VCN3(5). Cette méthode permet de prendre en compte la corrélation spatiale du VCN3(5) et des descripteurs qui lui sont liés. La prise en compte des résidus des régressions par HER, V4, améliore peu les résultats. Quel que soit le modèle, V2, V3 ou V4, la médiane des erreurs relatives est très proche de 0 mais les distributions sont asymétriques, ce qui s'explique par le fait que le VCN3(5) a une limite inférieure (zéro). Ces trois méthodes tendent donc à surestimer les VCN3(5) de manière plus importante. Pour la suite, nous gardons le modèle V3 qui correspond à la régression globale avec interpolation spatiale des résidus.

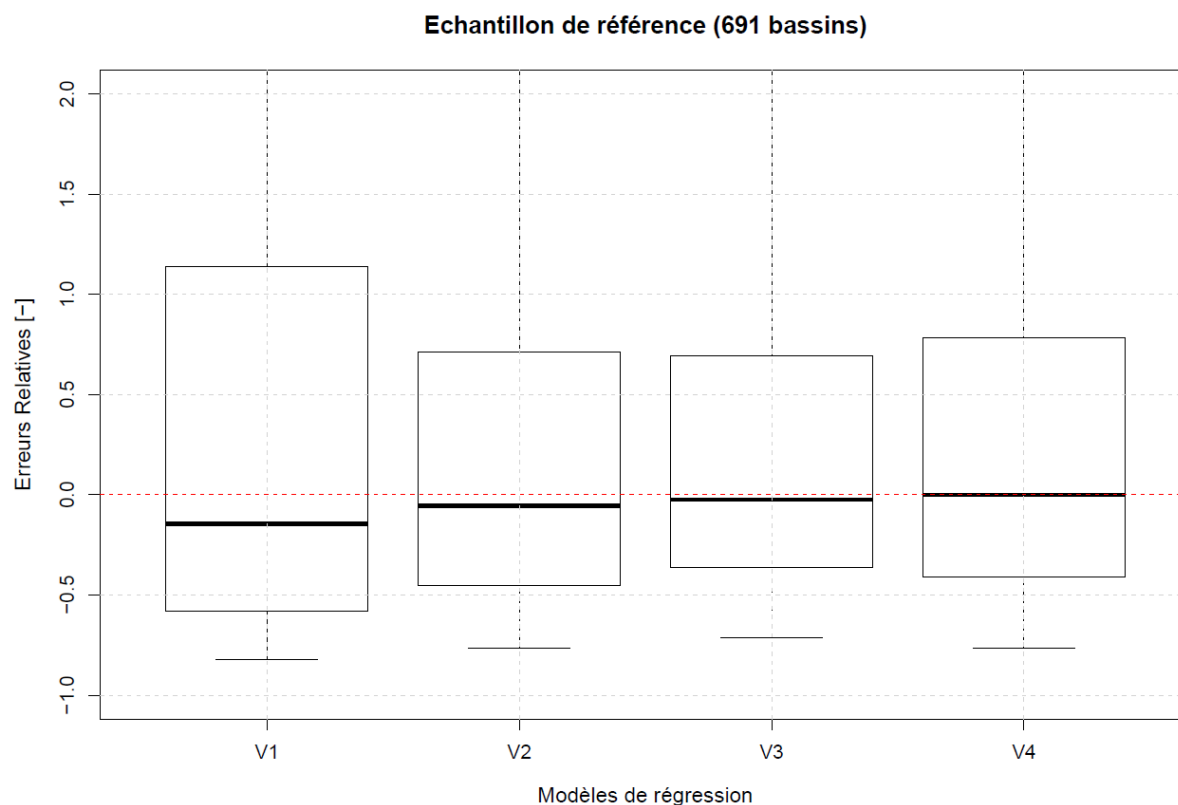


Figure 6.1 : Distribution des performances pour l'estimation du VCN3(5) pour les quatre modèles de régressions (V1 : régression globale, V2 : régressions par HER, V3 : régression globale avec interpolation spatiale des résidus et V4 : régressions par HER avec interpolation spatiale des résidus). Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut.

6.3.2 Comparaison des quatre modèles pluie-débit pour la simulation en sites non jaugés

La Figure 6.2 présente les résultats des estimations de différents indices et des simulations continues pour les 4 modèles pluie-débit. Les résultats des quatre modèles sont relativement proches et le nombre de paramètres libres du modèle ne semble pas avoir un grand impact sur les performances des modèles en contexte non jaugé. Pour l'estimation du VCN3(5), les médianes des distributions des erreurs relatives pour les modèles LoiEauJ sont proches de 0 alors que celles pour les modèles GR4J sont égales à -0,15. Ces deux modèles tendent à sous-estimer cet indice d'étiage. Les 4 modèles tendent à sous-estimer le QMNA(5). Les médianes des deux modèles GR4J sont cependant plus faibles que celles des deux modèles LoiEauJ, 0,25 pour les GR4J et 0,10 pour les modèles LoiEauJ. Les différences entre ces distributions diminuent pour l'estimation du Q75 et du QA. Les modèles LoiEauJ à 2 paramètres et GR4J à 4 paramètres sont très proches avec des médianes à 0 et des

distributions symétriques. Le modèle GR3J tend à surestimer le Q75. Pour la simulation de la saisonnalité, les médianes des distributions pour les C2M(Q_{MM}) pour les 4 modèles sont relativement proches. La dispersion de la distribution des résultats du modèle LoiEauJ est cependant plus importante que les autres modèles. Les distributions des simulations des faibles débits sont aussi très proches pour les 4 modèles. Cependant, cette partie de l'hydrogramme tend à être mieux simulée par les modèles LoiEauJ. Pour analyser ces résultats, nous avons tracé ces distributions pour chacun des 4 grands régimes hydrologiques en France (Figure 6.3 et Figure 6.4).

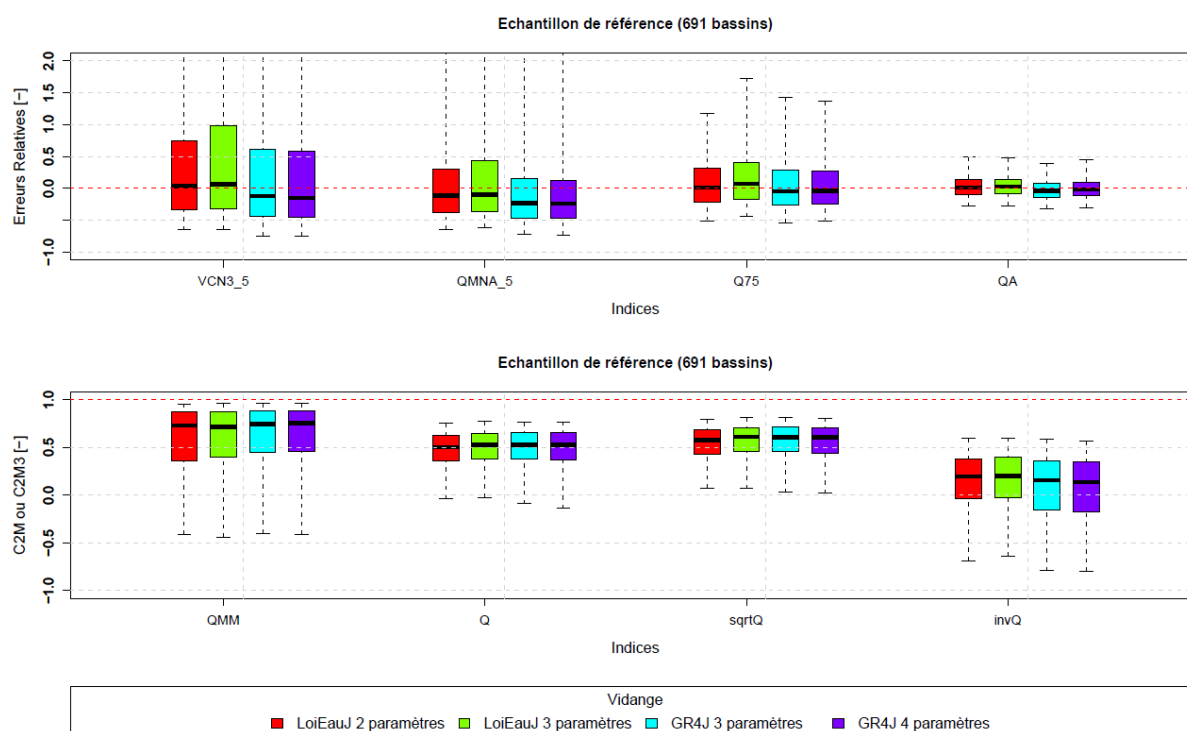


Figure 6.2 : Distributions des performances pour la simulation des débits caractéristiques (VCN3(5), QMNA(5), Q75, QA) et des simulations continues (Q_{MM} , Q, $Q^{0.5}$, $1/Q$) pour les modèles LoiEauJ à 2 et 3 paramètres et les modèles GR4J à 3 et 4 paramètres. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut.

La Figure 6.3 illustre les distributions des simulations des 3 indices d'étiage, VCN3(5), QMNA(5) et Q75 et du module interannuel, QA. Nous observons pour les bassins pluviaux, majoritaires dans l'échantillon de référence, les mêmes tendances que pour l'échantillon global. Les indices d'étiage simulés pour les bassins uniformes sont tous sous-estimés quel que soit le modèle pluie-débit choisi. Le modèle LoiEauJ à 2 paramètres semble néanmoins mieux simuler ces indices avec une médiane de la distribution des erreurs relatives nettement plus proche de 0 que celles des trois autres modèles. Cette difficulté à estimer les indices d'étiage des bassins uniformes en contexte non-jaugé provient principalement de la mauvaise

régionalisation des capacités maximales des réservoirs de transfert de chacun des modèles. Les distributions des erreurs relatives pour le QA sont relativement proches et centrées sur 0. Seul le modèle GR4J tend à surestimer les valeurs du QA des bassins uniformes.

Comme pour les bassins uniformes, les indices d'étiage des bassins nivaux tendent à être sous-estimés par les quatre modèles pluie-débit. Le modèle LoiEauJ à 2 paramètres tend à être meilleur que les 3 autres modèles. Le module interannuel de ces bassins tend aussi à être sous-estimé par les 2 modèles GR4J alors que la distribution des erreurs relatives est centrée pour les modèles LoiEauJ. Les capacités maximales des réservoirs de transfert, de chacun des 4 modèles, des bassins nivaux prennent la même plage de valeur que les bassins uniformes lorsque les paramètres sont calés. Leur régionalisation est aussi particulièrement compliquée ce qui expliquerait cette tendance à sous-estimer les différents indices d'étiage.

Les bassins méditerranéens possèdent des valeurs de VCN3(5) très faibles voir nulles. Ils sont surestimés par les modèles LoiEauJ (médiane des distributions à 0,25 pour LoiEauJ à 2 paramètres et à 0,45 pour LoiEauJ à 3 paramètres). La tendance est inverse pour les modèles GR4J dont la médiane des distributions est égale à -0,25. Les distributions sont cependant asymétriques indiquant que ces deux modèles surestiment les VCN3(5) de manière plus importante. Le QMNA(5) tend à être surestimé par le modèle LoiEauJ à 3 paramètres et sous-estimés par les modèles GR4J. La distribution du QMNA(5) pour le modèle LoiEauJ à 2 paramètres est centrée.

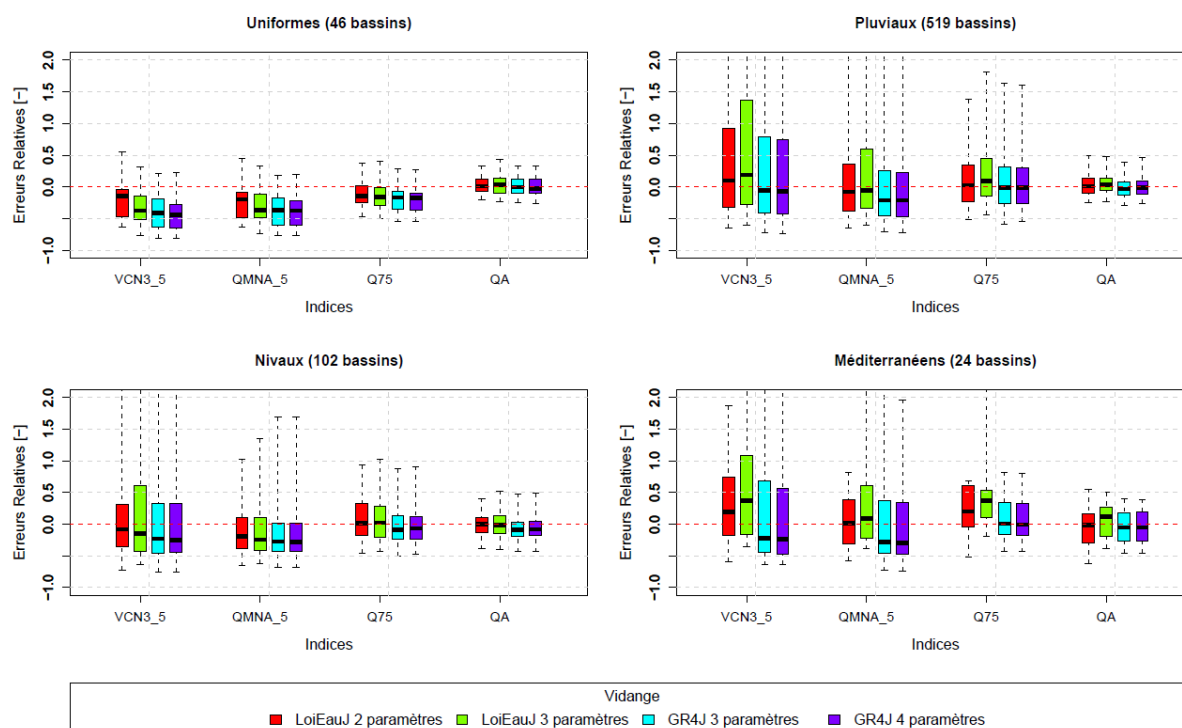


Figure 6.3 : Distributions des performances pour la simulation des indices d'étiage (VCN3(5), QMNA(5), Q75) et du module interannuel (QA) en contexte non jaugé pour les différents régimes hydrologiques (uniforme, pluvial, nival et méditerranéen) avec les quatre modèles. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut.

Lorsque nous nous intéressons aux simulations de la saisonnalité et aux simulations continues, les différences entre les structures sont moins marquées (Figure 6.4). Quel que soit le modèle pluie-débit, les bassins uniformes sont toujours les bassins les moins bien modélisés avec des médianes de C2M ou C2M₃ inférieures à 0,5. Les simulations continues sont néanmoins mieux modéliser par le modèle LoiEauJ.

Pour la suite, nous garderons uniquement le modèle LoiEauJ à 2 paramètres et le modèle GR4J. Les distributions des estimations des différents indices sont relativement proches entre ces deux modèles, cependant la structure de LoiEauJ semble plus flexible et permet de mieux estimer une grande variété de régimes hydrologiques.

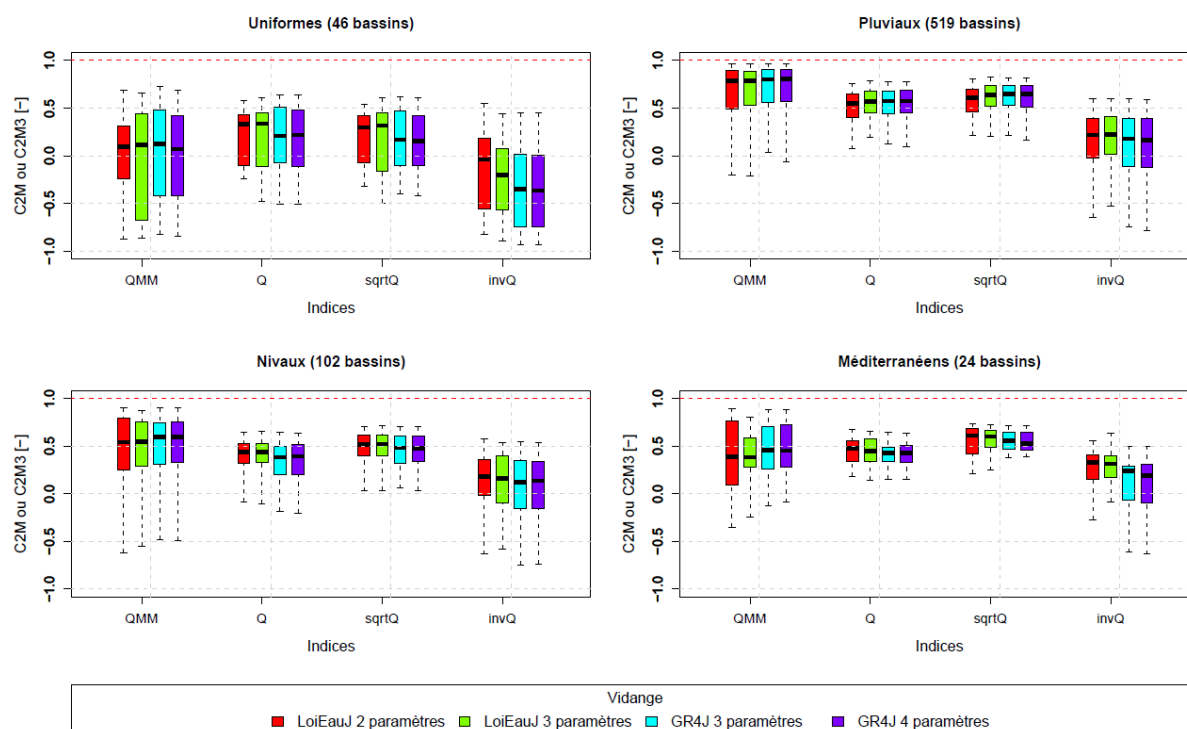


Figure 6.4 : Distributions des performances pour la simulation de la saisonnalité et des simulations continues en contexte non jaugé pour les différents régimes hydrologiques (uniforme, pluvial, nival et méditerranéen) avec les quatre modèles. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut.

6.3.3 Comparaison entre les deux approches pour la simulation du VCN3(5)

Nous comparons l'estimation du VCN3(5) en sites non jaugés par les 2 approches : la régionalisation du VCN3(5) par régression globale avec interpolation spatiale des résidus et l'estimation du VCN3(5) par LoiEauJ à 2 paramètres régionalisés et par GR4J régionalisé.

La Figure 6.5 illustre les résultats obtenus pour les deux approches pour la simulation du VCN3(5) sur l'échantillon global. Les distributions des erreurs relatives pour les deux approches sont relativement proches. Ces distributions pour les trois modèles sont asymétriques. Comme souligné précédemment, cela est lié au fait que les VCN3(5) ont une limite inférieure à 0mm/j.

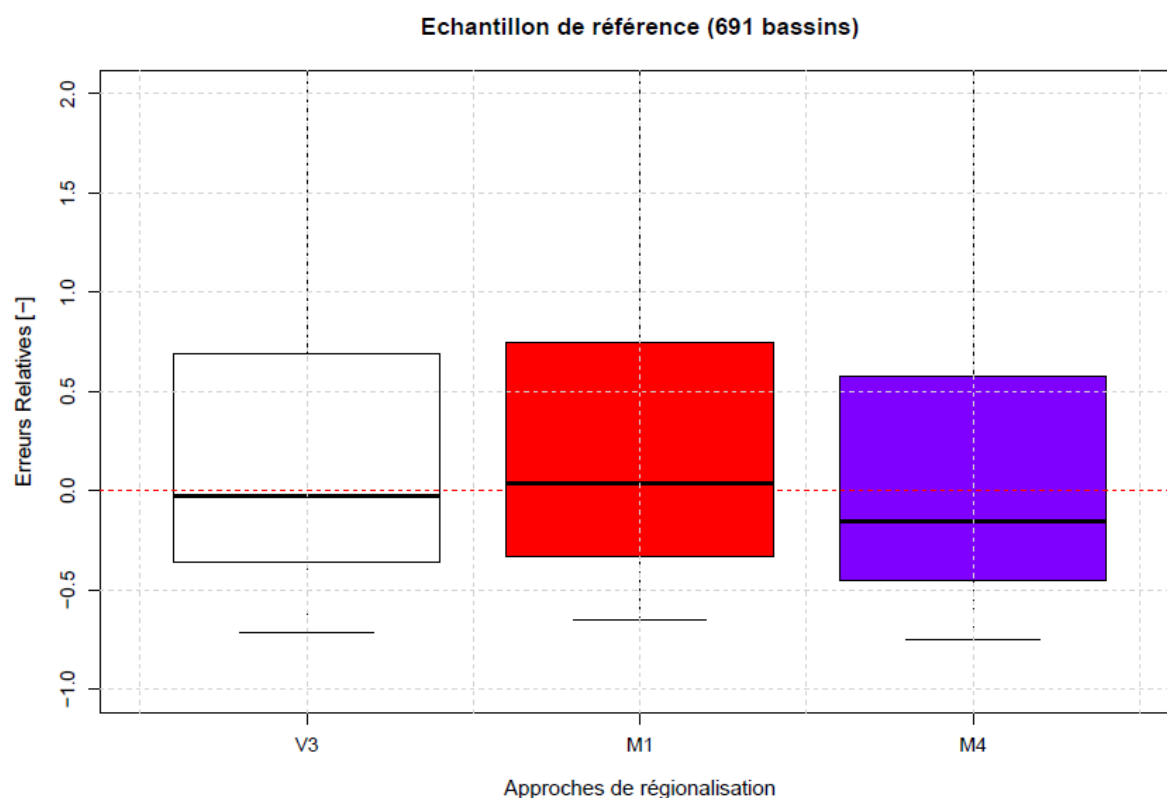


Figure 6.5 : Distributions des performances sur l'échantillon de référence pour la simulation du VCN3(5) en contexte non jaugé pour les deux approches (V3 : régression globale avec interpolation des résidus, M1 : LoiEauJ à 2 paramètres régionalisés, M4 : GR4J régionalisé). Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut.

La Figure 6.6 permet de comparer les VCN3(5) simulés par les trois modèles, V3, M1 et M4. Nous cherchons à évaluer si les erreurs des modèles sont mauvaises pour les mêmes bassins. Les valeurs des VCN3(5) tendent à être plus faibles avec le modèle M4 par rapport aux deux autres modèles. Il apparait que les modèles M1 et M4 tendent à plus sous-estimer

les VCN3(5) des bassins montagneux que le modèle V3. Le modèle M1 sous-estime quelques bassins alpins alors que le modèle M4 sous-estime des bassins alpins et pyrénéens. Ces différences au niveau des bassins montagneux entre l'approche stochastique et déterministe peuvent provenir de la sous-estimation des précipitations en milieux montagneux ainsi que de la régionalisation des paramètres des deux modules de neige. A l'inverse, les modèles M1 et M4 surestiment les valeurs des VCN3(5) des bassins de la région Adour-Garonne par rapport au modèle V3.

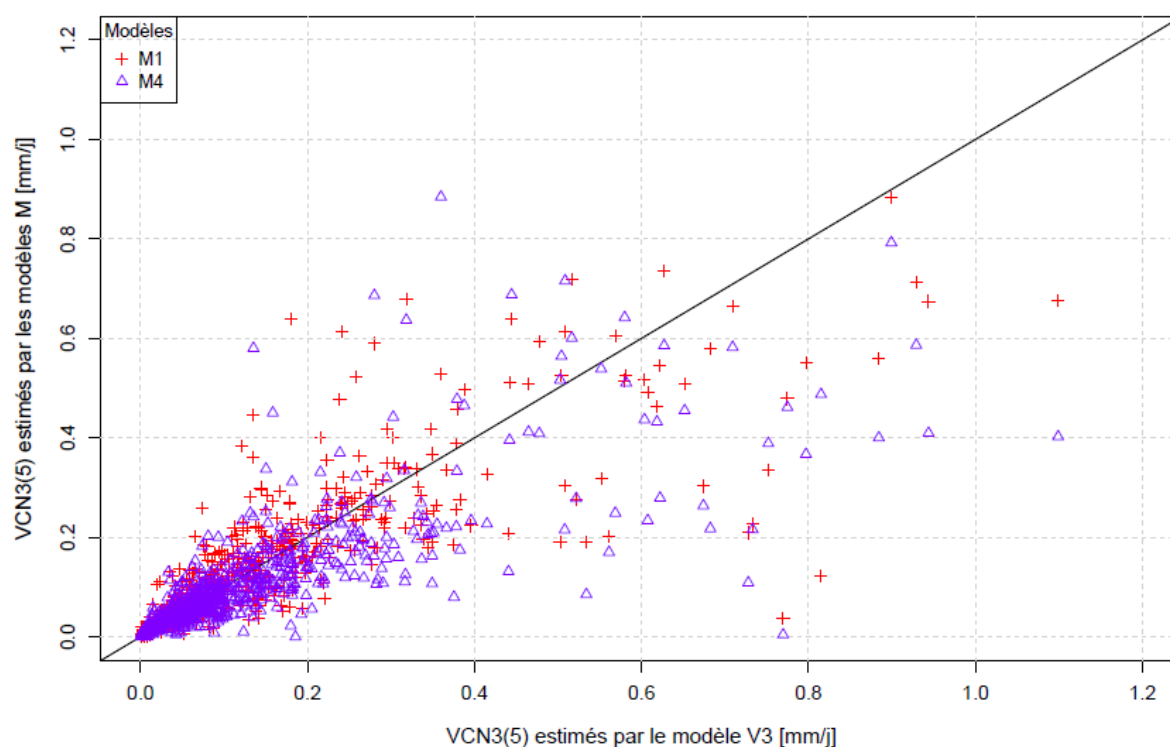


Figure 6.6 : Comparaison entre VCN3(5) simulés par le modèle V3 (approche stochastique par régression globale avec interpolation spatiale des résidus) et VCN3(5) simulés par les modèles M1 et M4 (M1 : approche déterministe par le modèle LoiEauJ à 2 paramètres régionalisés et M4 : approche déterministe par le modèle GR4J régionalisé). La droite pleine représente la bissectrice.

Nous comparons maintenant les distributions des erreurs relatives en séparant l'échantillon en 4 classes suivant la valeur du VCN3(5) pour mieux différencier les faibles et les fortes valeurs prises par cet indice. La Figure 6.7 illustre ces résultats. Le premier intervalle comprend des valeurs de VCN3(5) observées entre 0 et 0,05 mm/j. Ces valeurs très faibles entraînent des erreurs relatives très importantes, l'échelle de ce graphe est donc différente de tous les autres. Tous les modèles surestiment ces faibles valeurs de VCN3(5). Les médianes des distributions des trois modèles sont égales à 1 et les distributions sont très proches. Lorsque nous comparons les distributions des erreurs relatives pour le deuxième

intervalle de valeurs prises par le VCN3(5), nous observons que la majorité des VCN3(5) des bassins de cet intervalle est sous-estimée. Le modèle M4 sous-estime le plus les VCN3(5) avec une médiane égale à -0,21 contre -0,09 pour V3 et M1. Les distributions des erreurs liées à l'approche déterministe sont plus dispersées. Pour les deux dernières classes, nous observons la même tendance. Le modèle M4 sous-estime complètement ces valeurs alors que les distributions des modèles M1 et V3 sont très proches. Les VCN3(5) de la troisième classe sont un peu mieux simulés par le modèle M1 avec une médiane égale à 0 et une distribution symétrique. Ces valeurs sont cependant aussi sous-estimées pour la dernière classe. Ces observations sur les deux classes de valeurs les plus élevées correspondent aux distributions observées pour les régimes uniformes et niveaux dont les valeurs de VCN3(5) observées sont dans ces deux classes. Les modèles V3 et M1 semblent donc plus robustes selon les contextes climatiques pour la simulation du VCN3(5), même si globalement les performances entre M1 et M4 sont assez proches.

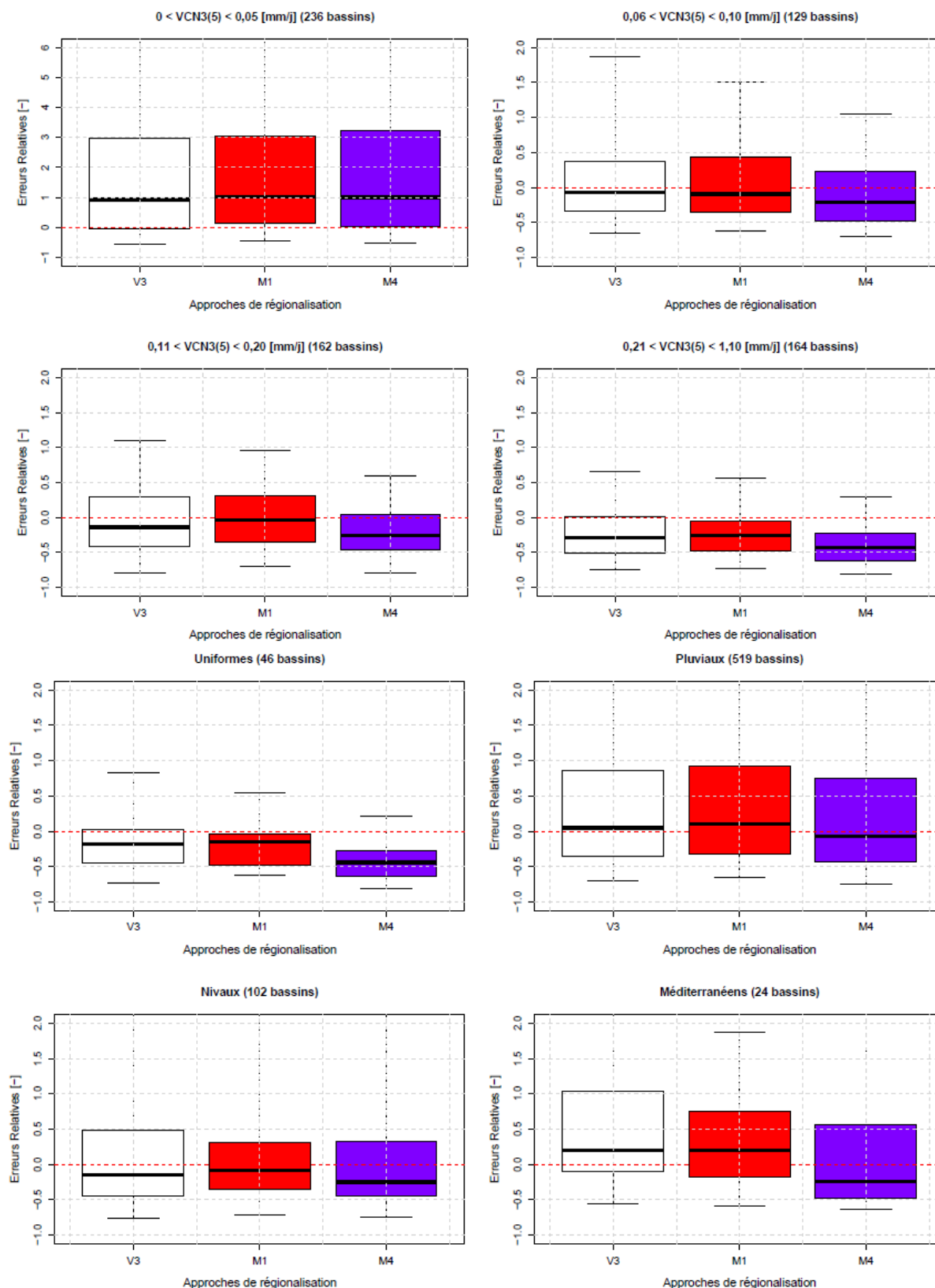


Figure 6.7 : Distributions des performances pour la simulation du VCN3(5) en fonction de quatre intervalles de valeurs en contexte non jaugé pour les deux approches et des régimes hydrologiques (V3 : régression globale avec interpolation des résidus, M1 : LoiEauJ à 2 paramètres régionalisés, M4 : GR4J régionalisé). Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut.

6.3.4 Comparaison sur l'échantillon de validation

Nous comparons maintenant les différents modèles sur un échantillon de 141 bassins de validation pour déterminer si les modèles sont indépendants de l'échantillon qui a servi à leur développement.

La Figure 6.8 illustre les résultats de l'estimation du VCN3(5) des bassins de validation par les 3 méthodes V3, M1 et M4. Les résultats entre les trois méthodes sont toujours relativement proches. Cela tend à montrer que ces trois méthodes sont robustes. Cependant, les distributions des erreurs pour les modèles V3 et M1 sont plus dispersées que celle pour le modèle M4. Cette différence pourrait venir des méthodes de régressions utilisées pour les modèles V3 et M1 alors que la proximité spatiale avait été privilégiée pour M4.

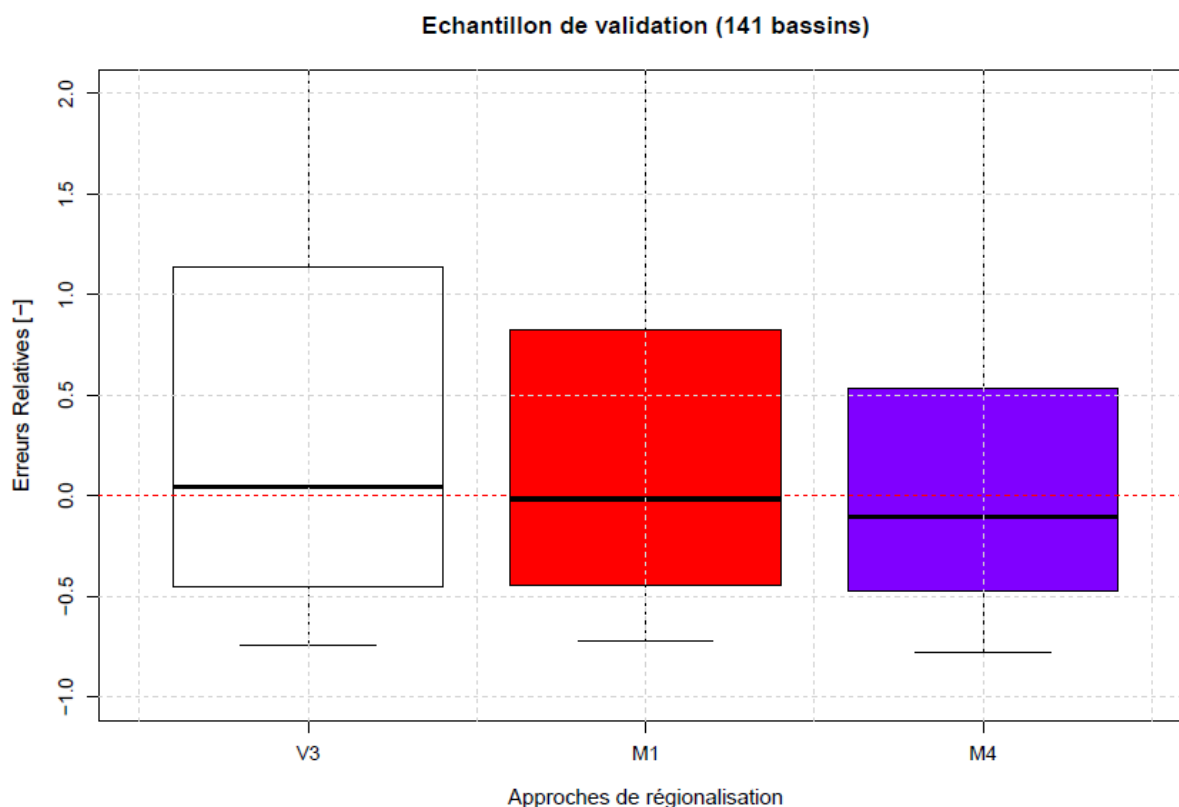


Figure 6.8 : Distributions des performances sur l'échantillon de validation pour la simulation du VCN3(5) en contexte non jaugé pour les deux approches (V3 : régression globale avec interpolation des résidus, M1 : LoiEauJ à 2 paramètres régionalisés, M4 : GR4J régionalisé). Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut.

La Figure 6.9 illustre la comparaison des quatre modèles pluie-débit sur l'estimation des différents indices et des simulations continues sur l'échantillon de validation. Les résultats

entre les méthodes restent relativement proches. Le modèle LoiEauJ à 3 paramètres semble donner de moins bons résultats pour l'estimation du VCN3(5). Le modèle à 2 paramètres semble donner de moins bons résultats pour la simulation de la saisonnalité. Cet échantillon ne contenant que 141 bassins versants, il est plus sensible à quelques bassins particuliers un peu moins bien modélisés. Les moins bons résultats du modèle LoiEauJ à 2 paramètres pour la simulation de la saisonnalité pourraient être dus à la méthode de régionalisation par régression.

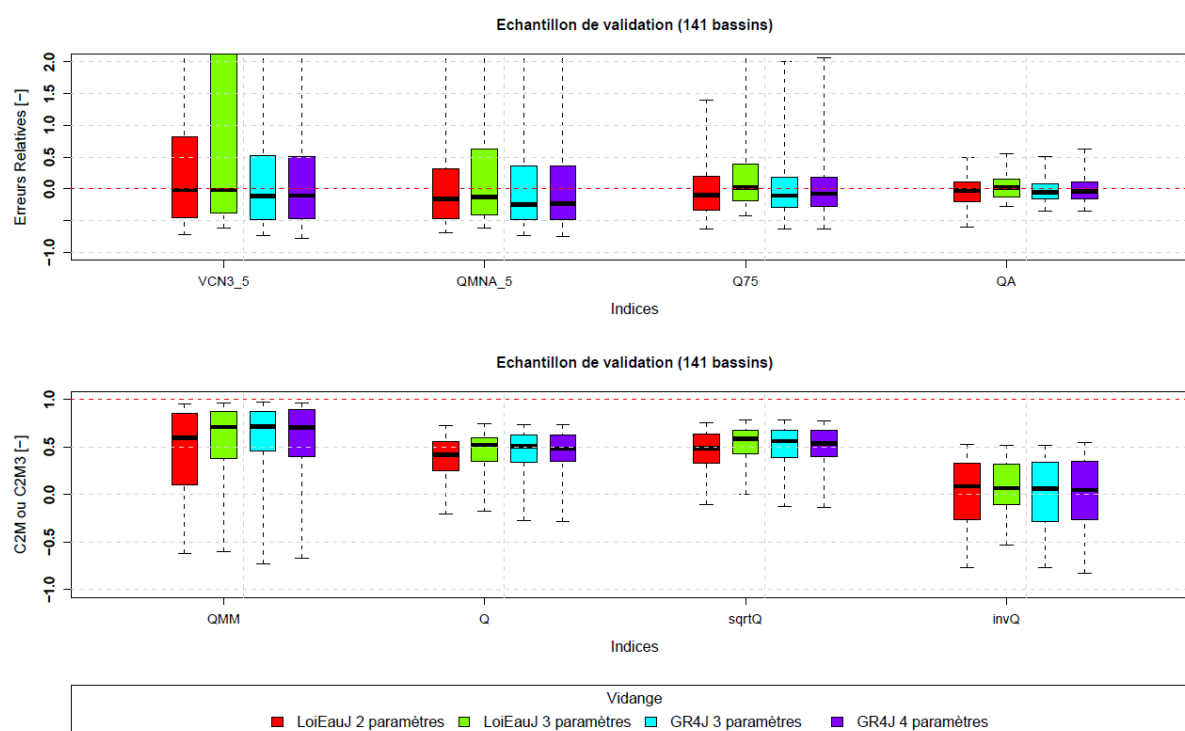


Figure 6.9 : Distributions des performances pour la simulation des débits caractéristiques (VCN3(5), QMNA(5), Q75, QA) et des simulations continues (Q_{MM} , Q , $Q^{0.5}$, $1/Q$) pour les modèles LoiEauJ à 2 et 3 paramètres et les modèles GR4J à 3 et 4 paramètres sur l'échantillon de validation. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut.

6.3.5 Comparaison entre le modèle journalier et le modèle mensuel

Nous comparons dans ce paragraphe le modèle mensuel LoiEauM et le modèle LoiEauJ pour la simulation du QMNA(5) et du QA en sites non jaugés. Préalablement à la comparaison, il a fallu déterminer l'échantillon de bassins versant de comparaison. En effet, le modèle mensuel LoiEauM régionalisé a été développé pour la cartographie de 2012 (Folton et Arnaud, 2012) sur un échantillon de 634 bassins versants. Sur 634 bassins, seulement 498 bassins étaient communs avec notre jeu de référence de 691 bassins. Une étape supplémentaire a été nécessaire pour affiner ce jeu. Les QMNA(5) et QA fournis pour la comparaison avec le mensuel ont été calculés sur la période de 1970 à 2010 et aucune règle de gestion de lacunes n'avait alors été définie contrairement à la méthodologie que nous avons développée dans le cadre des travaux de recherche de cette thèse. Les QMNA(5) et QA calculés sur les chroniques observées pour la cartographie ont été comparés à ceux calculés pour la thèse. Seuls ont été retenus les bassins versants pour lesquels l'erreur entre les valeurs de référence déterminées est inférieure à 5% en valeur absolue, amenant l'échantillon à 348 bassins versants.

Pour l'estimation du QMNA(5), nous observons que le modèle journalier tend à sous-estimer cet indice alors que le modèle mensuel tend à le surestimer. Les erreurs du modèle journalier sont plus petites que celles du mensuel. Comme les processus liant la pluie et l'évaporation potentielle au débit sont non linéaires, les débits moyens mensuels déduits des pluies efficaces moyennées sont différents des débits moyens mensuels déduits des débits journaliers. Le modèle mensuel est supposé corriger ce problème. Cependant, la pluie moyenne peut être la même mais correspondre à des distributions des pluies journalières différentes. Le modèle journalier peut prendre en compte la distribution des pluies journalières alors que le modèle mensuel n'en est pas capable. Ces écarts importants sur les erreurs relatives signifieraient qu'à l'échelle mensuelle, il faudrait prendre en compte les variabilités des pluies moyennes au cours du mois. Pour l'estimation du QA, nous observons que ces erreurs se compensent et les résultats des estimations par les deux modèles sont relativement proches. Dans tous les cas, il y a un biais dans les 2 modèles qui est moins marqué pour le modèle journalier.

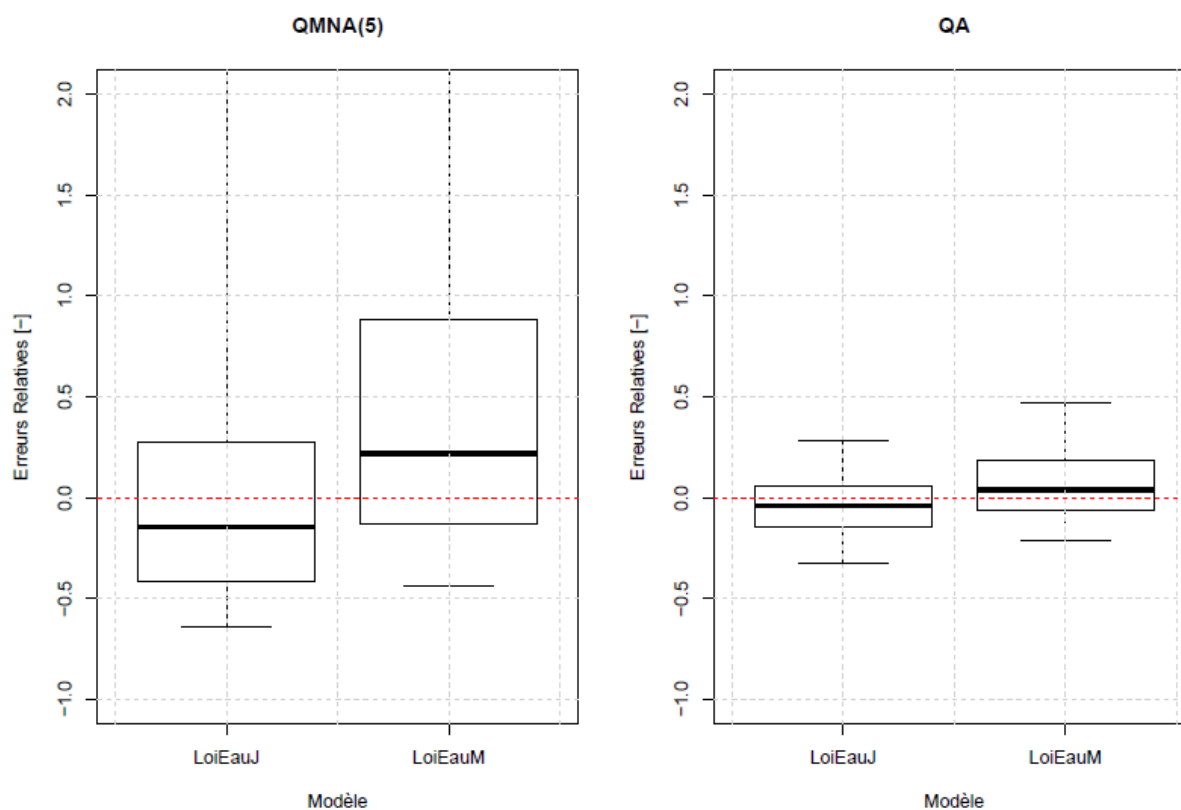


Figure 6.10 : Distributions des performances sur l'échantillon de 348 bassins versants pour la simulation du QMNA(5) et du QA en contexte non jaugé pour le modèle journalier LoiEauJ et le modèle mensuel LoiEauM. Les boîtes à moustache représentent les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 de la distribution, du bas vers le haut.

6.3.6 Cartographie finale des indices d'étiage

Une chaîne de modélisation adaptée à la simulation de différents indices d'étiage en contexte non jaugé a été définie aux chapitres 3 à 5 à travers le choix d'une fonction objectif, le choix d'une structure de modèle pluie-débit à seulement deux paramètres libres et le choix d'une méthode de régionalisation de ces paramètres. Le chapitre 6 a permis d'évaluer et de conclure sur les performances de cette modélisation par rapport au pas de temps et au nombre de paramètres libres du modèle pluie-débit et à l'approche pluie-débit par rapport à une approche stochastique. Le modèle LoiEauJ régionalisé à 2 paramètres permet donc de cartographier des indices d'étiage en tout point des cours d'eau qui sont calculés sur la période de temps souhaitée. La Figure 6.11 illustre ce résultat final à travers la cartographie des 6 indices d'étiage présentés dans ce manuscrit : le VCN3(5), le VCN10(5), le QMNA(5), le Q95, le Q75 et le QA. Ces indices ont été calculés à partir des simulations de débits sur la période complète du 01/01/1970 au 31/12/2013 pour les 691 bassins versants de l'échantillon de référence et les 141 bassins versants de l'échantillon de validation.

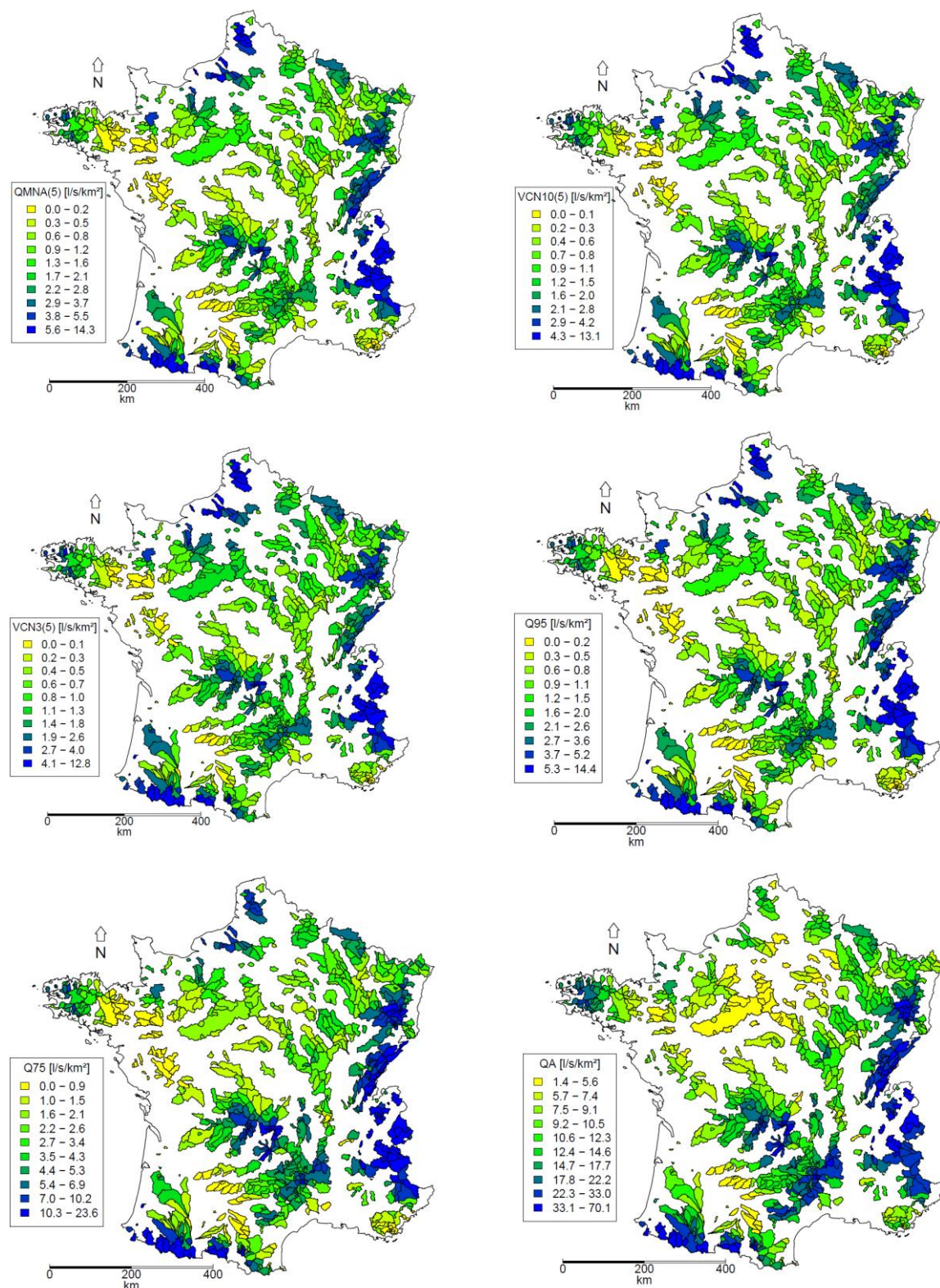


Figure 6.11 : Cartographies du QMNA(5), du VCN10(5), du VCN3(5), du Q95, du Q75 et du module interannuel (QA) estimé à l'aide du modèle LoiEauJ régionalisé sur la période du 01/01/1970 au 31/12/2013 sur l'échantillon qui regroupe les 691 bassins versants de référence et les 141 bassins versants de validation.

6.4 Synthèse du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons cherché à comparer deux approches pour la simulation du VCN3(5). Préalablement, nous avons déterminé la meilleure méthode de régionalisation par régression linéaire multiple pour l'approche stochastique. Il est apparu que la régression linéaire globale avec interpolation spatiale des résidus donnent de meilleurs résultats. Nous avons ensuite cherché à comparer les quatre structures de modèle pluie-débit sur l'estimation de différents indices et sur les simulations continues. Nous avons montré que ces modèles donnaient des résultats globalement très proches mais le modèle LoiEauJ semble plus flexible et permet de mieux estimer une grande variété de régimes hydrométéorologiques. La comparaison des deux approches, stochastique et déterministe, a montré que les deux approches ont donné des résultats très proches, ce qui rend difficile de conclure sur l'une des méthodes meilleures que l'autre. Ces méthodes ont ensuite été comparées sur un échantillon de validation qui a démontré la robustesse des méthodes, ce qui est très encourageant pour la perspective de leur généralisation. Cette comparaison mériterait d'être plus approfondie, à l'échelle des différents régimes hydrologiques et pour les différentes méthodes de régionalisation. Enfin, le modèle journalier, LoiEauJ, a été comparé au modèle mensuel, LoiEauM, dont il a été adapté, pour l'estimation du QMNA(5) et du QA. Nous avons montré que pour l'estimation du QA, le changement de pas de temps du modèle a peu d'impacts sur la qualité des estimations de cet indice. Pour le QMNA(5), le passage au pas de temps journalier a permis de diminuer les erreurs sur l'estimation de cet indice, même si le modèle reste biaisé.

Conclusion Générale

L'estimation d'indices d'étiage en sites non jaugés a fait l'objet de nombreuses contributions depuis plusieurs années, notamment grâce à la décennie PUB. Des outils et cartographies ont été développés en aide à l'opérationnel pour caractériser l'état de la ressource en eau en période d'étiage et définir différentes réglementations. Toutefois, la plupart des travaux de recherche se sont intéressés à l'estimation d'un seul indice.

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'utilisation d'un modèle pluie-débit régionalisé pour estimer, en tout point des cours d'eau, tous les indices d'étiage souhaités à des intervalles de temps journaliers ou supérieurs à l'aide d'un même modèle hydrologique. L'objectif de nos travaux était de développer un modèle simple et flexible pour être applicable à une large variété de bassins versants et pour être utilisé sous différentes conditions climatiques et environnementales. A travers une étude comparative, nous avons cherché à mettre en évidence les avantages et inconvénients de cette approche.

Résultats obtenus

Dans les deux premiers chapitres, nous avons exposé les différentes définitions de l'étiage et les processus hydrologiques liés à ce phénomène afin de déterminer les données nécessaires à notre travail de recherche. Un large échantillon de bassins versants a été constitué à l'échelle de la France. Malgré certaines zones spatiales non couvertes et des bassins versants majoritairement de petites et moyennes surfaces, notre échantillon de référence est assez représentatif de la grande diversité des régimes hydrométéorologiques qui existent à l'échelle du territoire français et de leur variabilité spatiale.

Préalablement au développement du modèle, il nous a semblé légitime de choisir une fonction objectif adaptée à notre objectif de simulation d'indices d'étiage. La littérature est riche sur la question du calage des modèles hydrologiques mais peu de travaux s'étaient concentrés sur le choix d'une fonction objectif adaptée à la simulation des indices d'étiage sans diminuer les qualités des simulations d'autres indices tels que le module ou la saisonnalité. Cette première analyse réalisée au chapitre 3 a permis de définir qu'une combinaison prise comme la moyenne entre une fonction objectif calculée sur les débits, qui donne un poids plus important aux forts débits, et une fonction objectif calculée sur l'inverse des débits, qui donne un poids plus important aux faibles débits, offre le meilleur compromis pour l'ensemble des critères d'évaluation souhaités. Les résultats semblent avoir une portée

assez générale puisque nous avons montré qu'ils étaient similaires pour plusieurs modèles hydrologiques testés.

Nous nous sommes ensuite interrogés sur le nombre de paramètres libres d'un modèle pluie-débit nécessaires pour une bonne simulation de différents indices d'étiage dans des contextes jaugés et non jaugés. L'hypothèse forte de départ de ces travaux de thèse a été de considérer qu'un modèle faiblement paramétré, avec seulement deux paramètres libres, diminuait les problèmes d'équifinalité et était donc plus facilement régionalisable. Nous sommes partis de la structure du modèle mensuel LoiEau pour l'adapter afin d'assurer des simulations journalières qui permettent d'estimer un certain nombre d'indices d'étiage. Ce modèle mensuel à deux paramètres régionalisés avait été développé pour la simulation en sites non jaugés de deux indices aux intervalles de temps mensuel et annuel, le QMNA(5) et le module interannuel. Utiliser cette structure comme point de départ à nos développements permettaient ainsi de bénéficier d'une expertise importante sur les forces et faiblesses de ce modèle, déjà utilisé dans des contextes opérationnels.

Le développement « pas à pas » du modèle journalier a été présenté dans le chapitre 4. Les performances de ce modèle à 2 paramètres, LoiEauJ, ont été comparées en sites jaugés à celles du modèle GR4J à quatre paramètres. Les résultats ont montré que ces deux modèles ont des performances équivalentes et que deux paramètres libres semblent donc suffisants pour la simulation de différents indices en sites jaugés.

Pour comparer ces performances en sites non jaugés, nous nous sommes ensuite intéressés à la régionalisation des paramètres du modèle LoiEauJ. Ce travail présenté au chapitre 5 s'est appuyé sur des méthodes de régionalisation déjà éprouvées et a permis de définir un cadre de comparaison et d'évaluation de ces méthodes. Nous avons souhaité comparer deux méthodes couramment analysées dans la littérature, l'interpolation spatiale et la régression linéaire multiple, sur deux versions du modèle LoiEauJ, une première version à deux paramètres et une seconde à trois paramètres afin de questionner l'hypothèse de départ stipulant qu'un modèle peu paramétré est plus facilement régionalisable qu'un modèle plus paramétré. Il est apparu que les deux méthodes de régionalisation donnent des résultats équivalents pour la régionalisation de la structure à deux paramètres. Pour la structure à trois paramètres, la méthode d'interpolation spatiale apporte de meilleures garanties que la méthode de régression. Il est en effet apparu que les paramètres de ce modèle se compensaient et que le critère calculé entre paramètre calé et paramètre régionalisé choisi pour évaluer les

méthodes de régionalisation paramètre par paramètre ne semble pas adapté. Pour toutes les méthodes, les indices estimés en contexte non jaugé sont beaucoup moins performants que ceux estimés en sites jaugés, ce qui montre une fois de plus que les simulations des bassins non jaugés sont encore extrêmement perfectibles, malgré la quantité de travaux effectués lors de la décennie PUB.

Dans le chapitre 6, nous avons mené une étude comparative de simulations de différents indices en sites non jaugés. Ceci a permis dans un premier temps d'évaluer l'impact du nombre de paramètres libres des modèles LoiEauJ et GR4J sur la simulation de ces indices en sites non jaugés. Ces deux modèles ont des performances équivalentes mais le modèle LoiEauJ semble plus flexible et permet de mieux estimer une grande variété de régimes hydrométéorologiques. Cette approche par modèle pluie-débit, pour LoiEauJ et GR4J, a ensuite été comparée à une méthode d'estimation dite stochastique d'un indice d'étiage classique (le VCN3(5)) par régression linéaire multiple en sites non jaugés. Pour cet indice, les deux approches ont donné des résultats équivalents ce qui ne permet pas de conclure sur l'une des méthodes meilleures qu'une autre. Afin de s'assurer de l'indépendance des résultats obtenus à l'échantillon de bassins versants utilisé pour les développements méthodologiques, ces deux approches ont ensuite été comparées sur un échantillon de bassins versants non utilisés pour le développement des différentes méthodes. Les résultats proches de ceux observés sur l'échantillon de référence ont permis de démontrer la robustesse des résultats obtenus, ce qui est encourageant pour leur généralisation. La comparaison entre le modèle journalier LoiEauJ et le modèle mensuel LoiEauM a été analysée sur un jeu commun de 348 bassins versants communs pour le développement des deux méthodes pour l'estimation du QMNA(5) et du QA. Le passage au pas de temps journalier améliore la simulation de l'indice à l'intervalle de temps mensuel, QMNA(5) en prenant en compte la variabilité journalière des débits. A l'intervalle de temps annuel, les erreurs liées au pas de temps se compensent et des résultats proches ont été observés. Le modèle LoiEauJ avec seulement deux paramètres libres régionalisés semble donc prometteur pour l'estimation des indices d'étiage en sites non jaugés.

Perspectives

Bien que de nombreux résultats pour la simulation des indices d'étiage en sites jaugés et non jaugés ont été obtenus dans ce manuscrit, certains points mériteraient plus d'approfondissement.

Tout d'abord, l'évaluation des différentes méthodes de régionalisation des paramètres du modèle pluie-débit s'est révélée peu adaptée aux problèmes d'équifinalité des paramètres, même pour des structures très peu paramétrées développées dans cette thèse. Bénéficiant du nombre réduit de paramètres de ce modèle, nous pourrions envisager de caler directement les paramètres des modèles linéaires reliant les paramètres du modèle hydrologique avec les descripteurs. Ce type d'approche a déjà été testé par le passé (Hundecha et Bardossy, 2004) et nous pensons que la structure à deux paramètres développée dans le cadre de cette thèse se prêterait particulièrement bien à ce calage adapté à la régionalisation. Le découpage en région homogène envisagé dans cette thèse a fourni des résultats prometteurs. Il conviendrait de poursuivre le travail en analysant les différentes méthodes de découpage en région homogène.

Nous avons essayé dans le cadre de cette thèse de s'assurer au maximum de la transposabilité temporelle des méthodes proposées, que ce soit le développement de la structure du modèle, de la méthode de calage ou de la régionalisation du modèle. Cette analyse pourrait être poursuivie en complétant l'analyse de la robustesse temporelle du modèle pour une utilisation future avec des projections de différents scénarios de changement climatique (Coron *et al.*, 2012), l'approche par modèle pluie-débit étant plus appropriée pour mener un travail sur l'impact du changement climatique sur les indices d'étiage. Une question centrale lorsque nous nous intéressons à l'estimation des débits d'étiage dans un contexte de changement climatique est la représentation des processus d'évapotranspiration au sein du modèle. Nous nous sommes principalement appuyés sur les représentations des fonctions de production des modèles existants mais il est clair qu'une réflexion sur la modélisation de l'évapotranspiration est nécessaire. Ceci inclut également une réflexion sur la formule d'ETP utilisée ainsi que sur la méthode d'estimation de l'accumulation et de la fonte du manteau neigeux sur les bassins de montagne.

La diversité hydroclimatique de l'échantillon utilisé dans cette thèse a été une garantie de la robustesse observée du modèle sur l'échantillon de validation. Cette diversité se trouve également dans les comportements des bassins versants vis-à-vis des caractéristiques d'étiage,

avec des bassins pour lesquels l'étiage est particulièrement soutenu (bassins dits uniformes) ou les bassins de montagne. Nous pouvons nous interroger dans ce contexte sur le bien-fondé d'une structure unique pour tous ces bassins aux comportements très diversifiés. Même si d'un point de vue opérationnel (en particulier dans le contexte de bassins non jaugés), une structure unique pour tous types de bassins est particulièrement intéressante, les simplifications importantes du modèle sur les écoulements souterrains en particulier posent question et expliquent probablement les performances relativement faibles du modèle dans ce type de bassins. La faiblesse du modèle pour ce type de bassins est accentuée en contexte non jaugé par les difficultés de déterminer des variables descriptives quantitatives qui appréhendent les caractéristiques des écoulements souterrains. A l'échelle de la France, des descriptions relativement fines existent et sont regroupées dans la BDLISA développée par le BRGM et il paraît important de tirer pleinement profit de la richesse de cette base de données pour des travaux de régionalisation future, en particulier pour la représentation des indices d'étiage.

Enfin, dans ce travail, nous avons uniquement évalué les erreurs entre indices calculés sur les débits observés et indices calculés sur les débits simulés. Pour fournir un outil complet aux opérationnels, il conviendrait d'inclure une évaluation des incertitudes de ces estimations. Ce travail permettrait d'évaluer les incertitudes liées au modèle, à son calage ainsi qu'à sa régionalisation (Bourgin, 2014). Outre la connaissance et la quantification des incertitudes liées à l'estimation de chaque indice d'étiage, ce travail permettrait de mieux comprendre les faiblesses du modèle et des différentes méthodes et pourrait apporter de nouvelles pistes d'amélioration.

Références bibliographiques

- Abderemane, M., 2014. *Amélioration de la régionalisation d'un modèle hydrologique de cartographie de la ressource en eau*. Thesis (Master). Université de Nantes.
- Andréassian, V., Hall, A., Chahinian, N. et Schaake, J., Introduction and Synthesis: Why should hydrologists work on a large number of basin data sets? ed. *IAHS-AISH Publication*, 2006, 1-5.
- Armbruster, J. T. 1976. Infiltration Index Useful in Estimating Low-Flow Characteristics of Drainage Basins. *Journal of Research of the Us Geological Survey*, 4(5), 533-538.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. et Williams, J. R. 1998. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- Aschwanden, H. et Kan, C., 1999. *Le débit d'étiage Q347 – Etat de la question*. Service hydrologique et géologique national. Communication hydrologique No. 27.
- Atkinson, S. E., Woods, R. A. et Sivapalan, M. 2002. Climate and landscape controls on water balance model complexity over changing timescales. *Water Resources Research*, 38(12), 501-5017.
- Aubert, Y., 2012. *Estimation des valeurs extrêmes de débit par la méthode Shyreg. Réflexions sur l'équifinalité dans la modélisation de la transformation pluie en débit*. Thesis (PhD). Irstea (Aix-en-Provence), UPMC (Paris).
- Aucott, W. R., Meadows, R. S. et 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.

- Bandaragoda, C., Tarboton, D. G. et Woods, R. 2004. Application of TOPNET in the distributed model intercomparison project. *Journal of Hydrology*, 298(1-4), 178-201.
- Bárdossy, A. 2007. Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(2), 703-710.
- Bergström, S., 1976. *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments*. RH07, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, Sweden.
- Beven, K. 2006. A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 18-36.
- Beven, K. J. et Kirkby, M. J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69.
- Bingham, R. H., 1986. *Regionalization of winter low-flow characteristics of Tennessee streams*. USGS Water-Resources Investigations, Report 86-4007.
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A. et Savenije, H., 2013. *Runoff prediction in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales*.
- Boldetti, G., Riffard, M., Andréassian, V. et Oudin, L. 2010. Data-set cleansing practices and hydrological regionalization: is there any valuable information among outliers? *Hydrological Sciences Journal*, 55(6), 941-951.
- Booij, M. J. et Krol, M. S. 2010. Balance between calibration objectives in a conceptual hydrological model. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 55(6), 1017-1032.
- Bourgin, F., 2014. *Comment quantifier l'incertitude prédictive en modélisation hydrologique ? Travail exploratoire sur un grand échantillon de bassins versants*. Thesis (PhD). Irstea (Anthony), AgroParisTech (Paris).
- Brigode, P., Andréassian, V., Bourgin, F. et Lobligois, F., 2014. *Reconstitution ponctuelle de chroniques hydrologiques incomplètes ou manquantes par modèle pluie-débit*. Rapport Irstea - Onema.
- Budyko, M. I., 1974. *Climate and life*.
- Burn, D. H. 1990. An Appraisal of the Region of Influence Approach to Flood Frequency-Analysis. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 35(2), 149-165.
- Burn, D. H. et Boorman, D. B. 1993. Estimation of Hydrological Parameters at Ungauged Catchments. *Journal of Hydrology*, 143(3-4), 429-454.
- Catalogne, C., 2012. *Amélioration des méthodes de prédétermination des débits de référence d'étiage en sites peu ou pas jaugés*. Thesis (PhD). Irstea (Lyon), Université Joseph Fourier (Grenoble).

- Catalogne, C. et Sauquet, E., 2012. *Cartographie des débits de référence - Interpolation des caractéristiques d'étiage*. Rapport Irstea - Onema.
- Chalise, S. R., Kansakar, S. R., Rees, G., Croker, K. et Zaidman, M. 2003. Management of water resources and low flow estimation for the Himalayan basins of Nepal. *Journal of Hydrology*, 282(1-4), 25-35.
- Chiew, F. H. S. et McMahon, T. A. 1993. Assessing the Adequacy of Catchment Streamflow Yield Estimates. *Australian Journal of Soil Research*, 31(5), 665-680.
- Chopart, S. et Sauquet, E. 2008. Using spot gauging data to interpolate low flow characteristics. *Revue des Sciences de l'Eau*, 21(3), 267-281.
- Cipriani, T. et Sauquet, E., 2012. *Cartographie des débits de référence - Interpolation du module*. Rapport Irstea - Onema.
- Clausen, B. et Rasmussen, K. R. 1993. Low-Flow Estimation and Hydrogeology in a Chalk Catchment. *Nordic Hydrology*, 24(5), 297-308.
- Clausen, B., Young, A. R. et Gustard, A., 1994. Modelling the impact of groundwater abstraction on low river flows. *FRIEND: Flow Regimes from International Experimental and Network Data*. Wallingford: IAHS Publication ed., 77-86.
- Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M. et Hendrickx, F. 2012. Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. *Water Resources Research*, 48(5), W05552.
- Cressie, N., Frey, J., Harch, B. et Smith, M. 2006. Spatial prediction on a river network. *Journal of Agricultural Biological and Environmental Statistics*, 11(2), 127-150.
- Crochemore, L., Perrin, C., Andréassian, V., Ehret, U., Seibert, S. P., Grimaldi, S., Gupta, H. et Paturel, J. E. 2015. Comparing expert judgement and numerical criteria for hydrograph evaluation. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 60(3), 402-423.
- Dacharry, M., 1996. *Dictionnaire français d'hydrologie*.
- Dai, A. 2012. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 3(1), 52-58.
- Deckers, D. L. E. H., Booij, M. J., Rientjes, T. M. et Krol, M. S. 2010. Catchment Variability and Parameter Estimation in Multi-Objective Regionalisation of a Rainfall-Runoff Model. *Water Resources Management*, 24(14), 3961-3985.
- Demuth, S. et Young, A. R., 2004. Regionalisation procedures. In: ELSEVIER, A. ed. *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. 139-198.
- Despriée, J., Voinchet, P., Tissoux, H., Bahain, J.-J., Falguères, C., Courcimault, G., Dépont, J., Moncel, M.-H., Robin, S., Arzarello, M., Sala, R., Marquer, L., Messenger, E., Puaud, S. et Abdessadok, S. 2011. Lower and Middle Pleistocene human settlements

- recorded in fluvial deposits of the middle Loire River Basin, Centre Region, France. *Quaternary Science Reviews*, 30(11-12), 1474-1485.
- Droque, G., Pfister, L., Leviandier, T., El Idrissi, A., Iffly, J. F., Matgen, P., Humbert, J. et Hoffmann, L. 2004. Simulating the spatio-temporal variability of streamflow response to climate change scenarios in a mesoscale basin. *Journal of Hydrology*, 293(1-4), 255-269.
- Edijatno, Nascimento, N. D., Yang, X. L., Makhoul, Z. et Michel, C. 1999. GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 44(2), 263-277.
- Eheart, J. W. et Tornil, D. W. 1999. Low-flow frequency exacerbation by irrigation withdrawals in the agricultural midwest under various climate change scenarios. *Water Resources Research*, 35(7), 2237-2246.
- Engeland, K. et Hisdal, H. 2009. A Comparison of Low Flow Estimates in Ungauged Catchments Using Regional Regression and the HBV-Model. *Water Resources Management*, 23(12), 2567-2586.
- Etchevers, P., 2000. *Modélisation du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale. Impact de la modélisation de la neige sur l'hydrologie du Rhône*. Thesis (PhD). Université Paul Sabatier (Toulouse).
- Fenicia, F., McDonnell, J. J. et Savenije, H. H. G. 2008. Learning from model improvement: On the contribution of complementary data to process understanding. *Water Resources Research*, 44(6), W06419.
- Fenicia, F., Solomatine, D. P., Savenije, H. H. G. et Matgen, P. 2007. Soft combination of local models in a multi-objective framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(6), 1797-1809.
- Fernandez, W., Vogel, R. M. et Sankarasubramanian, A. 2000. Regional calibration of a watershed model. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 45(5), 689-707.
- Fleig, A. K., Tallaksen, L. M., Hisdal, H. et Demuth, S. 2006. A global evaluation of streamflow drought characteristics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(4), 535-552.
- Folton, N., 2008. *Calage et adaptation du modèle LOIEAU aux bassins de Seine Normandie*. Cemagref.
- Folton, N., 2009a. *Analyse de la sensibilité du modèle GRLOIEAU aux données SAFRAN*. Cemagref.
- Folton, N., 2009b. *Cartographie des débits de référence d'étiage sur le bassin de Seine Normandie – Régionalisation de la méthode LOIEAU*. Cemagref.
- Folton, N., 2010. *Portage national du modèle hydrologique de la méthode LOIEAU - Rapport méthodologique*. Cemagref.

- Folton, N. et Arnaud, P., 2012. *Cartographie des débits de référence d'étiage sur le territoire national – La méthode LOIEAU*. Rapport Irstea - Onema.
- Folton, N. et Lavabre, J., 2000. *Estimation régionale de la ressource en eau. Développement de la deuxième version de LOIEAU. Cartographie régionale des évapotranspirations potentielles*. Cemagref.
- Folton, N. et Lavabre, J., 2001a. *Estimation des débits de référence d'étiage. 1ère partie : Cartographie régionale de l'évapotranspiration potentielle*. Cemagref.
- Folton, N. et Lavabre, J., 2001b. *Estimation des débits de référence d'étiage. 2ème partie : Calcul des pluies de bassin*. Cemagref.
- Folton, N. et Lavabre, J., 2001c. *Estimation des débits de référence d'étiage. 3ème partie : Modélisation des écoulements mensuels*. Cemagref.
- Folton, N. et Lavabre, J., 2001d. *Estimation des débits de référence d'étiage. Département de l'Aveyron*. Cemagref.
- Folton, N. et Lavabre, J., 2002. *Estimation des débits de référence d'étiage. 4ème partie : Régionalisation du modèle des écoulements mensuels*. Cemagref.
- Folton, N. et Lavabre, J., 2003a. *Estimation des débits de référence d'étiage. Région Limousin*. Cemagref.
- Folton, N. et Lavabre, J., 2003b. *Estimations des débits de référence d'étiage. Département du Gard. Cartographie régionale et pixélisation des débits de référence d'étiage*. Cemagref.
- Folton, N. et Lavabre, J., 2003c. *Estimations des débits de référence d'étiage. Région Corse. Complément à la régionalisation du modèle des écoulements mensuels*. Cemagref.
- Folton, N. et Lavabre, J., 2003d. *Estimations des débits de référence d'étiage. Régions Auvergne, L.R., PACA, R.A., Corse et dept Aveyron. 4ème partie : Complément à la régionalisation du modèle des écoulements mensuels et incertitudes de la méthode*. Cemagref.
- Folton, N. et Lavabre, J., 2004a. *Estimation des débits de référence d'étiage. Cartographie régionale et pixellisation des débits de référence d'étiage de la région AUVERGNE*. Cemagref.
- Folton, N. et Lavabre, J., 2004b. *Estimation des débits de référence d'étiage. Nouvelle estimation de l'ETP. Nouvelle optimisation des paramètres du modèle pluie-débit. Nouvelle approche régionale de la modélisation de la pluie en débit aux régions Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Corse, Auvergne, Limousin, Rhône-Alpes*. Cemagref.
- Folton, N. et Lavabre, J., 2005. *Application de LOIEAU aux bassins versants de la région Adour Garonne. Détermination des débits caractéristiques des cours d'eau*. Cemagref.

- Folton, N. et Lavabre, J. 2006. Regionalization of a monthly rainfall-runoff model for the southern half of France based on a sample of 880 gauged catchments. *IAHS-AISH Publication*, (307), 264-277.
- Fourmigué, P. et Lavabre, J. 2005. Flood forecasting with the GR3H conceptual rainfall-runoff model. Adaptability to rainfall uncertainties. *Revue des Sciences de l'Eau*, 18(1), 87-102.
- Garçon, R. 1999. Lumped rainfall-runoff model for flood forecasting and design flood estimation. *Houille Blanche*, 54(7-8), 88-95.
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H. et Arnold, J. G. 2007. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211-1250.
- Gerasimenko, 1972. *Effects of lakes on minimum streamflow in West Siberia*. Trudy GGI (Trans. State Hydrol. Inst., Leningrad, USSR).
- Ghosh, B. 1951. Random distances within a rectangle and between two rectangles. *Bulletin of Calcutta Mathematical Society*, 43(1), 17-24.
- Gille, E. et Lang, C. 2003. Problématique d'une optimisation des paramètres de calage d'un bilan hydrologique : Application aux bassins versants de le Sauer. *Mosella*, 28(12), 157-172.
- Giuntoli, I. et Renard, B., 2010. *Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages*. Rapport Irstea - Onema.
- Giuntoli, I., Renard, B., Vidal, J. P. et Bard, A. 2013. Low flows in France and their relationship to large-scale climate indices. *Journal of Hydrology*, 482, 105-118.
- Gottschalk, L. 1993. Correlation and Covariance of Runoff. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 7(2), 85-101.
- Gottschalk, L., Krasovskaia, I., Leblois, E. et Sauquet, E. 2006. Mapping mean and variance of runoff in a river basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(4), 469-484.
- Gottschalk, L., Leblois, E. et Skøien, J. O. 2011. Distance measures for hydrological data having a support. *Journal of Hydrology*, 402(3-4), 415-421.
- Gottschalk, L., Tallaksen, L. M. et Perzyna, G. 1997. Derivation of low flow distribution functions using recession curves. *Journal of Hydrology*, 194(1-4), 239-262.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. et Martinez, G. F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80-91.
- Gustard, A. 1983. Regional Variability of Soil Characteristics for Flood and Low Flow Estimation. *Agricultural Water Management*, 6(2-3), 255-268.

- Gustard, A. 1989. Compensation flows in the UK: A hydrological review. *Regulated Rivers: Research & Management*, 3(1), 49-59.
- Gustard, A., Bullock, A. et Dixon, J. M. 1992. Low flow estimation in the United Kingdom. *Report - UK Institute of Hydrology*, 108.
- Gustard, A., Young, A. R., Rees, G. et Holmes, M. G. R., 2004. Operational hydrology. In: ELSEVIER, A. ed. *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. 139-198.
- Hardisson, C. H., 1971. *Prediction error of regression estimates of streamflow characteristics at ungauged sites*. USGS.
- Hisdal, H., Stahl, K., Tallaksen, L. M. et Demuth, S. 2001. Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *International Journal of Climatology*, 21(3), 317-333.
- Hisdal, H. et Tallaksen, L. M., 2004. Hydrological drought characteristics. In: ELSEVIER, A. ed. *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. 139-198.
- Holmes, M. G. R., Young, A. R., Gustard, A. et Grew, R. 2002. A region of influence approach to predicting flow duration curves within ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(4), 721-731.
- Houghton-Carr, H. A. 1999. Assessment criteria for simple conceptual daily rainfall-runoff models. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 44(2), 237-261.
- Hrachowitz, M., Savenije, H. H. G., Blöschl, G., McDonnell, J. J., Sivapalan, M., Pomeroy, J. W., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M. P., Ehret, U., Fenicia, F., Freer, J. E., Gelfan, A., Gupta, H. V., Hughes, D. A., Hut, R. W., Montanari, A., Pande, S., Tetzlaff, D., Troch, P. A., Uhlenbrook, S., Wagener, T., Winsemius, H. C., Woods, R. A., Zehe, E. et Cudennec, C. 2013. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) a review. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 58(6), 1198-1255.
- Hughes, D. A. et Smakhtin, V. 1996. Daily flow time series patching or extension: A spatial interpolation approach based on flow duration curves. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 41(6), 851-871.
- Hundecha, Y. et Bardossy, A. 2004. Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology*, 292(1-4), 281-295.
- Hydrology, I. O., 1980. *Low Flow Studies Report*. Wallingford, UK.
- Jakeman, A. J., Littlewood, I. G. et Whitehead, P. G. 1990. Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. *Journal of Hydrology*, 117(1-4), 275-300.

- Kay, A. L., Jones, D. A., Crooks, S. M., Calver, A. et Reynard, N. S. 2006. A comparison of three approaches to spatial generalization of rainfall-runoff models. *Hydrological Processes*, 20(18), 3953-3973.
- Keyantash, J. et Dracup, J. A. 2002. The quantification of drought: An evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1167-1180.
- Keyantash, J. A. et Dracup, J. A. 2004. An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resources Research*, 40(9), W0930401-W0930413.
- Khu, S. T. et Madsen, H. 2005. Multiobjective calibration with Pareto preference ordering: An application to rainfall-runoff model calibration. *Water Resources Research*, 41(3).
- Kim, U. et Kaluarachchi, J. J. 2008. Application of parameter estimation and regionalization methodologies to ungauged basins of the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 362(1-2), 39-56.
- Klemeš, V. 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 13-24.
- Kokkonen, T. S., Jakeman, A. J., Young, P. C. et Koivusalo, H. J. 2003. Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina. *Hydrological Processes*, 17(11), 2219-2238.
- Krause, P., Boyle, D. P. et Bäse, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97.
- Kroll, C., Luz, J., Allen, B. et Vogel, R. M. 2004. Developing a watershed characteristics database to improve low streamflow prediction. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(2), 116-125.
- Laaha, G. 2000. Zur Beurteilung der Genauigkeit von Niederwasserkennwerten. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, 80, 61-68.
- Laaha, G. et Blöschl, G. 2005. Low flow estimates from short stream flow records - a comparison of methods. *Journal of Hydrology*, 306(1-4), 264-286.
- Laaha, G. et Blöschl, G. 2006a. A comparison of low flow regionalisation methods - catchment grouping. *Journal of Hydrology*, 323(1-4), 193-214.
- Laaha, G. et Blöschl, G. 2006b. Seasonality indices for regionalizing low flows. *Hydrological Processes*, 20(18), 3851-3878.
- Laaha, G. et Blöschl, G. 2007. A national low flow estimation procedure for Austria. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 52(4), 625-644.
- Laaha, G., Skøien, J. O. et Blöschl, G. 2014. Spatial prediction on river networks: comparison of top-kriging with regional regression. *Hydrological Processes*, 28(2), 315-324.

- Laaha, G., Skøien, J. O., Nobilis, F. et Blöschl, G. 2013. Spatial Prediction of Stream Temperatures Using Top-Kriging with an External Drift. *Environmental Modeling & Assessment*, 18(6), 671-683.
- Lang, C., 2007. *Etiages et tarissements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français*. Thesis (PhD). CEGUM, Université Paul Verlaine (Metz).
- Lang delus, C. 2011. Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. *Cybergeog*.
- Le Moine, N., 2008. *Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d'amélioration des performances et du réalisme des mod-les pluie-débit ?* Thesis (PhD). Cemagref (Antony), UPMC (Paris).
- Lebecherel, L., 2015. *Sensibilité des calculs hydrologiques à la densité des réseaux de mesure hydrométrique et pluviométrique*. Thesis (PhD). Irstea (Antony), AgroParisTech.
- Li, H. X., Zhang, Y. Q., Chiew, F. H. S. et Xu, S. G. 2009. Predicting runoff in ungauged catchments by using Xinanjiang model with MODIS leaf area index. *Journal of Hydrology*, 370(1-4), 155-162.
- Lobligeois, F., 2014. *Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ? Diagnostic sur 181 bassins versants français*. Thesis (PhD). Irstea (Antony), AgroParisTech.
- Longobardi, A. et Villani, P. 2008. Baseflow index regionalization analysis in a mediterranean area and data scarcity context: Role of the catchment permeability index. *Journal of Hydrology*, 355(1-4), 63-75.
- Madsen, H. 2003. Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. *Advances in Water Resources*, 26(2), 205-216.
- Magand, C., 2014. *Influence de la représentation des processus nivaux sur l'hydrologie de la Durance et sa réponse au changement climatique*. Thesis (PhD). UPMC (Paris).
- Mathevet, T., 2005. *Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire ? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants*. Thesis (PhD). Cemagref (Antony), ENGREF (Paris).
- Mathevet, T., Michel, C., Andréassian, V. et Perrin, C. 2006. A bounded version of the Nash-Sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins. *IAHS-AISH Publication*, (307), 211-219.
- Mathevet, T., Perret, C., Garcon, R., Periers, P., Goutx, D., Gibey, J. M., Oudin, R., Xhaard, H. et Roy, J. L. 2010. Drought forecasts and decision support on Loire river. *Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau*, (5), 40-51.
- Maurice, L., 2009. *Investigations of rapid groundwater flow and karst in the chalk*. Thesis (PhD). University College London.

- Mcintyre, N., Lee, H., Wheeler, H., Young, A. et Wagener, T. 2005. Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments. *Water Resources Research*, 41(12), n/a-n/a.
- Mcmahon, T. A., Pegram, G. G. S., Vogel, R. M. et Peel, M. C. 2007. Revisiting reservoir storage-yield relationships using a global streamflow database. *Advances in Water Resources*, 30(8), 1858-1872.
- Meigh, J., Tate, E. et McCartney, M. 2002. Methods for identifying and monitoring river flow drought in southern Africa. *Friend 2002-Regional Hydrology: Bridging the Gap between Research and Practice*, (274), 181-188.
- Merz, R. et Blöschl, G. 2004. Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, 287(1-4), 95-123.
- Michel, C., Perrin, C. et Andréassian, V. 2003. The exponential store: a correct formulation for rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 48(1), 109-124.
- Milly, P. C., Dunne, K. A. et Vecchia, A. V. 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438(7066), 347-350.
- Mishra, A. K. et Singh, V. P. 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 204-216.
- Mishra, A. K. et Singh, V. P. 2011. Drought modeling - A review. *Journal of Hydrology*, 403(1-2), 157-175.
- Morris, A. J., Donovan, J. J. et Strager, M. 2009. Geospatial Analysis of Climatic and Geomorphic Interactions Influencing Stream Discharge, Appalachian Mountains, USA. *Environmental Modeling & Assessment*, 14(1), 73-84.
- Nash, J. E. et Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Nathan, R. J. et McMahon, T. A. 1990. Evaluation of Automated Techniques for Base-Flow and Recession Analyses. *Water Resources Research*, 26(7), 1465-1473.
- Ngigi, S. N., Savenije, H. H. G. et Gichuki, F. N. 2008. Hydrological Impacts of Flood Storage and Management on Irrigation Water Abstraction in Upper Ewaso Ng'iro River Basin, Kenya. *Water Resources Management*, 22(12), 1859-1879.
- Nicolle, P., Andréassian, V., Riffard, M., Peschard, J., Boldetti, G. et Le Moine, N., 2012. *Cartographie du débit de référence d'étiage et du débit moyen en France : Une approche distribuée pour garantir la continuité des estimations le long du réseau hydrographique*. Rapport Irstea - Onema.
- Nicolle, P., Pushpalatha, R., Perrin, C., Francois, D., Thiéry, D., Mathevet, T., Le Lay, M., Besson, F., Soubeyroux, J. M., Viel, C., Regimbeau, F., Andréassian, V., Maugis, P., Augeard, B. et Morice, E. 2014. Benchmarking hydrological models for low-flow simulation and forecasting on French catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8), 2829-2857.

- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Renno, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M. et Saleska, S. 2011. Height Above the Nearest Drainage - a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404(1-2), 13-29.
- Olden, J. D., Kennard, M. J. et Pusey, B. J. 2012. A framework for hydrologic classification with a review of methodologies and applications in ecohydrology. *Ecohydrology*, 5(4), 503-518.
- Olsen, M., Trolldborg, L., Henriksen, H. J., Conallin, J., Refsgaard, J. C. et Boegh, E. 2013. Evaluation of a typical hydrological model in relation to environmental flows. *Journal of Hydrology*, 507, 52-62.
- Osuch, M., Romanowicz, R. J. et Booij, M. J. 2015. The influence of parametric uncertainty on the relationships between HBV model parameters and climatic characteristics. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 60(7-8), 1299-1316.
- Oudin, L., Andréassian, V., Mathevet, T., Perrin, C. et Michel, C. 2006. Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. *Water Resources Research*, 42(7).
- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C. et Le Moine, N. 2008. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44(3).
- Oudin, L., Michel, C. et Anctil, F. 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? *Journal of Hydrology*, 303(1-4), 275-289.
- Panagos, P. 2006. The European soil database. *GEO: connexion*, 5(7), 32-33.
- Parajka, J., Merz, R. et Blöschl, G. 2005. A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(3), 157-171.
- Parajka, J., Viglione, A., Rogger, M., Salinas, J. L., Sivapalan, M. et Blöschl, G. 2013. Comparative assessment of predictions in ungauged basins - Part 1: Runoff-hydrograph studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(5), 1783-1795.
- Perrin, C., 2000. *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative*. Thesis (PhD). Cemagref (Antony), Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Perrin, C., Michel, C. et Andréassian, V. 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 275-289.
- Pfaundler, M., Dübendorfer, C. et 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.
- Piggott, A. R., Moin, S. et Southam, C. 2005. A revised approach to the UKIH method for the calculation of baseflow. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 50(5), 911-920.

- Price, K., Jackson, C. R., Parker, A. J., Reitan, T., Dowd, J. et Cyterski, M. 2011. Effects of watershed land use and geomorphology on stream low flows during severe drought conditions in the southern Blue Ridge Mountains, Georgia and North Carolina, United States. *Water Resources Research*, 47(2).
- Price, K., Purucker, S. T., Kraemer, S. R. et Babendreier, J. E. 2012. Tradeoffs among watershed model calibration targets for parameter estimation. *Water Resources Research*, 48(10).
- Pryce, R., 2004. *Hydrological Low Flow Indices and their Use.*: Watershed Science Centre.
- Pushpalatha, R., 2013. *Low-flow simulation and forecasting on French river basins: a hydrological modelling approach*. Thesis (PhD). Irstea (Antony), AgroParisTech.
- Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N. et Andréassian, V. 2012. A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. *Journal of Hydrology*, 420(0), 171-182.
- Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N., Mathevet, T. et Andréassian, V. 2011. A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation. *Journal of Hydrology*, 411(1-2), 66-76.
- Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L. et Morel, S. 2008. Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(1), 92-107.
- Razavi, T. et Coulibaly, P. 2013. Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(8), 958-975.
- Reszler, C., Blöschl, G. et Komma, J. 2008. Identifying runoff routing parameters for operational flood forecasting in small to medium sized catchments. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 53(1), 112-129.
- Ries, K. G., STREAMSTATS: A US Geological Survey web site for stream information. ed. *Hydroinformatics 2002: Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics*, 2002 Cardiff, UK.
- Riffard, M., Andréassian, V., Nicolle, P. et Peschard, J., 2012. *Combinaison multi-modèle et cartographie de consensus du débit de référence d'étiage et du débit moyen à l'échelle de la France*. Rapport Irstea - Onema.
- Robinson, M. et Cosandey, C. 2002. Impact of forest on low water discharge. *Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau*, (3), 59-63.
- Roche, M., 1986. *Dictionnaire français d'hydrologie de surface avec équivalents en anglais, espagnol, allemand*.
- Sakovich, V. M., 1990. *The representation of minimum runoff series in Karelia and North-Western region*. Trans. Hydrolmeteorol. Center USSR.

- Salavati, B., 2015. *Impact de l'urbanisation sur la réponse hydrologique des bassins versants urbains*. Thesis (PhD). UPMC (Paris).
- Samuel, J., Coulibaly, P. et Metcalfe, R. A. 2011. Estimation of Continuous Streamflow in Ontario Ungauged Basins: Comparison of Regionalization Methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(5), 447-459.
- Sauquet, E., Gottschalk, L. et Krasovskaia, I. 2008. Estimating mean monthly runoff at ungauged locations: an application to France. *Hydrology Research*, 39(5-6), 403-423.
- Sauquet, E., Gottschalk, L. et Leblois, E. 2000. Mapping average annual runoff: a hierarchical approach applying a stochastic interpolation scheme. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 45(6), 799-815.
- Savenije, H. H. G. 2010. HESS Opinions "Topography driven conceptual modelling (FLEX-Topo)". *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(12), 2681-2692.
- Schwartz, S. S. 2007. Automated algorithms for heuristic base-flow separation. *Journal of the American Water Resources Association*, 43(6), 1583-1594.
- Shu, C. et Burn, D. H. 2004a. Artificial neural network ensembles and their application in pooled flood frequency analysis. *Water Resources Research*, 40(9), W0930101-W0930110.
- Shu, C. et Burn, D. H. 2004b. Homogeneous pooling group delineation for flood frequency analysis using a fuzzy expert system with genetic enhancement. *Journal of Hydrology*, 291(1-2), 132-149.
- Singh, P. K., Kumar, V., Purohit, R. C., Kothari, M. et Dashora, P. K. 2008. Application of Principal Component Analysis in Grouping Geomorphic Parameters for Hydrologic Modeling. *Water Resources Management*, 23(2), 325-339.
- Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S. W., Gupta, V. K., Karambiri, H., Lakshmi, V., Liang, X., McDonnell, J. J., Mondono, E. M., O'Connell, P. E., Oki, T., Pomeroy, J. W., Schertzer, D., Uhlenbrook, S. et Zehe, E. 2003. IAHS decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 48(6), 857-880.
- Skøien, J. O. et Blöschl, G. 2007. Spatiotemporal topological kriging of runoff time series. *Water Resources Research*, 43(9), n/a-n/a.
- Skøien, J. O., Blöschl, G., Laaha, G., Pebesma, E., Parajka, J. et Viglione, A. 2014. rtop: An R package for interpolation of data with a variable spatial support, with an example from river networks. *Computers & Geosciences*, 67(0), 180-190.
- Skøien, J. O., Merz, R. et Blöschl, G. 2006. Top-kriging - Geostatistics on stream networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(2), 277-287.
- Smakhtin, V. U. 2001. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240(3-4), 147-186.

- Smakhtin, V. Y. et Watkins, D. A., 1997. *Low-flow estimation in South Africa*. Water Research Commission.
- Soubeyroux, J. M., Vidal, J. P., Baillon, M., Blanchard, M., Ceron, J. P., Franchisteguy, L., Regimbeau, F., Martin, E. et Vincendon, J. C. 2010. Characterizing and forecasting droughts and low-flows in France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau*, (5), 30-39.
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M. et Foufoula-Georgiou, E., 1993. Frequency analysis of extreme events. In: MAIDMENT, D. ed. *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, 18.11-18.66.
- Steinschneider, S., Yang, Y. C. E. et Brown, C. 2015. Combining regression and spatial proximity for catchment model regionalization: a comparative study. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 60(6), 1026-1043.
- Tallaksen, L. M. 1989. Analysis of time variability in recessions. *IAHS-AISH Publication*, 187, 85-96.
- Tallaksen, L. M. et Hisdal, H. 1997. Regional analysis of extreme streamflow drought duration and deficit volume. *IAHS-AISH Publication*, 246, 141-150.
- Tallaksen, L. M. et Van Lanen, H. a. J., 2004. *Hydrological Drought Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Elsevier Science.
- Thiéry, D., 2009. *Presentation of the Gardénia software package developed by BRGM*.
- Thomas, D. M. et Benson, M. A., 1970. *Generalization of Streamflow characteristics from drainage-basin characteristics*. USGS Water Supply.
- Thomas, H. A., 1981. *Improved methods for rational water assessment*. US Water Resources Council, Washington, DC, USA.
- Turc, L. 1954. Water balance of soil: relation between precipitation, evapotranspiration and runoff turc. *Ann. Agron*, 5, 491-595.
- Valéry, A., 2010. *Modélisation précipitations - débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants*. Thesis (PhD). Cemagref (Antony), AgroParisTech.
- Valéry, A., Andréassian, V. et Perrin, C. 2014. 'As simple as possible but not simpler': What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 – Sensitivity analysis of the Cemanige snow accounting routine on 380 catchments. *Journal of Hydrology*, 517, 1176-1187.
- Van Lanen, H. a. J., Clausen, B. et Kaspárek, L., 1993. Interaction between low flows and hydrogeology. In: *Flow regimes from international experimental and network data (FRIEND)*, A. Gustard (ed.). Vol.1 *Hydrological Studies*, Wallingford (1993) 21-56.
- Van Lanen, H. a. J., Laaha, G., Kingston, D. G., Gauster, T., Ionita, M., Vidal, J.-P., Vlnas, R., Tallaksen, L. M., Stahl, K., Hannaford, J., Delus, C., Fendekova, M., Mediero, L., Prudhomme, C., Rets, E., Romanowicz, R. J., Gailliez, S., Wong, W. K., Adler, M.-J., Blauhut, V., Caillouet, L., Chelcea, S., Frolova, N., Gudmundsson, L., Hanel, M.,

- Haslinger, K., Kireeva, M., Osuch, M., Sauquet, E., Stagge, J. H. et Van Loon, A. F. 2016. Hydrology needed to manage droughts: the 2015 European case. *Hydrological Processes*, 30(17), 3097-3104.
- Van Lanen, H. a. J. et Weerd, V. D., 1994. Groundwater flow from a Cretaceous chalk plateau: impact of groundwater recharge and abstraction. *FRIEND: Flow Regimes from International Experimental and Network Data*. Wallingford: IAHS Publication ed., 77-86.
- Van Loon, A. F. et Van Lanen, H. a. J. 2012. A process-based typology of hydrological drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7), 1915-1946.
- Vandewiele, G. L. et Elias, A. 1995. Monthly Water-Balance of Ungauged Catchments Obtained by Geographical Regionalization. *Journal of Hydrology*, 170(1-4), 277-291.
- Veza, P., Comoglio, C., Rosso, M. et Viglione, A. 2010. Low Flows Regionalization in North-Western Italy. *Water Resources Management*, 24(14), 4049-4074.
- Vidal, J. P., Martin, E., Franchisteguy, L., Baillon, M. et Soubeyroux, J. M. 2010a. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627-1644.
- Vidal, J. P., Martin, E., Franchisteguy, L., Habets, F., Soubeyroux, J. M., Blanchard, M. et Baillon, M. 2010b. Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(3), 459-478.
- Vidal, J. P., Martin, E., Kitova, N., Najac, J. et Soubeyroux, J. M. 2012. Evolution of spatio-temporal drought characteristics: validation, projections and effect of adaptation scenarios. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2935-2955.
- Vis, M., Knight, R., Pool, S., Wolfe, W. et Seibert, J. 2015. Model Calibration Criteria for Estimating Ecological Flow Characteristics. *Water*, 7(5), 2358-2381.
- Vogel, R. M. et Fennessey, N. M. 1994. Flow-Duration Curves. I: New Interpretation and Confidence Intervals. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(4), 485-504.
- Vogel, R. M. et Fennessey, N. M. 1995. Flow duration curves II: a review of applications in water resources planning. *Water Resources Bulletin*, 31(6), 1029-1039.
- Vogel, R. M. et Kroll, C. N. 1991. The Value of Streamflow Record Augmentation Procedures in Low-Flow and Flood-Flow Frequency-Analysis. *Journal of Hydrology*, 125(3-4), 259-276.
- Vogel, R. M. et Kroll, C. N. 1992. Regional Geohydrologic-Geomorphic Relationships for the Estimation of Low-Flow Statistics. *Water Resources Research*, 28(9), 2451-2458.
- Wagener, T., Wheeler, H. et Gupta, H. V., 2004. *Rainfall-runoff Modelling in Gauged and Ungauged Catchments*.

- Wagener, T. et Wheater, H. S. 2006. Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 132-154.
- Wasson, J. G., Chandesris, A., Pella, H. et Blanc, L., 2002. *Les hydro-écorégions de France métropolitaine. Approche régionale de la typologie des eaux courantes et éléments pour la définition des peuplements de référence d'invertébrés.*: Rapport Irstea.
- Wasson, J. G., Chandesris, A., Pella, H. et 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 Irstea.
- Westerberg, I. K., Guerrero, J. L., Younger, P. M., Beven, K. J., Seibert, J., Halldin, S., Freer, J. E. et Xu, C. Y. 2011. Calibration of hydrological models using flow-duration curves. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(7), 2205-2227.
- Wilhite, D. A. et Glantz, M. H. 2009. Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10(3), 111-120.
- Wmo, 2008. *Manual on Low-flow Estimation and Prediction*. Operational Hydrology.
- Yevjevich, V., 1967. *An Objective Approach to Definitions and Investigations of Continental Hydrologic Droughts*. Colorado State University, Fort Collins.
- Young, A. R., 2000. *Regionalising a daily rainfall runoff model within the United Kingdom*. Thesis (PhD). University of Southampton.
- Young, A. R. 2006. Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 155-172.
- Zvolenský, M., Kohnová, S., Hlavčová, K., Szolgay, J. et Parajka, J. 2008. Regionalisation of rainfall-runoff model parameters based on geographical location of gauged catchments. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 56(3), 176-189.

Annexe 1 – Listes de bassins versants

Annexe 1.1 – Liste des 691 bassins versants de l'échantillon de référence

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
A1050310	Ill	Altkirch	233	Pluvial A	4
A1072010	Thalbach	Wittersdorf	70	Pluvial A	4
A1080330	Ill	Didenheim	656	Pluvial C	4
A1122010	Largue	Dannemarie	129	Pluvial A	4
A1252010	Doller	Reiningue	180	Pluvial C	4
A1310310	Ill	Ensisheim	1 038	Pluvial C	4
A1432010	Thur	Willers-sur-Thur	159	Pluvial C	4
A1522020	Lauch	Guebwiller	68	Pluvial C	4
A2042010	Fecht	Wintzenheim	211	Pluvial A	4
A2073010	Strengbach	Ribeauvillé	32	Pluvial B	4
A2122010	Weiss	Kaysersberg	117	Pluvial A	4
A2332110	Lièpvrette	Lièpvre	108	Pluvial C	4
A2352020	Giessen	Sélestat	260	Pluvial E	4
A2512010	Andlau	Andlau	42	Pluvial A	4
A2732010	Bruche	Russ	228	Pluvial A	4
A2842010	Mossig	Soultz-les-Bains	163	Pluvial A	4
A3301010	Moder	Schweighouse-sur-Moder (aval)	622	Uniforme	4
A3422010	Zorn	Saverne	185	Pluvial A	4
A3792010	Sauer	Beinheim	541	Pluvial B	4
A3832010	Seltzbach	Niederroedern	202	Pluvial E	4
A3902010	Lauter	Wissembourg	278	Uniforme	4
A4050620	Moselle	Rupt-sur-Moselle	152	Pluvial C	4
A4142010	Moselotte	Vagney	187	Pluvial A	4
A4173010	Cleurie	Cleurie	63	Pluvial A	4
A4200630	Moselle	Saint-Nabord	626	Pluvial C	4
A4250640	Moselle	Epinal	1 217	Pluvial A	4
A4632010	Avière	Frizon	105	Pluvial C	3
A5242010	Gitte	Velotte-et-Tatignécourt	114	Pluvial C	3
A5261010	Madon	Mirecourt	382	Pluvial C	3
A5422010	Brenon	Autrey	139	Pluvial D	3
A5431010	Madon	Pulligny	943	Pluvial C	3
A6001010	Meurthe	Fraize	67	Pluvial A	4
A6051020	Meurthe	Saint-Dié	374	Pluvial A	4
A6443010	Vacon	Barbas	35	Pluvial C	3
A6571110	Vezouze	Lunéville	559	Pluvial C	3
A6621210	Mortagne	Sainte-Hélène	100	Pluvial A	4
A6731220	Mortagne	Gerbéviller	493	Pluvial A	3
A6761010	Meurthe	Damelevières	2 280	Pluvial A	4
A6953010	Amézule	Lay-Saint-Christophe	85	Pluvial D	3

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
A7122010	Esch	Jezainville	231	Pluvial D	3
A7213010	Ruisseau du Trey	Vandières	39	Pluvial B	3
A7642010	Petite Seille	Château-Salins	143	Uniforme	3
A7821010	Seille	Nomeny	925	Pluvial C	3
A7881010	Seille	Metz	1 280	Pluvial C	3
A8071010	Orne	Boncourt	412	Pluvial D	3
A8322010	Woigot	Briey	76	Pluvial B	3
A8431010	Orne	Rosselange	1 226	Pluvial D	3
A8732010	Canner	Koenigsmacker	110	Pluvial A	3
A8902010	Alzette	Audun-le-Tiche	22	Pluvial B	3
A9001050	Sarre Blanche	Laneuville-lès-Lorquin	72	Uniforme	4
A9013050	Sarre Rouge	Vasperviller	89	Uniforme	4
A9091050	Sarre	Keskastel	879	Pluvial C	3
A9132050	Albe	Sarralbe	406	Pluvial C	3
A9221010	Sarre	Sarreinsming	1 760	Pluvial C	3
A9352050	Eichel	Oermingen	277	Pluvial C	4
A9402110	Horn	Bousseviller	95	Uniforme	4
A9532010	Rosselle	Forbach	190	Uniforme	3
A9752010	Nied Française	Condé-Northen	499	Pluvial D	3
A9862010	Nied Allemande	Varize	364	Pluvial C	3
A9942010	Nied	Bouzonville	1 160	Pluvial C	3
B0220010	Meuse	Goncourt	364	Pluvial D	3
B1092010	Mouzon	Circourt-sur-Mouzon	405	Pluvial D	3
B1282010	Vair	Soulosse-sous-St-Elophe	443	Pluvial D	3
B1340010	Meuse	Vaucouleurs	1 717	Pluvial D	3
B2012010	Aroffe	Aroffe	39	Pluvial A	3
B2042010	Aroffe	Vannes-le-Chatel	198	Pluvial D	3
B2220010	Meuse	Saint-Mihiel	2 540	Pluvial D	3
B4031010	Chiers	Montigny-sur-Chiers	274	Pluvial C	3
B4132010	Crusnes	Pierrepont	206	Pluvial E	3
B4572010	Loison	Han-lès-Juvigny	348	Pluvial D	3
B4601010	Chiers	Chauvency-le-Château	1 700	Pluvial A	3
B4631010	Chiers	Carignan	1 967	Pluvial A	3
B5322010	Vence	Francheville	124	Pluvial C	3
B6111010	Semoy	Haulmé	1 336	Pluvial C	2
D0137010	Helpe Mineure	Etroeungt	175	Pluvial C	2
D0137020	Helpe Mineure	Maroilles	275	Pluvial C	2
D0156510	Helpe Majeure	Liessies	198	Pluvial C	2
D0156520	Helpe Majeure	Taisnières-en-Thiérache	320	Pluvial C	2
D0206010	Solre	Ferrière-la-Grande	119	Pluvial A	2
E1727510	Ecaillon	Thiant	173	Uniforme	2
E3511210	Lys	Lugy	84	Uniforme	2
E3511220	Lys	Delettes	158	Pluvial A	2
E4035710	Aa	Wizernes	392	Uniforme	2
E4306010	Hem	Tournehem-sur-la-Hem	105	Pluvial C	2

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
E4905710	Yser	Bambecque	239	Pluvial C	2
E5300210	Liane	Wirwignes	100	Pluvial C	2
E5400310	Canche	Brimeux	894	Uniforme	2
E5406510	Ternoise	Hesdin	342	Uniforme	2
E5505720	Authie	Dompierre-sur-Authie	784	Uniforme	2
E6406010	Avre	Moreuil	642	Uniforme	2
G1003010	Yères	Touffreville-sur-Eu	267	Uniforme	2
G2011010	Béthune	Saint-Aubin-le-Cauf	307	Pluvial A	2
H0100010	Seine	Nod-sur-Seine	371	Pluvial E	3
H0100020	Seine	Plaines-Saint-Lange	704	Pluvial A	3
H0321030	Ource	Autricourt	548	Pluvial E	3
H0400010	Seine	Bar-sur-Seine	2 340	Pluvial E	3
H0503010	Hozain	Buchères	249	Pluvial E	2
H1051020	Aube	Longchamp-sur-Aujon	657	Pluvial E	3
H1333010	Laine	Soulaines-Dhuys	24	Pluvial A	2
H1503910	Herbissonne	Allibaudières	87	Pluvial B	2
H1513210	Barbuise	Pouan-les-Vallées	187	Pluvial B	2
H1603010	Superbe	Saint-Saturnin	320	Pluvial B	2
H1713010	Ardusson	Saint-Aubin	159	Pluvial B	2
H2062010	Beuvron	Ouagne	263	Pluvial E	3
H2073110	Sauzay	Corvol-l'Orgueilleux	80	Pluvial B	3
H2083110	Drues	Surgy	194	Pluvial B	3
H2322010	Serein	Bierre-lès-Semur	266	Pluvial D	5
H2402010	Armançon	Brianny	222	Pluvial E	3
H2412010	Armançon	Quincy-le-Vicomte	483	Pluvial D	3
H2473010	Armance	Chessy-les-Prés	480	Pluvial E	2
H2513110	Tholon	Champvallon	131	Pluvial B	2
H3102010	Ouanne	Toucy	153	Pluvial D	2
H3122010	Ouanne	Charny	562	Pluvial E	2
H3201010	Loing	Chalette-sur-Loing	2 300	Pluvial E	2
H3203310	Puiseaux	Saint-Hilaire-sur-Puiseaux	94	Pluvial B	2
H4022020	Essonne	Guigneville-sur-Essonne	875	Uniforme	2
H4033010	Juine	Méréville	199	Uniforme	2
H4042010	Essonne	Ballancourt-sur-Essonne	1 870	Uniforme	2
H4223110	Remarde	Saint-Cyr-sous-Dourdan	147	Uniforme	2
H4252010	Orge	Morsang-sur-Orge	922	Pluvial A	2
H5062010	Rognon	Doulaincourt-Saucourt	614	Pluvial E	3
H5142610	Chée	Villote-devant-Louppy	113	Pluvial C	3
H5142620	Chée	Bettancourt-la-Longue	215	Pluvial D	2
H5172010	Saulx	Vitry-en-Perthois	2 100	Pluvial C	3
H5173110	Bruxenelle	Brusson	136	Pluvial E	2
H5213310	Soude	Soudron	105	Pluvial B	2
H5412020	Petit Morin	Jouarre	605	Pluvial B	2
H5613020	Thérouanne	Congis-sur-Thérouanne	167	Uniforme	2
H5732010	Grand Morin	Pommeuse	770	Pluvial A	2

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
H6023210	Ante	Chatrices	113	Pluvial E	2
H6053010	Biesme	Claon	70	Pluvial D	2
H6102010	Aire	Beausite	282	Pluvial D	3
H6122010	Aire	Varennnes-en-Argonne	627	Pluvial C	3
H6162010	Aire	Chevières	1 000	Pluvial D	3
H6221010	Aisne	Givry	2 940	Pluvial E	2
H6313020	Suippe	Orainville	802	Pluvial B	2
H6402010	Vesle	Bouy	286	Pluvial B	2
H6423010	Ardres	Fismes	297	Pluvial B	2
H7021010	Oise	Hirson	315	Pluvial C	2
H7033010	Thon	Origny-en-Thiérache	258	Pluvial A	2
H7061010	Oise	Origny-Sainte-Benoite	1 170	Pluvial A	2
H7142010	Serre	Mortiers	733	Uniforme	2
H7162010	Serre	Pont à Bucy	1 630	Uniforme	2
H7413210	Divette	Passel	72	Uniforme	2
H7602010	Breche	Nogent-sur-Oise	468	Uniforme	2
H7702010	Thérain	Bonnières	202	Uniforme	2
H7713010	Petit Thérain	Saint-Omer-en-Chaussée	212	Uniforme	2
H7742010	Thérain	Beauvais	747	Uniforme	2
H7742020	Thérain	Maysel	1 200	Uniforme	2
H7853010	Sausseron	Nesle-la-Vallée	101	Uniforme	2
H8012010	Epte	Gournay-en-Bray	247	Pluvial A	2
H8043310	Aubette de Magny	Ambleville	99	Uniforme	2
H8212010	Andelle	Vascoeuil	377	Uniforme	2
H9021010	Eure	Saint-Lupercé	330	Pluvial D	2
H9202010	Avre	Acon	495	Uniforme	2
H9222010	Avre	Muzy	880	Uniforme	2
H9402030	Iton	Normanville	1 031	Uniforme	2
H9913010	Cailly	Fontaine-le-Bourg	85	Uniforme	2
H9913020	Cailly	Notre-Dame-de-Bondeville	199	Uniforme	2
I0011010	Risle	Rai	149	Pluvial A	2
I0102010	Charentonne	Bocquencé	66	Pluvial C	2
I0113010	Guiel	Montreuil-l'Argillé	83	Uniforme	2
I1031010	Touques	Saint-Martin-de-la-Lieue	290	Uniforme	2
I1203010	Calonne	Authieux-sur-Calonne	175	Uniforme	2
I2001010	Dives	Saint-Lambert-sur-Dive	94	Pluvial E	2
I2021010	Dives	Beaumaïs	287	Pluvial B	2
I2213610	Ancre	Cricqueville-en-Auge	57	Pluvial A	2
I3131010	Orne	Rabodanges	995	Pluvial D	2
I4032010	Seulles	Tierceville	254	Pluvial C	1
I5053010	Souleuvre	Carville	115	Pluvial C	1
I6964010	Petit Douet	Héauville	12	Pluvial C	1
I7222020	Soulles	Saint-Pierre-de-Coutances	143	Pluvial C	1
I7913610	Thar	Jullouville	72	Pluvial C	1
I9221010	Sélune	Ducey	720	Pluvial E	1

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
J0014010	Nançon	Lécousse	67	Pluvial A	1
J0121510	Couesnon	Romazy	510	Pluvial E	1
J0144010	Loysance	Saint-Ouen-la-Rouerie	82	Pluvial A	1
J0323010	Guyoult	Epiniac	63	Pluvial D	1
J0621610	Rance	Guenroc	380	Pluvial D	1
J0626610	Néal	Médréac	82	Pluvial D	1
J1103010	Arguenon	Jugon-les-Lacs	104	Pluvial D	1
J1114010	Rosette	Mégrit	102	Pluvial D	1
J1313010	Gouessant	Andel	242	Pluvial D	1
J1513010	Gouet	Saint-Julien	138	Pluvial E	1
J1711710	Trieux	Saint-Péver	183	Pluvial E	1
J1813010	Leff	Quemper-Guézennec	339	Pluvial E	1
J2023010	Jaudy	Mantallot	164	Pluvial D	1
J2233010	Léguer	Belle-Isle-en-Terre	260	Pluvial E	1
J2314910	Yar	Tréduder	59	Pluvial E	1
J2514010	Dourduff	Garlan	45	Pluvial E	1
J2603010	Jarlot	Plougonven	44	Pluvial E	1
J2605410	Tromorgant	Pougonven	42	Pluvial E	1
J2723010	Penze	Taulé	141	Pluvial D	1
J3014310	Horn	Mespaul	50	Pluvial A	1
J3024010	Guillec	Trézilidé	43	Pluvial A	1
J3205710	Aber Wrac'h	Drennec	24	Pluvial E	1
J3213020	Aber-Benoit	Plabennec	27	Pluvial E	1
J3323020	Aber Ildut	Brélès	90	Pluvial E	1
J3413020	Elorn	Ploudiry	202	Pluvial C	1
J3514010	Mignonne	Irvillac	70	Pluvial C	1
J3601810	Aulne	Scrignac	117	Pluvial D	1
J3713010	Hyères	Trébivan	257	Pluvial D	1
J3811810	Aulne	Chateauneuf-du-Faou	1 224	Pluvial D	1
J3834010	Douffine	Saint-Ségal	138	Pluvial C	1
J4014010	Goyen	Pont-Croix	89	Pluvial D	1
J4211910	Odet	Ergué-Gabéric	205	Pluvial D	1
J4214510	Langelin	Briec	7	Pluvial D	1
J4224010	Jet	Ergué-Gabéric	107	Pluvial E	1
J4313010	Steir	Guengat	179	Pluvial D	1
J4514010	Moros	Concarneau	20	Pluvial E	1
J4614010	Ster Goz	Bannalec	70	Pluvial E	1
J4712010	Ellé	Faouet	145	Pluvial D	1
J4734010	Inam	Faouet	118	Pluvial D	1
J4742010	Ellé	Arzano	578	Pluvial D	1
J4803010	Isole	Scaer	97	Pluvial C	1
J4813010	Isole	Quimperlé	224	Pluvial D	1
J4902011	Laïta	Quimperlé	832	Pluvial E	1
J5102210	Scorff	Plouay	300	Pluvial E	1
J5202110	Blavet	Kerien	21	Pluvial E	1

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
J5412110	Blavet	Mur-de-Bretagne	620	Pluvial D	1
J5613010	Evel	Guénin	316	Pluvial D	1
J5704810	Coët-Organ	Quistinic	48	Pluvial D	1
J6213010	Loch	Brech	179	Pluvial D	1
J7083110	Chevré	Bouexière	153	Pluvial D	1
J7214010	Flume	Pacé	93	Pluvial D	1
J7353010	Meuse	Montfort-sur-Meu	468	Pluvial D	1
J7483010	Seiche	Bruz	820	Pluvial D	1
J7633010	Semnon	Brain-de-Bretagne	383	Pluvial D	1
J7824010	Aron	Grand-Fougeray	118	Pluvial D	1
J7973010	Canut Sud	Saint-Just	37	Pluvial D	1
J8002310	Oust	Saint-Martin-des-Prés	29	Pluvial D	1
J8133010	Lié	Prénessaye	296	Pluvial E	1
J8363110	Yvel	Loyat	315	Pluvial D	1
J8433010	Claie	Saint-Jean-Brévelay	137	Pluvial E	1
J8502310	Oust	Saint-Gravé	2 465	Pluvial D	1
J8602410	Aff	Paimpont	30	Pluvial D	1
J8632410	Aff	Quelneuc	334	Pluvial D	1
J8813010	Arz	Molac	148	Pluvial D	1
K0010010	Loire	Ussclades-et-Rieutord	62	Méditerranéen	8
K0030010	Loire	Issarlès	229	Pluvio-Nival	8
K0403010	Lignon du Velay	Chambon-sur-Lignon	139	Pluvio-Nival	6
K0433010	Lignon Vellave	Yssingaux	350	Pluvio-Nival	6
K0454010	Dunières	Sainte-Sigolène	228	Pluvio-Nival	6
K0523010	Ance du Nord	Saint-Julien-d'Ance	354	Pluvial B	6
K0567520	Semène	Saint-Didier-en-Velay	134	Pluvio-Nival	6
K0568310	Ecotay	Marlhes	5	Pluvio-Nival	6
K0663310	Coise	Larajasse	61	Pluvial A	6
K0704510	Toranche	Saint-Cyr-les-Vignes	62	Pluvial A	6
K0724510	Chanasson	Civens	13	Pluvial A	6
K0753210	Lignon du Forez	Boen	371	Pluvial B	6
K0943010	Rhins	Amplepuis	114	Pluvial A	6
K0974010	Gand	Neaux	85	Pluvial A	6
K0983010	Rhins	Saint-Cyr-de-Favières	427	Pluvial A	6
K1004510	Rhodon	Perreux	32	Pluvial A	5
K1173210	Arconce	Montceaux-l'Etoile	599	Pluvial E	5
K1273110	Ternin	Tavernay	257	Pluvial E	5
K1284810	Selle	Celle-en-Morvan	138	Pluvial C	5
K1321810	Arroux	Etang-sur-Arroux	1 798	Pluvial D	5
K1341810	Arroux	Rigny-sur-Arroux	2 277	Pluvial E	5
K1383010	Bourbince	Vitry-en-Charollais	819	Pluvial E	5
K1503010	Besbre	Chatel-Montagne	135	Pluvial A	6
K1524010	Barbenan	Breuil	121	Pluvial A	6
K1533010	Besbre	Saint-Prix	360	Pluvial A	6
K1724210	Dragne	Vandenesse	115	Pluvial E	5

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
K1753110	Alène	Cercy-la-Tour	338	Pluvial C	5
K1773010	Aron	Verneuil	1465	Pluvial E	3
K1914510	Ixeure	Fermeté	115	Pluvial D	3
K1954010	Nièvre d'Arzembouy	Poiseux	224	Pluvial E	3
K2064010	Langouyrou	Langogne	66	Pluvio-Nival	6
K2123010	Chapeauroux	Chateauneuf-de-Randon	109	Pluvio-Nival	6
K2210810	Allier	Monistrol-d'Allier	988	Pluvio-Nival	6
K2233020	Ance du Sud	Monistrol-d'Allier	225	Pluvial B	6
K2254010	Seuge	Saugues	122	Pluvio-Nival	6
K2283110	Desges	Chanteuges	140	Pluvio-Nival	6
K2330810	Allier	Vieille-Brioude	2 269	Pluvio-Nival	6
K2363010	Senouire	Paulhaguet	155	Pluvio-Nival	6
K2514010	Allanche	Jobsac	157	Pluvial B	6
K2523010	Alagnon	Jobsac	310	Pluvial B	6
K2544010	Alagnonnette	Massiac	66	Pluvial B	6
K2593010	Alagnon	Lempdes	984	Pluvial B	6
K2644010	Ailloux	Manglieu	73	Pluvial B	6
K2654010	Couze Pavin	Saint-Floret	216	Pluvial B	6
K2674010	Couze Chambon	Montaigut-le-Blanc	159	Pluvial A	6
K2753010	Morge	Montcel	117	Pluvial B	5
K2783010	Morge	Maringues	713	Uniforme	5
K2834010	Dolore	Saint-Bonnet-le-Chastel	70	Pluvio-Nival	6
K2871910	Dore	Saint-Gervais-sous-Meymont	800	Pluvial B	6
K2884010	Faye	Olliergues	72	Pluvio-Nival	6
K2944010	Couzon	Courpière	75	Pluvio-Nival	6
K3153010	Andelot	Loriges	210	Pluvio-Nival	5
K3222010	Sioule	Pontgibaud	353	Pluvial A	6
K3264010	Saunade	Pontaumur	112	Pluvial B	5
K3292020	Sioule	Miremont	1 300	Pluvial A	5
K3374710	Boublon Lagées	Fourilles	71	Pluvial B	5
K4094010	Nohain	Saint-Martin-sur-Nohain	473	Uniforme	2
K4443010	Ardoux	Lailly-en-Val	155	Pluvial E	2
K4873110	Brenne	Villedomer	263	Pluvial E	2
K5183010	Tardes	Evaux-les-Bains	854	Pluvial E	5
K5200910	Cher	Teillet-Argenty	1 600	Pluvial E	5
K6334010	Nère	Aubigny-sur-Nère	79	Pluvial B	2
K6402510	Sauldre	Salbris	1 200	Pluvial E	2
K6492510	Sauldre	Selles-sur-Cher	2 254	Pluvial E	2
K7202610	Indre	Ardentes	697	Pluvial E	5
K7312610	Indre	Saint-Cyran-du-Jambot	1 712	Pluvial E	2
K7514010	Echandon	Saint-Branches	127	Pluvial E	2
L0010620	Vienne	Peyrelevade	71	Pluvial A	5
L0140610	Vienne	Saint-Priest-Taurion	1 156	Pluvial A	5
L0231510	Taurion	Pontarion	388	Pluvial A	5
L0314010	Vige	Saint-Martin-Ste-Catherine	134	Pluvial A	5

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
L0321510	Taurion	Saint-Priest-Taurion	1 030	Pluvial B	5
L0563010	Briance	Condat-sur-Vienne	597	Pluvial A	5
L0813010	Glane	Saint-Junien	288	Pluvial E	5
L2253010	Vonne	Cloué	320	Pluvial D	1
L2321610	Clain	Vivonne	1 822	Pluvial E	2
L2443010	Auxance	Quinçay	262	Pluvial E	2
L4010710	Creuse	Felletin	165	Pluvial B	5
L4033010	Rozeille	Moutier-Rozeille	186	Pluvial B	5
L4110710	Creuse	Ahun	736	Pluvial B	5
L4220710	Creuse	Fresselines	1 235	Pluvial E	5
L4321710	Petite Creuse	Genouillac	558	Pluvial E	5
L4411710	Petite Creuse	Fresselines	850	Pluvial E	5
L4653010	Bouzanne	Velles	434	Pluvial E	2
L5034010	Ardour	Folles	131	Pluvial B	5
L5101810	Gartempe	Folles	570	Pluvial B	5
L5134010	Semme	Droux	177	Pluvial E	5
L5223020	Vincou	Bellac	286	Pluvial E	5
L5323010	Brame	Oradour-Saint-Genest	235	Pluvial E	5
L5411810	Gartempe	Montmorillon	1 868	Pluvial E	5
L5623010	Benaize	Jouac	190	Pluvial E	5
L6202030	Claise	Grand-Pressigny	897	Pluvial E	2
M0014110	Hoëne	Mesnière	76	Pluvial A	2
M0050620	Sarthe	Saint-Céneri-le-Gérei	908	Pluvial D	2
M0243010	Orne Saosnoise	Montbizot	510	Pluvial E	2
M0250610	Sarthe	Neuville-sur-Sarthe	2 716	Pluvial D	2
M0361510	Huisne	Nogent-le-Rotrou	827	Pluvial A	2
M0633010	Erve	Auvers-le-Hamon	380	Pluvial D	1
M1034020	Ozanne	Trizay-lès-Bonneval	268	Pluvial D	2
M1041610	Loir	St-Maur-sur-le-Loir	1 160	Pluvial D	2
M1213010	Braye	Valennes	270	Pluvial C	2
M1354020	Escotais	Saint-Paterne-Racan	67	Pluvial E	2
M1531610	Loir	Durtal	7 920	Pluvial E	2
M3253110	Aron	Moulay	188	Pluvial D	1
M3313010	Ernée	Ernée	115	Pluvial B	1
M3323010	Ernée	Andouillé	375	Pluvial E	1
M3504010	Vicoïn	Nuillé-sur-Vicoïn	235	Pluvial D	1
M3771810	Oudon	Chatelais	734	Pluvial D	1
M5102010	Layon	Saint-Georges-sur-Layon	259	Pluvial D	1
M6013010	Evre	Chapelle-Saint-Florent	460	Pluvial D	1
M6014010	Beuvron	Andrezé	38	Pluvial D	1
M6323010	Erdre	Candé	169	Pluvial D	1
M6333020	Erdre	Nort-sur-Erdre	472	Pluvial D	1
M7112410	Sèvre Nantaise	Tiffauges	814	Pluvial D	1
M8205020	Ognon	Sorinières	147	Pluvial D	1
N0113010	Falleron	Falleron	31	Pluvial D	1

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
N3001610	Grand Lay	Saint-Prouant	131	Pluvial D	1
N3024010	Louing	Chantonnay	120	Pluvial D	1
N4010610	Sèvre Niortaise	Azay-le-Brulé	240	Pluvial E	2
N5101710	Autise	Saint-Hilaire-des-Loges	250	Pluvial D	1
O0015310	Maudan	Fos	38	Nivo-Pluvial	10
O0126210	Neste de Rioumajou	Tramezaïgues	64	Nival	10
O0295310	Noue	Laffite-Toupière	120	Pluvial B	9
O0362510	Salat	Soueix-Rogalle	379	Nivo-Pluvial	10
O0384010	Arac	Soulam	169	Pluvio-Nival	10
O0444010	Lez	Bordes-sur-Lez	212	Nivo-Pluvial	10
O0484010	Lez	Engomer	360	Nivo-Pluvial	10
O0554010	Arbas	Castelbiague	98	Pluvio-Nival	10
O0584310	Lens	Betchat	62	Pluvial B	10
O0624010	Volp	Montberaud	91	Pluvial B	10
O0744030	Arize	Mas-d'Azil	215	Pluvial B	10
O0794010	Arize	Rieux	442	Pluvial B	10
O0984010	Louge	Muret	486	Pluvio-Nival	9
O1115010	Artigue	Auzat	24	Nival	10
O1432930	Hers Vif	Bélesta	85	Pluvio-Nival	10
O1442910	Hers Vif	Peyrat	190	Pluvio-Nival	10
O1464010	Blau	Chalabre	67	Pluvial B	10
O1484310	Touyre	Lavelanet	59	Nivo-Pluvial	10
O1484320	Touyre	Montferrier	29	Nivo-Pluvial	10
O1494330	Touyre	Léran	90	Pluvio-Nival	10
O1584610	Douctouyre	Vira	134	Pluvial B	10
O1634010	Vixiège	Belpesch	196	Pluvial B	9
O1844020	Lèze	Lézat-sur-Lèze	237	Pluvial B	9
O1874010	Lèze	Labarthe-sur-Lèze	351	Pluvial B	9
O1934310	Touch	Bérat	179	Pluvial B	9
O2034010	Aussonnelle	Seilh	192	Pluvial B	9
O2215010	Saune	Quint-Fonsegrives	106	Pluvial B	9
O2222510	Hers Mort	Toulouse	768	Pluvial B	9
O2344010	Girou	Cépet	526	Pluvial B	9
O2725010	Lauze	Sémézies-Cachan	36	Pluvial B	9
O2825010	Pest	Laréole	20	Pluvial E	9
O3006710	Goudech	Saint-Maurice-de-Ventalon	10	Méditerranéen	8
O3011010	Tarn	Pont-de-Montvert	67	Méditerranéen	8
O3015520	Rieumalet	Pont-de-Montvert	20	Pluvio-Nival	8
O3031010	Tarn	Bédouès	189	Pluvio-Nival	8
O3035210	Briançon	Bondons	25	Pluvial A	8
O3064010	Tarnon	Florac	124	Méditerranéen	8
O3084320	Mimente	Florac	125	Méditerranéen	8
O3121010	Tarn	Montbrun	621	Méditerranéen	8
O3141010	Tarn	Mostuéjols	925	Pluvial A	8
O3165010	Brèze	Meyrueis	36	Pluvio-Nival	8

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
O3194010	Jonte	Meyrueis	102	Pluvio-Nival	8
O3314010	Dourbie	Dourbies	43	Méditerranéen	8
O3364010	Dourbie	Nant	300	Pluvial A	8
O3401010	Tarn	Millau	2 170	Pluvial A	8
O3454310	Muze	Montjaux	112	Pluvial E	6
O3584620	Sorgues	Saint-Affrique	352	Pluvial A	8
O4102510	Agout	Fraisse-sur-Agout	48	Pluvial C	8
O4194310	Gijou	Vabre	208	Pluvial B	6
O4704030	Dadou	Paulinet	72	Pluvial E	6
O4774010	Dadou	Montdragon	597	Pluvial B	6
O4984320	Tescou	Saint-Nauphary	287	Pluvial B	9
O5042510	Aveyron	Palmas	270	Pluvial E	8
O5055010	Serre	Coussergues	109	Pluvial E	8
O5092520	Aveyron	Onet-le-Château	556	Pluvial E	8
O5192520	Aveyron	Villefranche-de-Rouergue	1 042	Pluvial E	6
O5224010	Aizou	Villefranche-de-Rouergue	199	Pluvial E	6
O5284310	Serène	Saint-André-de-Najac	103	Pluvial E	6
O5292510	Aveyron	Languépie	1582	Pluvial E	6
O5312910	Viaur	Arques	138	Pluvial E	6
O5344010	Vioulou	Salles-Curan	57	Pluvial E	6
O5424010	Céor	Centrès	160	Pluvial B	6
O5534010	Lézert	Saint-Julien-du-Puy	222	Pluvial E	6
O5572910	Viaur	Laguépie	1 546	Pluvial E	6
O5664010	Cérou	Milhars	503	Pluvial B	6
O5685010	Bonnette	Saint-Antonin-Noble-Val	179	Pluvial E	9
O5754020	Vère	Bruniquel	311	Pluvial E	9
O5854010	Lère	Réalville	366	Pluvial B	9
O5964020	Lemboulas	Lafrançaise	403	Pluvial B	9
O6125010	Petite Barguelonne	Montcuq	62	Pluvial E	9
O6134010	Barguelonne	Valence	477	Pluvial B	9
O6194610	Séoune	Saint-Pierre-de-Clairac	463	Pluvial B	9
O6793310	Gélise	Mézin	813	Pluvial E	9
O6804630	Osse	Castex	10	Pluvial E	9
O7001510	Lot	Bagnols-les-Bains	95	Pluvio-Nival	8
O7011510	Lot	Sainte-Hélène	189	Pluvio-Nival	8
O7015810	Esclancide	Pelouse	31	Pluvio-Nival	6
O7035010	Bramont	Saint-Bauzile	116	Pluvio-Nival	8
O7041510	Lot	Balsièges	465	Pluvio-Nival	8
O7085010	Coulagnet	Marvejols	83	Pluvio-Nival	8
O7094010	Colagne	Monastier-Pin-Moriès	456	Pluvial A	6
O7101510	Lot	Banassac	1 160	Pluvial A	6
O7145220	Boralde de St-Chély	Castelnau-de-Mandailles	53	Pluvial A	6
O7191510	Lot	Entraygues-sur-Truyère	2 180	Pluvial A	6
O7234010	Rimeize	Rimeize	116	Pluvial A	6
O7234030	Rimeize	Fau-de-Peyre	81	Pluvial B	6

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
O7245010	Chapouillet	Rimeize	67	Pluvial B	6
O7265010	Limagnole	Fontans	76	Pluvio-Nival	6
O7272510	Truyère	Malzieu-Ville	542	Pluvial B	6
O7354010	Lander	Saint-Georges	310	Pluvial E	6
O7404010	Bès	Marchastel	31	Pluvial A	6
O7444010	Bès	Saint-Juéry	283	Pluvial A	6
O7635010	Bromme	Brommat	111	Pluvial A	6
O7874010	Dourdou	Conques	521	Pluvial E	8
O8113510	Célé	Figeac	676	Pluvial E	6
O8133520	Célé	Orniac	1 194	Pluvial E	6
O8255010	Vert	Labastide-du-Vert	117	Pluvial E	9
O8344020	Thèze	Boussac	102	Pluvial B	9
O8394310	Lémance	Cuzorn	234	Pluvial B	9
O8584010	Lède	Casseneuil	411	Pluvial E	9
O9034010	Tolzac	Varès	255	Pluvial E	9
O9134010	Avance	Montpouillan	405	Pluvial B	9
O9196210	Cadanne	Pondaurat	10	Pluvial E	9
O9785310	Jalle de Ludon	Pian-Médoc	23	Pluvial D	9
P0010010	Dordogne	Saint-Sauves-d'Auvergne	87	Pluvio-Nival	6
P0084010	Chavanon	Messeix	362	Pluvial A	5
P0115010	Burande	Tour-d'Auvergne	20	Pluvio-Nival	6
P0115020	Burande	Singles	85	Pluvial A	6
P0212510	Rhue	Egliseneuve-d'Entraigues	40	Pluvial A	6
P0272510	Rhue	Condat	181	Pluvial A	6
P0364010	Santoire	Condat	172	Pluvial A	6
P0714010	Diège	Chaveroche	225	Pluvial A	5
P0885010	Mars	Bassignac	117	Pluvial A	6
P1114010	Luzège	Maussac	85	Pluvial C	6
P1154010	Luzège	Lamazière-Basse	252	Pluvial E	6
P1422510	Maronne	Sainte-Eulalie	112	Pluvial A	6
P1712910	Cère	Vic-sur-Cère	88	Pluvial A	6
P1772910	Cère	Sansac-de-Marmiesse	350	Pluvial A	6
P2114010	Sourdoire	Chapelle-aux-Saints	64	Pluvial E	6
P2184310	Tourmente	Saint-Denis-lès-Matel	202	Pluvial E	9
P2315020	Borrèze	Lachapelle-Auzac	120	Pluvial B	9
P2484010	Céou	Saint-Cybranet	603	Pluvial B	9
P3015410	Ars	PérOLS-sur-Vézère	33	Pluvial A	5
P3021010	Vézère	Bugeat	143	Pluvial C	5
P3194310	Brézou	Vigeois	104	Pluvial A	5
P3234010	Loyre	Voutezac	103	Pluvial A	5
P3264310	Roseix	Vars-sur-Roseix	58	Pluvial D	5
P3322510	Corrèze	Saint-Yrieix-le-Déjalat	54	Pluvial C	5
P3502510	Corrèze	Tulle	356	Pluvial A	6
P3614010	Montane	Eyrein	43	Pluvial A	6
P3922510	Corrèze	Brive-la-Gaillarde	947	Pluvial A	6

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
P4015010	Couze	Chasteaux	64	Pluvial A	9
P6081510	Isle	Corgnac-sur-l'Isle	432	Pluvial A	5
P6382510	Auvézère	Change	884	Pluvial E	5
P7001510	Isle	Bassilac	1 863	Pluvial B	5
P7041510	Isle	Périgueux	2 123	Pluvial A	5
P8012510	Dronne	Saint-Pardoux-la-Rivière	140	Pluvial B	5
P8215010	Belle	Mareuil	40	Pluvial E	9
P8312520	Dronne	Bonnes	1 935	Pluvial E	9
P8394310	Tude	Médillac	318	Pluvial E	9
Q0115710	Oussouet	Trébons	32	Uniforme	10
Q0214010	Echez	Louey	90	Pluvial B	9
Q0224020	Echez	Bordères-sur-l'Echez	168	Uniforme	9
Q0280030	Adour	Estirac	906	Pluvio-Nival	9
Q0414010	Louet	Sombrun	84	Pluvial B	9
Q0522520	Arros	Gourgue	173	Pluvio-Nival	10
Q0612510	Arros	Juillac	590	Pluvial B	9
Q0664010	Bouès	Juillac	236	Pluvial B	9
Q1094010	Larcis	Lannux	423	Pluvial E	9
Q1100010	Adour	Aire-sur-l'Adour	2 930	Pluvial B	9
Q1314010	Gabas	Arrien	56	Pluvial A	9
Q1324010	Gabas	Poursiugues-Boucoue	142	Pluvial E	9
Q2125310	Houeillède	Lannemaignan	4	Pluvial A	9
Q2192510	Midou	Mont-de-Marsan	800	Pluvial E	9
Q2593310	Midouze	Campagne	2 500	Pluvial B	9
Q3224010	Luy de France	Monget	186	Pluvial E	9
Q3354010	Luy de Béarn	Saint-Médard	257	Pluvial E	9
Q3464010	Luy	Saint-Pandelon	1 150	Pluvial E	9
Q4674010	Gave d'Azun	Arras-en-Lavedan	191	Nival de Transition	10
Q4801010	Gave de Pau	Saint-Pé-de-Bigorre	1 120	Nival de Transition	10
Q5501010	Gave de Pau	Bérenx	2 575	Pluvio-Nival	9
Q6142910	Gave d'Ossau	Oloron-Sainte-Marie	488	Nivo-Pluvial	10
Q6332510	Gave d'Aspe	Bedous	425	Nivo-Pluvial	10
Q7002910	Gave d'Oloron	Oloron-Sainte-Marie	1 085	Nivo-Pluvial	10
Q7322510	Saison	Mauléon-Licharre	480	Pluvio-Nival	10
Q8032510	Bidouze	Aïcirits-Camou-Suhast	246	Pluvial A	10
Q8345910	Mendialçu	Hasparren	18	Pluvial A	9
Q9164610	Nive des Aldudes	Saint-Etienne-de-Baïgorry	156	Pluvial A	10
R1054010	Bonnieure	Saint-Ciers-sur-Bonnieure	203	Pluvial E	2
R1132510	Tardoire	Maisonnais-sur-Tardoire	140	Pluvial B	5
R1192510	Tardoire	Montbron	389	Pluvial E	5
S2224610	Grand Arriou	Moustey	108	Pluvial E	9
S2235610	Bouron	Belin-Béliet	36	Pluvial A	9
S2242510	Eyre	Salles	1 650	Pluvial B	9
S4214010	Magescq	Magescq	60	Uniforme	9
S5144010	Nivelle	Saint-Pée-sur-Nivelle	138	Pluvial A	10

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
U0104010	Coney	Xertigny	65	Uniforme	4
U0230010	Saône	Cendrecourt	1 130	Pluvial C	4
U0415010	Breuchin	Proiselière-et-Langle	123	Pluvial C	4
U0444310	Semouse	Saint-Loup-sur-Semouse	222	Pluvial C	4
U0474010	Lanterne	Fleurey-lès-Faverney	1 020	Pluvial C	3
U0635010	Gourgeonne	Tincey-et-Ponterbeau	140	Pluvial C	3
U0724010	Salon	Denèvre	390	Pluvial C	3
U0924010	Vingeanne	Saint-Maurice-sur-Vingeanne	398	Pluvial D	3
U0924020	Vingeanne	Oisilly	609	Pluvial C	3
U1004010	Ognon	Servance	74	Pluvial C	4
U1025010	Rahin	Plancher-Bas	33	Pluvial A	4
U1054010	Ognon	Beaumotte-Aubertans	1 250	Pluvial C	3
U1084010	Ognon	Pesmes	2 038	Pluvial C	3
U1109010	Venelle	Selongey	56	Pluvial E	3
U1115210	Pannecul	Noiron-sur-Bèze	12	Pluvial A	5
U1204010	Tille	Crécey-sur-Tille	231	Pluvial E	3
U1224010	Tille	Arceau	846	Pluvial D	3
U1224020	Tille	Cessey-sur-Tille	884	Pluvial E	3
U1235020	Norges	Genlis	266	Pluvial E	5
U1324010	Ouche	Plombières-lès-Dijon	651	Pluvial E	3
U1334010	Ouche	Trouhans	902	Pluvial E	3
U2002010	Doubs	Mouthé	30	Pluvio-Nival	7
U2012010	Doubs	Labergement-Sainte-Marie	170	Pluvio-Nival	7
U2022010	Doubs	Cluse-et-Mijoux	350	Pluvio-Nival	7
U2122010	Doubs	Goumois	1 060	Pluvial A	7
U2142010	Doubs	Gièrre	1 240	Pluvial A	7
U2215020	Dessoubre	Saint-Hyppolyte	560	Pluvial A	7
U2305210	Saint-Nicolas	Rougemonet-le-Château	9	Pluvial C	4
U2345020	Savoireuse	Giromagny	31	Pluvial C	4
U2345030	Savoireuse	Belfort	141	Pluvial C	4
U2345820	Rosemontoise	Chaux	25	Pluvial C	4
U2356610	Rupt	Dung	42	Pluvial C	3
U2425260	Cusancin	Baume-les-Dames	358	Pluvial A	7
U2604030	Loue	Vuillafans	326	Pluvial A	7
U2615820	Lison	Nans-sous-Sainte-Anne	140	Pluvial A	7
U2615830	Lison	Myon	217	Pluvial A	7
U2616410	Verneau	Nans-sous-Sainte-Anne	11	Pluvial A	7
U2624010	Loue	Chenecey-Buillon	1 160	Pluvial A	7
U2634010	Loue	Champagne-sur-Loue	1 380	Pluvial A	7
U3214010	Grosne	Jalogny	333	Pluvial E	6
U3225010	Guye	Sigy-le-Châtel	272	Pluvial D	3
U3415020	Brenne	Sellières	37	Pluvial C	7
U3424010	Seille	Saint-Usuge	937	Pluvial C	5
U4014010	Reyssouze	Montagnat	84	Pluvial A	5
U4204010	Veyle	Lent	34	Pluvial A	5

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
U4235010	Renon	Neuville-les-Dames	102	Pluvial A	5
U4505010	Ardières	Beaujeu	55	Pluvial A	6
U4624010	Azergues	Châtillon	336	Pluvial E	6
U4635010	Brévenne	Sain-Bel	219	Pluvial A	6
U4644010	Azergues	Lozanne	792	Pluvial C	6
V0144010	Giffre	Taninges	325	Nival de Transition	7
V0205010	Bronze	Bonneville	28	Nivo-Pluvial	7
V0245610	Aire	Saint-Julien-en-Genevois	40	Pluvial C	7
V0325010	Dranse de Morzine	Seytroux	170	Nivo-Pluvial	7
V0355010	Foron	Sciez	66	Pluvial A	7
V1015030	Valserine	Chézery-Forens	119	Nivo-Pluvial	7
V1015810	Semine	Châtillon-en-Michaille	183	Pluvio-Nival	7
V1214010	Fier	Dingy-Saint-Clair	222	Nivo-Pluvial	7
V1235210	Ire	Doussard	27	Nivo-Pluvial	7
V1235610	Eau Morte	Doussard	93	Pluvio-Nival	7
V1237410	Laudon	Saint-Jorioz	29	Pluvial A	7
V1255010	Chéran	Allèves	249	Pluvio-Nival	7
V1257810	Eparis	Alby-sur-Chéran	23	Pluvial A	7
V1264010	Fier	Vallières	1 350	Pluvio-Nival	7
V1504010	Guiers Mort	Saint-Laurent-du-Pont	89	Nivo-Pluvial	7
V1515010	Guiers Vif	Saint-Christophe-sur-Guiers	114	Pluvio-Nival	7
V2114010	Angillon	Champagnole	117	Pluvial C	7
V2202010	Ain	Marigny	650	Pluvial A	7
V2206010	Hérisson	Doucier	49	Pluvial A	7
V2414010	Bienne	Saint-Claude	216	Pluvio-Nival	7
V2444020	Bienne	Jeurre	650	Pluvial A	7
V2814020	Suran	Neuville-sur-Ain	324	Pluvial C	7
V2814030	Suran	Pont-d'Ain	349	Pluvial C	7
V2924010	Albarine	Saint-Rambert-en-Bugey	232	Pluvial A	7
V2934010	Albarine	Saint-Denis-en-Bugey	288	Pluvial C	7
V3015010	Yzeron	Craponne	48	Pluvial A	6
V3114010	Gier	Rive-de-Gier	319	Pluvio-Nival	6
V3124010	Gier	Givors	406	Pluvio-Nival	6
V3315010	Valencize	Chavanay	36	Pluvio-Nival	6
V3614010	Galaure	Saint-Uze	232	Pluvio-Nival	7
V4034020	Véore	Beaumont-lès-Valence	192	Pluvio-Nival	8
V4145210	Glueyre	Gluiras	71	Méditerranéen	8
V4214010	Drôme	Luc-en-Diois	194	Pluvial B	8
V4225010	Bez	Châtillon-en-Diois	227	Nivo-Pluvial	8
V4226010	Archiane	Treschenu-Creyers	43	Nivo-Pluvial	8
V4264010	Drôme	Saillans	1 150	Pluvio-Nival	8
V4414010	Roubion	Soyans	186	Pluvio-Nival	8
V5004010	Ardèche	Pont-de-Labeaume	292	Méditerranéen	8
V5014010	Ardèche	Vogüé	623	Méditerranéen	8
V5045810	Borne	Saint-Laurent-les-Bains	63	Méditerranéen	8

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
V5064010	Ardèche	Saint-Martin-d'Ardèche	2 326	Méditerranéen	8
V5424010	Cèze	Bessègues	230	Méditerranéen	8
V5425210	Gagnière	Gagnières	55	Méditerranéen	8
V5474010	Cèze	Roque-sur-Cèze	1 060	Méditerranéen	8
V6035010	Toulourenc	Malaucène	150	Pluvial A	8
V6125010	Auzon	Mormoiron	75	Pluvial A	8
V7115010	Gardon de Sainte-Croix	Gabriac	47	Méditerranéen	8
V7124010	Gardon de Mialet	Générargues	240	Méditerranéen	8
V7135010	Gardon de Saint-Jean	Corbès	263	Méditerranéen	8
W0000010	Isère	Val-d'Isère	46	Nivo-Glaciaire	7
W0224010	Doron de Bozel	Perrière	330	Nivo-Glaciaire	7
W0300010	Isère	Aigueblanche	1 582	Nival de Transition	7
W1006010	Avérole	Bessans	45	Nivo-Glaciaire	7
W1034010	Arc	Saint-Michel-de-Maurienne	939	Nival de Transition	7
W2714010	Romanche	Mizoën	220	Nival	7
W2755010	Eau d'Olle	Allemond	172	Nival	7
W2764010	Romanche	Bourg-d'Oisans	1 000	Nival de Transition	7
W3315010	Meaudret	Méaudre	74	Pluvio-Nival	7
W3335210	Adouin	Saint-Martin-en-Vercors	8	Nivo-Pluvial	7
X0100010	Durance	Briançon	548	Nival	7
X0310010	Durance	Embrun	2 170	Nival	7
X0454010	Ubaye	Lauzet-Ubaye	946	Nival	7
X1034020	Buech	Serres	723	Pluvio-Nival	8
X1335010	Lauzon	Villeneuve	175	Pluvial B	8
X1424010	Asse	Beynes	375	Pluvio-Nival	8
X2114010	Issole	Saint-André-les-Alpes	137	Nivo-Pluvial	8
X3434010	Coulon	Saint-Martin-de-Castillon	333	Pluvial E	8
Y0115410	Massane	Argelès-sur-Mer	17	Pluvial A	8
Y0245210	Mondony	Amélie-les-Bains-Palalda	32	Pluvio-Nival	8
Y0254040	Tech	Reynès	473	Pluvio-Nival	10
Y0255020	Ample	Reynès	48	Pluvio-Nival	8
Y0424010	Têt	Serdinya	424	Nival de Transition	10
Y0655010	Verdouble	Tautavel	305	Pluvial B	8
Y1232010	Aude	Carcassonne	1 770	Uniforme	10
Y1314010	Fresquel	Villepinte	216	Pluvial B	9
Y1325010	Treboul	Villepinte	142	Pluvial B	9
Y2015010	Arre	Vigan	155	Pluvial A	8
Y2035010	Vis	Saint-Laurent-le-Minier	499	Méditerranéen	8
Y2102010	Hérault	Laroque	912	Méditerranéen	8
Y2214010	Lergue	Lodève	228	Pluvial A	8
Y2514020	Orb	Hérépian	369	Pluvial A	8
Y2525010	Mare	Pradal	114	Pluvial A	8
Y2554010	Orb	Vieussan	905	Pluvial A	8
Y2584010	Orb	Béziers	1 330	Pluvial A	8
Y3204010	Lez	Montferrier-sur-Lez	115	Méditerranéen	8

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
Y3464010	Vidourle	Marsillargues	798	Pluvial C	8
Y4002010	Arc	Pourrières	49	Pluvial D	8
Y4604020	Gapeau	Solliès-Pont	169	Pluvial D	8
Y4615020	Réal Martin	Crau	277	Pluvial D	8
Y4624010	Gapeau	Hyères	517	Pluvial D	8
Y5005210	Cauron	Bras	154	Pluvial A	8
Y5032010	Argens	Châteauvert	485	Pluvial A	8
Y5105010	Caramy	Vins-sur-Camary	215	Pluvial A	8
Y5106610	Issole	Cabasse	223	Pluvial C	8
Y5202010	Argens	Arcs	1 730	Pluvial A	8
Y5215020	Aille	Vidauban	229	Pluvial C	8
Y5235010	Nartuby	Trans-en-Provence	190	Pluvio-Nival	8
Y5312010	Argens	Roquebrune-sur-Argens	2 530	Pluvial A	8
Y5325010	Reyran	Fréjus	71	Pluvial C	8
Y5435010	La Môle	Lavandou	44	Méditerranéen	8
Y5444010	Giscle	Cogolin	195	Pluvial D	8
Y5505410	Grenouiller	Saint-Raphaël	48	Méditerranéen	8
Y5615010	Loup	Tourettes-sur-Loup	206	Pluvio-Nival	8
Y5615020	Loup	Gourdon	140	Méditerranéen	8
Y6234010	Tinée	Tour	705	Nival de Transition	7
Y6432010	Var	Malaussène	1 830	Nivo-Pluvial	7
Y6434010	Estéron	Broc	451	Pluvial A	8

Annexe 1.2 – Liste des 141 bassins versants de l'échantillon de validation

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
A1152010	Largue	Illfurth	275	Pluvial C	4
A1222010	Doller	Masevaux	92	Pluvial C	4
A2023030	Petite Fecht	Stosswihr	46	Pluvial A	4
A2322120	Lièpvrette	Sainte-Matie-aux-Mines	19	Pluvial A	4
A2702010	Bruche	Saulxures	39	Pluvial A	4
A3151010	Moder	Schweighouse-sur-Moder (amont)	282	Uniforme	4
A3712010	Sauer	Goersdorf	192	Uniforme	4
A5012010	Euron	Froville	92	Pluvial E	3
A6812010	Sanon	Lagarde	73	Pluvial C	3
A7352010	Rupt de Mad	Onville	358	Pluvial E	3
E3646210	Clarence	Robecq	156	Uniforme	2
G7103010	Ganzeville	Ganzeville	89	Uniforme	2
H0210010	Seine	Polisy	1457	Pluvial E	3
H0400020	Seine	Courtenot	2380	Pluvial A	3
H1362010	Voire	Lassicourt	896	Pluvial E	2
H1932020	Traconne	Saint-Brice	280	Uniforme	2
H2142010	Cure	Domecy-sur-Cure	403	Pluvial E	5
H2182010	Cure	Arcy-sur-Cure	1182	Pluvial A	5
H2322020	Serein	Guillon	488	Pluvial C	5
H2342010	Serein	Chablis	1118	Pluvial E	3
H2622010	Vanne	Pont-sur-Vanne	866	Uniforme	2
H3122020	Ouanne	Gy-les-Nonains	883	Pluvial E	2
H3322010	Bezonde	Pannes	339	Pluvial E	2
H3613010	Lunain	Paley	163	Pluvial A	2
H3613020	Lunain	Episy	252	Uniforme	2
H3623010	Orvanne	Blennes	108	Uniforme	2
H4243010	Yvette	Villebon-sur-Yvette	224	Uniforme	2
H5122310	Ornain	Fains-Véel	820	Pluvial D	3
H5302010	Surmelin	Saint-Eugène	454	Pluvial A	2
H5412010	Petit Morin	Montmirail	354	Pluvial B	2
H6113010	Cousances	Aubréville	166	Pluvial E	3
H7041010	Oise	Monceau-sur-Oise	852	Pluvial C	3
H7913030	Mauldre	Aulnay-sur-Mauldre	385	Uniforme	2
H9923010	Austreberthe	Duclair	209	Uniforme	2
I1103010	Orbiquet	Beauvillers	326	Uniforme	2
I3612010	Laize	Saint-Germain-le-Vasson	96	Pluvial A	1
J1324010	Evron	Coetmieux	142	Pluvial D	1
J3403020	Elorn	Commana	10	Pluvial C	1
J3404110	Ruisseau de Mougau Bihan	Commana	9	Pluvial C	1
J4902010	Laïta	Quimperlé	831	Pluvial E	1

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
J7024010	Valière	Erbrée	31	Pluvial D	1
J8653010	Combs	Maure-de-Bretagne	103	Pluvial E	1
K0673310	Coise	Saint-Médard-en-Forez	181	Pluvial B	6
K1363010	Bourbince	Ciry-le-Noble	343	Pluvial C	5
K1775510	Andarge	Diennes-Aubigny	67	Pluvial D	3
K1943010	Nièvre de Champlemy	Saint-Aubin-les-Forges	210	Pluvial B	3
K2134010	Clamouze	Chastanier	51	Pluvio-Nival	6
K2163110	Grandrieu	Grandrieu	73	Pluvio-Nival	6
K5653010	Auron	Bourges	585	Pluvial E	2
K6373020	Petite Sauldre	Ménétréol-sur-Sauldre	318	Pluvial E	2
K7414010	Tourmente	Villeloin-Coulangé	109	Pluvial E	2
K7424010	Olivet	Beaumont-Village	76	Pluvial D	2
L0010610	Vienne	Peyrelevade	59	Pluvial A	5
L0140620	Vienne	Saint-Léonard-de-Noblat	997	Pluvial A	5
L0513010	Roselle	Saint-Hilaire-Bonneval	125	Pluvial A	5
L0614010	Aurence	Limoges	35	Pluvial E	5
L0624010	Aixette	Aixe-sur-Vienne	152	Pluvial E	5
L4523020	Sedelle	Lafat	224	Pluvial E	5
L6216920	Brignon	Paulmy	75	Pluvial E	2
L8213010	Thouaret	Luzary	308	Uniforme	1
L8343010	Argenton	Massais	634	Pluvial D	1
M0583020	Vègre	Asnière-sur-Vègre	401	Pluvial C	2
M0653110	Vaige	Bouessay	233	Pluvial D	1
M1214010	Couëtron	Souday	85	Pluvial D	2
M1313010	Veuve	Saint-Pierre-du-Lorouër	156	Pluvial A	2
M3774010	Chéran	la Boissière	85	Pluvial D	1
M3834030	Argos	Sainte-Gemmes-d'Andigné	153	Pluvial D	1
M5214020	Hyrome	Saint-Lambert-du-Lattay	151	Pluvial D	1
M7314010	Sanguèze	Tillières	90	Pluvial D	1
M8144010	Logne	Saint-Colomban	130	Pluvial D	1
N3308210	Doulaye	Moutiers-sur-le Lay	38	Pluvial D	1
N3403010	Yon	Dompierre-sur-Yon	42	Pluvial D	1
O0174010	Neste d'Aure	Sarrancolin	606	Nival de Transition	10
O0592510	Salat	Roquefourt-sur-Garonne	1570	Nivo-Pluvial	10
O1576910	ruisseau des Gourds	Limbrassac	6	Pluvial B	9
O1652920	Hers Vif	Mazère	1330	Pluvial B	9
O3424010	Cernon	Saint-Georges-de-Luzençon	220	Pluvial B	8
O3471010	Tarn	Saint-Victor-et-Melvieu	2677	Pluvial A	8
O4222520	Agout	Castres	920	Pluvial B	6
O4335010	Arnette	Mazarnet	57	Pluvial B	6
O4364310	Arn	Vintrou	129	Pluvial E	8
O4394010	Thoré	Labruguière	550	Pluvial E	8
O5464310	Giffou	Saint-Just-sur-Viaur	175	Pluvial E	6
O9675010	Saucats	Saucats	16	Pluvial D	9
P0190010	Dordogne	Bort-les-Orgues	1010	Pluvial A	5

Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
P0804010	Sumène	Saint-Etienne-de-Chomeil	48	Pluvial A	6
P0924010	Triouzoune	Saint-Angel	79	Pluvial A	5
P1502510	Maronne	Pleaux	513	Pluvial A	6
P3001010	Vézère	Saint-Merd-les-Oussines	52	Pluvial A	5
P3245010	Mayne	Saint-Cyr-la-Roche	49	Pluvial E	5
P3464010	Vimbelle	Bar	147	Pluvial A	6
P3994010	Maumont	Ussac	162	Pluvial A	5
P8462510	Dronne	Coutras	2816	Pluvial E	9
P9435110	Barbefer	Pugnac	25	Pluvial D	9
Q1224010	Bahus	Eugénie-les-Bains	49	Pluvial E	9
R6092910	Boutonne	Vert	523	Pluvial E	2
U1035410	Scey	Beveuge	165	Pluvial C	4
U2102010	Doubs	Ville-du-Pont	658	Pluvial A	7
U2345410	Rhonne	Lachapelle-sous-Chaux	17	Pluvial C	4
U2655030	Cuisance	Mesnay	70	Pluvial A	7
U2715010	Orain	Deschaux	181	Pluvial C	5
U3205210	Grosne	Trades	31	Pluvial A	6
U3455010	Vallièrre	Lons-le-Saunier	19	Pluvial A	7
U4014020	Reyssouze	Bourg-en-Bresse	130	Pluvial A	5
V1015020	Valserine	Chézery-Forens	105	Nivo-Pluvial	7
V1225010	Filière	Argonay	140	Pluvio-Nival	7
V2012010	Ain	Bourg-de-Sirod	210	Pluvial A	7
V2322010	Ain	Cernon	1120	Pluvial A	7
V2624010	Valouse	Thoirette	280	Pluvial A	7
V2924020	Albarine	Chaley	135	Pluvio-Nival	7
V3424310	Rival	Beaufort	461	Pluvio-Nival	7
V4015030	Barberolle	Barbières	10	Pluvio-Nival	7
V4144010	Eyrieux	Beauvène	392	Méditerranéen	8
V6052010	Ouvèze	Vaison-la-Romaine	585	Pluvio-Nival	8
W2114010	Séveraisse	Villar-Loubière	133	Nival	7
W2222010	Drac	Corps	990	Nival de Transition	7
X0010010	Durance	Val-des-Près	207	Nival	7
X0130010	Durance	Argentière-la-Bessée	984	Nival	7
X0434010	Ubaye	Barcelonnette	549	Nival	7
X1045820	Riou	Saint-Genis	8	Pluvio-Nival	8
X1225010	Bes	Javie	165	Pluvio-Nival	8
X2202010	Verdon	Demandolx	655	Nivo-Pluvial	8
Y0105210	Baillaury	Banyuls-sur-Mer	18	Pluvial C	8
Y0325010	Canterrane	Terrats	31	Pluvial C	8
Y0436420	Cady	Villefranche-de-Conflent	60	Nival de Transition	10
Y0444010	Têt	Marquixanes	834	Nivo-Pluvial	10
Y0664040	Agly	Estagel	903	Pluvial E	8
Y0824010	Berre	Villesèque-des-Corbières	165	Pluvial C	8
Y1012010	Aude	Puyvalador	134	Nival de Transition	10
Y1105010	Rebenty	Saint-Martin-Lys	136	Pluvial B	10

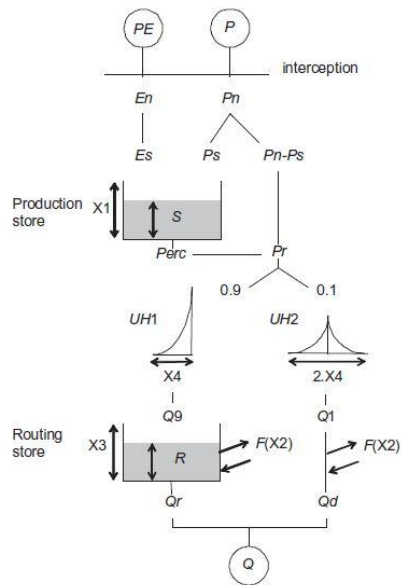
Code	Cours d'eau	Exutoire	S [km ²]	Typologie	HER regroupée
Y1416210	Clamoux	Malves-en-Minervois	85	Pluvial E	6
Y3514020	Vistre	Caissargues	291	Pluvial A	8
Y4615610	Réal Collobrier	Pierrefeu-du-Var	71	Pluvial D	8
Y4615810	Valescure	Collobrières	9	Pluvial D	8
Y4615830	Réal Collobrier	Collobrières	29	Pluvial D	8
Y4616220	ruisseau de la Malière	Collobrières	12	Pluvial E	8
Y4617810	ruisseau du Baubarnier	Collobrières	2	Pluvial E	8
Y5215010	Aille	Cannet-des-Maures	79	Pluvial D	8
Y5436210	La Verne	La Môle	38	Pluvial D	8
Y5515410	Siagnole	Mons	52	Méditerranéen	8
Y5605210	Brague	Biot	41	Méditerranéen	8

Annexe 2 – Descriptions des modèles pluie-débit utilisés dans la thèse

Annexe 2.1 – Modèle GR4J

Cette présentation du modèle est issue de Perrin (2000).

Schéma de la structure du modèle



Paramètres

X1 : Capacité maximale du réservoir de production (mm).

X2 : Coefficient d'échange en eau souterrain.

X3 : Capacité maximale du réservoir de transfert (mm).

X4 : Temps de base de l'hydrogramme unitaire (j).

Formules mathématiques*Fonction de production*

$$\text{Si } P \geq E, P_n = P - E, E_n = 0$$

$$\text{Si } P < E, E_n = E - P, P_n = 0$$

$$P_s = X1 \cdot \frac{\left(1 - \left(\frac{S}{X1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{X1}\right)}{1 + \frac{S}{X1} \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{X1}\right)}$$

$$E_s = S \cdot \frac{\left(2 - \left(\frac{S}{X1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{X1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{X1}\right)}$$

$$Perc = S - \left(S^{-4} + \left(\frac{9}{4} \cdot X1\right)^{-4}\right)^{1/4} ; S = S - E_s + P_s - Perc$$

$$P_r = Perc + (P_n - P_s)$$

Fonction de transfert

$$\begin{cases} 0 \leq j \leq X4, SH1(j) = \left(\frac{j}{X4}\right)^{\frac{5}{2}} \\ j > X4, SH1(j) = 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 \leq j \leq X4, SH2(j) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{j}{X4}\right)^{\frac{5}{2}} \\ X4 < j \leq 2 \cdot X4, SH2(j) = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(2 - \frac{j}{X4}\right)^{\frac{5}{2}} \\ j > 2 \cdot X4, SH2(j) = 1 \end{cases}$$

$$F = X2 \cdot \left(\frac{R}{X3}\right)^{\frac{7}{2}}$$

$$Q_d = \max(0, Q_1 + F) ; R = \max(0, R + Q_9 + F)$$

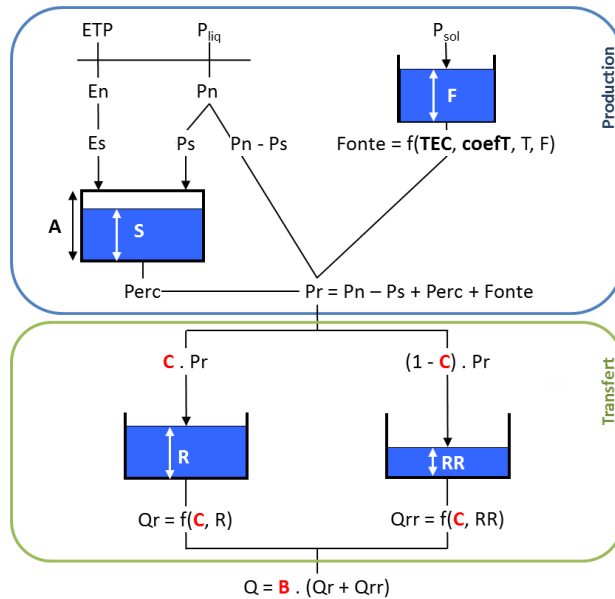
$$Q_r = R - (R^{-4} + X3^{-4})^{-\frac{1}{4}} ; R = R - Q_r$$

$$Q = Q_r + Q_d$$

Annexe 2.1 – Modèle GR2M-LoiEau (noté LoiEauM dans le manuscrit)

Cette présentation du modèle est issue de Folton et Arnaud (2012).

Schéma de la structure du modèle



Paramètres

A : Capacité maximale du réservoir de production régionalisée suivant l'hydrogéologie (mm).

B : Paramètre correcteur du modèle.

C : Paramètre de la fonction de transfert qui règle la séparation des écoulements et les vidanges des deux réservoirs.

Formules mathématiques

Module de neige

$$F = F + P_{sol}$$

$$\text{Si } T < TEC, \text{ Fonte} = 0$$

$$\text{Si } T \geq TEC, \text{Fonte} = \min\left(\frac{F}{coefT} \cdot (T - TEC), F\right)$$

$$F = F - \text{Fonte}$$

Fonction de production

$$\text{Si } P \geq E, P_n = P - E, E_n = 0$$

$$\text{Si } P < E, E_n = E - P, P_n = 0$$

$$P_s = A \cdot \frac{\left(1 - \left(\frac{S}{A}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{A}\right)}{1 + \frac{S}{A} \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{A}\right)}$$

$$E_s = S \cdot \frac{\left(2 - \left(\frac{S}{A}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{A}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{A}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{A}\right)}$$

$$Perc = S - \left(S^{-4} + \left(\frac{9}{4} \cdot A\right)^{-4}\right)^{1/4}; S = S - E_s + P_s - Perc$$

$$P_r = Perc + (P_n - P_s) + \text{Fonte}$$

Fonction de transfert

$$R = R + C \cdot P_r; RR = RR + (1 - C) \cdot P_r$$

$$Q_r = \left(-\frac{1}{2} \cdot C + \frac{1}{2}\right) \cdot R; R = R - Q_r$$

$$Q_{rr} = \left(-\frac{1}{2} \cdot C + 1\right) \cdot RR; RR = RR - Q_{rr}$$

$$Q = B \cdot (Q_r + Q_{rr})$$

Résumé :

L'estimation d'indices d'étiage est d'une grande importance pour une meilleure connaissance de la ressource en eau disponible et en déduire des règles de gestion de cette ressource et des risques associés. Idéalement, ces indices sont calculés sur les sites jaugés à partir de longues chroniques de débits mesurés. Sur les sites non jaugés, ces indices doivent être estimés. Cette thèse s'inscrit dans le projet d'amélioration de l'outil informatique « LoiEau » utilisé par les DREAL et les Agences de l'eau. Le principal objectif est de développer un modèle hydrologique simple et flexible pour estimer tous les indices d'étiage souhaités à des intervalles de temps journaliers ou supérieurs en sites non jaugés. La simplicité du modèle repose sur l'hypothèse forte que deux paramètres plus facilement régionalisables suffisent à estimer les indices avec une précision voulue. Cette précision dépend de la fonction objectif qu'il a fallu adapter aux faibles débits pour caler convenablement les paramètres du modèle sur des sites jaugés. Le modèle se veut flexible dans le sens où il est applicable à une large variété de bassins versants. Il a été comparé au modèle journalier à quatre paramètres GR4J et au modèle mensuel à deux paramètres LoiEau en s'intéressant aussi à la façon de régionaliser les paramètres. Des comparaisons ont également été réalisées avec une méthode d'estimation dite stochastique d'un indice d'étiage classique. Ces travaux montrent le potentiel du modèle à deux paramètres, mais aussi l'avantage du pas de temps journalier, la variabilité temporelle des précipitations n'étant pas sans conséquence sur l'estimation de débits moyens en raison de la non-linéarité des modèles pluies-débits.

Mots clés : [étiage, modèle hydrologique, non jaugé, indices d'étiage, calage, fonction objectif, régionalisation]

[Improvement of a regionalized rainfall-runoff model to estimate low-flow indices]

Abstract :

Estimating low-flow indices is of paramount importance to understand low flows and to manage water resources and risk assessments. These indices are derived from time-series of river discharges that are measured at gauged sites over long periods. At ungauged sites, the indices must be estimated. This research work is part of a project to improve "LoiEau", a software package that is used by French regional environmental or water agencies. The main objective is to develop a simple and flexible rainfall-runoff model to simulate low-flow indices of ungauged sites at daily or longer time intervals. The model simplicity relies on the strong assumption that two free parameters are sufficient to provide accurate enough estimates of low-flow indices, yet making easier the regionalisation of models. The model accuracy depends on the objective function that is used to calibrate model parameters on gauged sites and had to be adapted to low-flow simulations. The model is flexible in the sense that it is designed to fit to a wide variety of catchments and hydro-meteorological behaviours. This model was compared with GR4J, a daily rainfall-runoff model which involves four parameters, and LoiEau, a monthly model. Comparisons were also carried out with a stochastic estimation method applied to a specific low-flow index. This research work shows the potential of the two-parameter model, but also the advantage of a daily time step to account for the temporal variability of precipitations, which is not without consequence on the assessment of average discharges due to the nonlinearity of rainfall-runoff models.

Keywords : [low flow, hydrological modelling, ungauged sites, low-flow indices, calibration, objective function, rainfall-runoff model, regionalisation]